

Universidad Nacional de La Plata  
Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación  
Tesis Doctoral

**Descubrimiento científico como  
resolución de problemas:  
alcances y límites**

José Ahumada

Directores: Prof. Víctor Rodríguez  
Dra. Cristina Di Gregori

Diciembre, 2003



## INDICE

I.Introducción.....	9
II.El concepto de problema: aproximaciones psicológicas y filosóficas ....	14
1. <i>Modelos psicológicos de problema</i> .....	15
1.1. El concepto de problema en Dewey: problema como incerteza en las creencias por perplejidad, confusión o duda .....	16
1.2. El concepto de problema en Duncker: problema como objetivo no alcanzado.....	18
1.3. El concepto de problema en Gilhoolly.....	21
1.4. El concepto de problema en Newell y Simon .....	22
1.5. Reitman, conducta resolutora de problema versus problemas resueltos o a ser resueltos .....	24
1.6. Conclusión sobre modelos psicológicos de la noción de problema.....	29
2. <i>Modelos filosóficos de problema</i> .....	31
2.1. Modelo popperiano de problema.....	31
2.2. El concepto de problema en Polanyi: problema como desequilibrio funcional.....	36
2.3. Modelo de problema en Kuhn: la distinción entre problemas y enigmas (puzzles).....	37
2.4. Problemas como interrogantes .....	42
2.5. La concepción de problema en Laudan.....	43
2.6. Problema como inconsistencia lógica con estructura histórica en Hattiangadi.....	48
2.7. La concepción de problema de Nickles: el modelo inclusión-restricción .....	56
3. <i>Consideraciones finales sobre el concepto de problema</i> .....	66
III.Resolución de problemas.....	68
1. <i>Computadora y humanos como procesadores de información simbólica</i> .....	71
2. <i>Modelo Newell-Simon de resolución de problemas</i> .....	72

---

3. Contexto histórico del modelo de resolución de problema de Newell y Simon.....	75
4. La noción de resolución de problemas a partir de la emergencia de la noción de cómputo .....	80
5. La paradoja de Menón y como lograr una concepción de resolución de problema que eluda esta paradoja.....	84
6. Modelo inclusión-restricción de Nickles y la paradoja de Menón	87
7. Desafíos generales a la definición de problema y resolución de problemas científicos.	88
8. Modelo contextual de resolución de problemas.....	92
Las ventajas del modelo contextual .....	96
9. Componentes generales de la noción de resolución de problemas	98
10. Estrategias de resolución de problemas.....	99
10.1. Resolución de problemas como búsqueda: .....	99
10.2. Resolución de problemas como razonamiento:.....	100
10.3. Resolución de problemas como satisfacción de restricciones: .....	100
10.4. Resolución de problemas como eliminación de fijaciones .	104
10.5. Resolución de problemas como búsqueda en espacio del problema.....	106
11. Resolución de problemas y espacios del problema.....	107
11.1. Del modelo de descubrimiento científico como búsqueda dual a búsqueda en múltiples espacios.....	109
11.2. Modelo jerárquico de tres espacios del problema .....	113
11.3. Espacios del problema más allá de la búsqueda.....	117
11.4 Conclusión sobre espacios del problema y sus extensiones:	119
12. Tipos de problemas y su resolución .....	120
13. Resolución de problemas y representación .....	129
14. Resolución de problema y complejidad.....	135

---

14.1. Resolución de problemas y complejidad: el problema del viajante de comercio.....	137
14.2. El problema del viajante desde el punto de vista humano-perceptual .....	141
14.3. Comentarios finales.....	144
IV.Heurística y resolución de problemas .....	146
1. <i>Heurística, resolución de problemas y descubrimiento</i> .....	146
2. <i>Heurística e información</i> .....	151
3. <i>El problema de los orígenes de las heurísticas</i> .....	155
4. <i>Heurística y búsqueda sistemática:</i> .....	156
5. <i>Heurística e información por modelos simplificados</i> .....	157
Heurística como fuentes de información con ruido: .....	158
6. <i>Evolución, variación ciega y descubrimiento como heurística</i> ..	159
El modelo Campbelliano de creatividad .....	161
7. <i>Conclusiones</i> .....	167
V.DESCOVERIMIENTO.....	169
Inferencia, experimento y descubrimiento generativo: .....	174
1. <i>Aproximaciones generales al descubrimiento científico</i> .....	176
2. <i>Distintas aproximaciones al descubrimiento y resolución de problemas.</i>	182
3. <i>Métodos y descubrimiento</i> .....	184
3.1. La relación entre método y novedad .....	184
3.2. El carácter propositivo de la investigación científica y sus consecuencias sobre el método.....	187
3.3. Teoremas “No Free Lunch” (NFL), variación ciega y descubrimiento. ....	189
4. <i>Modelos computacionales de descubrimiento científico</i> .....	193
5. <i>Descubrimiento y creatividad</i> .....	197
Creatividad y Conciencia: la creatividad en la psicología del descubrimiento .....	197

VI. Objeciones al descubrimiento como resolución de problemas como búsqueda guiada en espacios de problemas .....	205
1. Límites al descubrimiento como resolución de problemas.....	205
1.1. La noción de descubrimiento científico como búsqueda heurística. ....	206
1.2. La inexistencia de un conjunto general de reglas que pueda dar cuenta de todos los descubrimientos posibles. ....	208
1.3. Inducción y descubrimiento .....	208
1.4. Reglas heurísticas.....	209
1.5. El problema de la representación .....	210
1.6. El insight en la teoría de resolución de problemas:.....	211
2. Objeciones al descubrimiento como resolución de problema como búsqueda.....	212
2.1. Argumentos sobre límites al descubrimiento científico como resolución de problemas .....	212
2.2. El problema de la inducción no es superado por la teoría del descubrimiento de Simon. ....	215
2.3. Descubrimiento es estructuración de la pregunta correcta y no sólo resolución de problemas: .....	217
2.4. Descubrimiento es también explicación y comprensión no sólo ajuste de una fórmula a datos. ....	218
2.5. Carece de dimensión normativa. ....	220
2.6. No da cuenta de las dificultades que presentan los descubrimientos científicos en la historia de la ciencia. ....	223
2.7. Los programas no pueden crear nuevas heurísticas. ....	224
2.8. Los procesos de reconocimiento no agotan el insight.....	226
2.9. Los procesos de incubación no son compatibles con la concepción de Simon.....	229
2.10. Los programas BACON hacen una suposición no realista de las condiciones iniciales. ....	229
2.11. Irreductibilidad de los procesos humanos de descubrimientos a determinados sistemas físicos.....	230
2.12. Ofrece una perspectiva donde la generación de teoría surge principalmente a partir de los datos, negando casos donde la teoría está subdeterminada por los datos. ....	232

---

2.13. El rol de las analogías no puede ser representado a través de producciones.....	233
2.14. El rol de las imágenes en algunos descubrimientos hace limitada la idea de producciones. ....	234
2.15. Concepción de descubrimiento es válida para ciencia normal pero no para cambios revolucionarios.....	234
2.16. Diluye más que fundamenta una lógica del descubrimiento .....	235
VII.Consideraciones finales y conclusiones .....	237
VIII.Apéndice 1:.....	247
<i>Los experimentos sobre el problema del viajante.....</i>	247
1. <i>Los experimentos de Ormerod - MacGregor.....</i>	247
2. <i>Los experimentos de Simon.....</i>	251
IX.Apéndice 2:.....	253
<i>Sistemas computacionales de descubrimiento.....</i>	253
1. Los Sistemas de Descubrimiento BACON .....	253
2. El sistema GLAUBER .....	267
3. El sistema STAHL .....	269
4. El sistema DALTON.....	270
5. El sistema FAHRENHEIT .....	271
6. El sistema IDS.....	271
7. El sistema AM.....	272
8. El sistema ABACUS .....	273
9. El sistema ECHO .....	273
10. El sistema MECHEM.....	281
11. El sistema PAULI.....	282
12. El sistema KEKADA .....	282
13. El sistema CDP.....	295
X.Bibliografía.....	296

---

# I

## Introducción

La investigación científica puede ser vista como un océano continuo y sin divisiones

Leibniz

El descubrimiento científico, de ser un tópico cedido por los filósofos de la ciencia a los psicólogos e historiadores y en definitiva abandonado por todos, en los últimos 25 años ha recibido una importante atención en todas estas disciplinas. Tenemos estudios filosóficos, históricos, histórico-cognitivos, lógicos y sociológicos que han mostrado un marcado interés por los problemas del descubrimiento y cuestiones asociadas con el mismo.

El abandono del descubrimiento científico como un tópico dentro de la epistemología es una herencia de la distinción que realizara Reichenbach (1938) entre contexto de descubrimiento y contexto de justificación. La discusión acerca de los límites de cada uno de estos contextos, así como su posible multiplicación agregando nuevos contextos, ha caracterizado buena parte de la discusión filosófica sobre

esta temática durante la década de 1980. Sin embargo, la problemática que presentaré puede en, líneas generales, prescindir de esta discusión. Más aún, las conclusiones de este trabajo vuelven en parte superfluas las divisiones que la distinción entre contextos supone.

Sin embargo, ha sido a través de las ciencias cognitivas que la temática del descubrimiento recibió un impulso tanto teórico como práctico. El impacto incluso llevó a que algunos empezaran a hablar de una filosofía computacional de la ciencia, por ejemplo Thagard (1988). Pero la influencia que los desarrollos computacionales tuvieron en filosofía fue proporcional a su desconfianza. Numerosos filósofos han puesto en duda que los modelos computacionales de descubrimiento propuestos sean adecuados, que logren lo que se proponen o que su estudio tenga algún tipo de relevancia filosófica. Por otro lado, junto con esta tendencia y por razones no vinculadas directamente al contexto de descubrimiento, se empezaron a introducir en la filosofía de la ciencia análisis basados en las nociones de resolución de problemas y heurísticas.

La teoría de Simon propone que los descubrimientos científicos son procesos normales de resolución de problemas cuyo método básico es búsqueda selectiva (heurística). Esta teoría toma tanto una aproximación por vía de modelos computacionales, como una vía que podríamos llamar filosófica. Esta dualidad en la aproximación al descubrimiento científico dentro del programa de Simon es producto de numerosos trabajos previos desarrollados junto a otros colaboradores entre los que se destaca Allen Newell.

Luego de casi tres décadas, en las que se ha desarrollado mucha investigación en las áreas nombradas y en las que han habido muchas discusiones, queda la pregunta de en qué estado ha quedado el descubrimiento computacional basado en la teoría de resolución de problemas de Simon.

Hay que destacar que la investigación en estas áreas no está libre de tensiones. Por un lado, tenemos nuevos sistemas computacionales, como redes neuronales, algoritmos genéticos, computación con ADN, autómatas celulares, programación genética, que nos hacen ver que reglas muy simples poseen mucho poder para enfrentar complejidades crecientes. Por otro lado, la filosofía y la historia de la ciencia muestran casos de una complejidad que no parece abordable con los métodos simples propuestos por las tendencias actuales de los modelos computacionales. Además, hoy es parte de la filosofía de la ciencia un concepto de heurística que tiene una significación no reducible a reglas implementables en un algoritmo. No obstante, casi todos proponen como meta y actividad principal la resolución de problemas. Este aparente acuerdo entre estas dos tendencias me llevó a que el objetivo final convergiera en la definición de los términos que ambas comparten. A partir de estas definiciones o caracterizaciones, intento evaluar el valor de la noción de resolución de problemas como estrategia para dar cuenta del descubrimiento científico.

A fin de alcanzar este objetivo, comenzaré clasificando en el segundo capítulo las aproximaciones al concepto de problema. Así, en la primera parte de ese capítulo me ocuparé de los modelos psicológicos de problema. En la segunda parte me aboco a los modelos filosóficos de problema. Las diferencias entre estos dos tipos de aproximaciones son el producto de la distinción entre aproximaciones psicológicas y no psicológicas. Estas diferencias tendrán consecuencias para los tópicos de los que me ocuparé en los capítulos siguientes.

El tercer capítulo aborda el concepto de resolución de problemas. La estructura del mismo pone de manifiesto la complejidad de este concepto, así como la diversidad de estrategias para su análisis. A lo largo del capítulo aparecerá una tensión entre aproximaciones globales y

locales, y entre aproximaciones algorítmicas y no algorítmicas, que nos acompañará a lo largo de todo el trabajo.

El cuarto capítulo se focaliza en uno de los conceptos claves del programa de resolución de problemas: el concepto de heurística. A pesar de que el concepto de heurística constituye uno de los ejes principales de esta tesis, su caracterización ha resultado muy elusiva. Es por esta razón que se presentan las heurísticas desde diferentes ángulos relacionados con la resolución de problemas.

El quinto capítulo muestra distintas aproximaciones al descubrimiento científico. En él se exponen tanto aproximaciones filosóficas como computacionales. He dejado para el Apéndice 2 la descripción técnica de los diferentes programas computacionales de descubrimiento científico, a fin de no dispersar el argumento central. Lo mismo hice en el Apéndice 1, donde pueden encontrarse descripciones de algunos experimentos en psicología cognitiva sobre el problema del viajante. Sin embargo, muchos de los argumentos expuestos acerca de los alcances y los límites del descubrimiento científico como resolución de problemas se basan en esos desarrollos.

Finalmente, en el capítulo sexto se exponen los límites al descubrimiento científico como resolución de problemas. Este capítulo, si bien se basa en el programa de investigación desarrollado por Simon y Newell, tiene en cuenta las alternativas que fueron presentadas en capítulos anteriores.

Algunas aclaraciones técnicas:

Todas las citas son traducciones que me pertenecen, aunque la paginación de la referencia corresponde a su edición en el idioma original.

He optado por un sistema de referencia en el cuerpo del texto donde figura el autor, el año de la edición que he manejado y luego el número de página cuando correspondiere.

Muchas de las ideas que aparecen en este trabajo fueron presentadas o publicadas con anterioridad como parte de la investigación desarrollada durante los últimos años. Sin embargo, he debido reescribirlas a casi todas, por lo que he prescindido casi por completo de las referencias a trabajos personales.

## II.

### **El concepto de problema: aproximaciones psicológicas y filosóficas**

Aunque la resolución de problemas haya sido estudiada hace muchos años, es curioso que no haya una definición del concepto mismo de problema ampliamente aceptada.  
(Reitman, 1965: 125)

Hace ya más de 20 años Thomas Nickles sostuvo en *What Is a Problem that We May Solve It?* (1981) que “a pesar del notable incremento en la atención a problemas y cuestiones tales como la unidad de y para el análisis filosófico, y a pesar de la emergencia de los modelos de resolución de problemas de investigación en Kuhn, los últimos escritos de Popper y especialmente Laudan, todavía estamos lejos de poseer una adecuada concepción de problemas” La situación no parece haber cambiado sustancialmente. No tenemos todavía un concepto de problema que reúna las condiciones necesarias para abordar filosóficamente el problema del descubrimiento científico, y las aproximaciones psicológicas a esta noción no parecen mejorar su caracterización a pesar de su creciente desarrollo. En estos últimos 50 años se ha trabajado profusamente el concepto de problema en las ciencias cognitivas, la inteligencia artificial y psicología cognitiva, pero

pocos de estos resultados han logrado instalarse como un marco general en la filosofía de la ciencia, tanto en relación al contexto de justificación como al descubrimiento. Es mi propósito en este capítulo, hacer un análisis de los distintos conceptos de problemas que se ha propuesto en filosofía de la ciencia, ciencias cognitivas y lógica a fin de lograr clarificar los elementos que componen las distintas versiones, y luego proponer una síntesis general que nos ubique conceptualmente en nuestro tema central: la relación entre descubrimiento y resolución de problemas. Como veremos, hay una gran distancia entre determinar qué es un problema y dar una concepción general de problema científico que sea lo suficientemente amplio como para abordar de modo efectivo cuestiones tales como el descubrimiento, la justificación, o la evaluación de teorías científicas. En otras palabras, el objetivo de este capítulo es lograr una caracterización de la noción de problema que posibilite evaluar la perspectiva de que la ciencia puede ser mejor comprendida como resolución de problemas.

## **1. Modelos psicológicos de problema**

La psicología ha sido una disciplina que desde comienzos del siglo XX abordó científicamente el estudio de los problemas y su resolución. Aunque recién ahora estos estudios se han dirigido a problemas científicos de cierta complejidad, un siglo de estas investigaciones y las derivaciones que tuvieron sobre el descubrimiento científico merecen por lo menos una breve mención. Comenzaré por presentar el concepto de problema en Dewey por ser uno de los primeros en brindar una conexión estrecha entre resolución de problemas y aprendizaje.

***1.1. El concepto de problema en Dewey: problema como incerteza en las creencias por perplejidad, confusión o duda.***

El problema fija el objetivo del pensamiento y el objetivo controla los procesos de pensamiento. (Dewey, 1910: 12)

La importancia del pensamiento de Dewey respecto a la relación entre descubrimiento y resolución de problema radica principalmente en haber tratado la relación entre aprendizaje y resolución de problemas en una época dominada filosóficamente por el positivismo lógico. Ofrece una serie de definiciones en sus distintas obras que perfilan una concepción general de problema no demasiado alejada de los desarrollos posteriores de psicólogos cognitivos enrolados en el programa de la inteligencia artificial (IA).

Desde un punto de vista filosófico, el valor de los trabajos de Dewey radica en haber sostenido una visión de la ciencia semejante en casi todos los aspectos a la de Popper, aunque difiriendo en el rol que le asigna a los problemas en lo atinente al aumento del conocimiento. Dewey comienza en *How to think* definiendo a un problema como:

...alguna perplejidad, confusión o duda. El pensamiento no es una combustión espontánea; ni tiene lugar sobre la base de principios generales (Dewey, 1910: 12).

Esto lleva a que la resolución del mismo sea entendida en términos generales como un proceso de estabilización o recuperación de un equilibrio perdido.

La demanda de una solución de una perplejidad es el factor estabilizador y guía en el proceso entero de reflexión. Donde no hay necesidad de resolver un problema o de superar una dificultad, el curso de las sugerencias fluye al azar (Dewey, 1910: 11).

Esta última, cita junto con el epígrafe, muestran claramente el carácter no aleatorio que le otorga a toda resolución de problema, los

fines u objetivos de algún modo dirigen los procesos de resolución de problemas, hacia la estabilidad que se considera como solución. Por otra parte, Dewey se da cuenta que la noción de perplejidad puede hacer referencia a un sinnúmero de experiencias, y en principio dudaríamos en clasificar a todas ellas como problemas. Pero entiende que una definición general de problema debe admitir casos extremos como, por ejemplo, un cambio repentino de temperatura. Esta atribución puede sonar forzada y artificial pero debemos considerarla como un problema.

si queremos extender el significado de la palabra problema a cualquier cosa que desafíe y desconcierte la mente- no importando cuán leve y común sea, entonces hay un problema genuino en esta experiencia (temperatura) de cambio repentino (Dewey, 1910: 9).

Dentro de esta definición general, Dewey nos ofrece tres tipos de problemas, biológicos o físicos, psicológicos e intelectuales. Esto puede verse en el capítulo III de *How to think* en “Las fuentes naturales del entrenamiento del pensamiento” donde señala que la curiosidad, puede tomar tres dimensiones: física, social e intelectual.

La curiosidad física, que es común en animales y en los niños

toma la forma de exceso de energía orgánica, una clase de intranquilidad fisiológica que causa una profusión de conductas que lleva al niño a estar “dentro de todo”- a alcanzar, hurgar, golpear, espiar (Dewey, 1910: 31).

Otro tipo de curiosidad es la social que tiene lugar cuando

el niño apela a otros para suplir su acopio de experiencias de modo tal que si el objeto no responde de un modo interesante a sus experimentos podría llamar a otras personas para que le ofrezcan materiales interesantes. Dewey, 1910: 31).

Por último tenemos la curiosidad intelectual

surge por arriba de la orgánica y de los planes sociales y se transforma en intelectual en la medida que es transformada en interés por problemas provocados por las

observaciones de las cosas y la acumulación de material  
(Dewey, 1910: 33).

Para Dewey, entonces, la curiosidad es un pre-requisito para cualquier clase de indagación y una fuente de distintos tipos de problemas.

En relación específicamente al concepto de problema, Dewey dice que un problema surge siempre que algo, “no importa cuán leve y común- deje perpleja y desafíe nuestra mente de modo tal que coloquen a nuestras creencias en total incerteza” (Dewey, 1910: 9).

Entender a los problemas como incerteza lleva a su vez a otros dos tipos generales de problemas,

a) “situación de bifurcaciones de caminos” (Dewey, 1910: 11). En tales casos, nuestro destino (objetivo) es claro, pero no hay certeza respecto de qué camino (medio) elegir para alcanzar éste. Aquí, el principal propósito de la investigación es llenar un hueco en nuestro conocimiento en orden a alcanzar un fin práctico.

b) Un segundo tipo de problema se da en el caso de que tenga lugar algo no esperado. Aquí el problema consiste en encontrarle significado a la observación que nos sorprende.

En síntesis, la concepción de problemas como incerteza o duda y su resolución ligada a la curiosidad nos da un cuadro muy general de lo que constituye un problema mostrando cómo una definición lo suficientemente general de problema debe solapar nociones físicas, biológicas, psicológicas, sociales y abstractas del mismo.

### ***1.2. El concepto de problema en Duncker: problema como objetivo no alcanzado.***

Para Karl Duncker, psicólogo de la Gestalt al que muchos le atribuyen el primer estudio sistemático sobre resolución de problema,

definió un problema como “una situación en la que uno tiene un objetivo pero no sabe como alcanzarlo” (1945: 1). Para este autor estamos ante un problema,

siempre que uno no pueda ir desde una situación dada a una situación deseada por una acción simple, entonces tenemos que recurrir al pensamiento (por acción entendemos aquí la realización de operaciones obvias). Tal pensamiento tiene la tarea de diseñar algunas acciones que podrían mediar entre las situaciones existentes y las deseadas. De este modo la ‘resolución’ de un problema práctico debe satisfacer dos demandas: la primera es que su realización debe dar lugar a la situación objetivo y en segundo lugar le debe ser posible arribar a ésta desde la situación dada simplemente a través de una acción. (Duncker, 1945: 1)

Duncker usando lo que ahora conocemos como análisis de protocolo, experimentó detalladamente acerca de qué ocurría cuando se les daba a las personas el siguiente problema:

Dado un ser humano con un tumor en el estómago, y rayos que, con suficiente intensidad, destruyen tejido orgánico. ¿Puede uno liberar a este individuo del tumor mediante estos rayos y al mismo tiempo evitar destruir el tejido sano?

Los resultados de estos experimentos fueron interesantes, porque a pesar de que casi todas las respuestas que daban los sujetos eran inadecuadas al problema y a pesar de lo primitiva que algunas eran no había duda que las mismas no podían ser discutidas en términos de reacciones sin sentido, a ciegas, por ensayo y error. En otras palabras, encontró que en la solución de un problema difícil, cuyo camino a la solución no era gradual, no existen respuestas que no estén de algún modo influenciadas por el objetivo. En todos los casos, está presente lo que Duncker llama el “valor funcional” de la solución. La importancia de estos resultados radicará en proponer que inclusive problemas cuya resolución es por *insight* o comprensión repentina, había una dimensión heurística. Sin embargo, desarrollaré más adelante una evaluación exhaustiva de la propuesta de Duncker para explicar los procesos de

resolución de problema cuando aborde específicamente las diversas teorías de resolución de problemas. Por ahora me centraré sobre los presupuestos de esta definición aparentemente simple y que parece haber influenciado tanto las concepciones psicológicas y como las filosóficas de problemas.

La definición de Duncker dada más arriba, presenta ciertas características sobresalientes. En primer lugar, tal como lo señala S. Jacobs (2001: 232), la formulación de Duncker es consistente tanto con la posibilidad caminos bloqueados, como con ningún camino o múltiples caminos. En segundo lugar podemos decir que es una definición teleológica de problema; hay problema si hay objetivos futuros que tienen que ser alcanzados. Los objetivos planteados por Duncker son claros y transmisibles, diferenciándose en este sentido del modelo de problema de Polanyi. Este modelo será desarrollado en el segundo apartado de este capítulo, “Modelos filosóficos del concepto de problema”

Pero, lo que le ha dado una dimensión especial al trabajo de Duncker en la historia de la psicología es haber afirmado que la resolución de un problema está forzada y determinada por la situación del problema. En esto se diferencia de la tradición conductista y asociacionista imprimiéndole a la teoría de resolución de problema una dirección que como veremos influyó en las principales investigaciones futuras.

Para Duncker la dificultad de los problemas no tiene tanto que ver con el tamaño de búsqueda en un conjunto de soluciones posibles sino con remover ciertas preconcepciones que denomina, siguiendo a la Gestalt, “fijeza funcional”. En otras palabras, y para colocar esto de un modo que pueda compararse directamente con otros modelos de problema (por ejemplo, Popper), podemos decir que la abundancia en la producción de posibles soluciones no asegura necesariamente para Duncker resultados exitosos. Los resultados experimentales de la eliminación del tumor claramente muestran que hay pasos privilegiados

que llevan a la solución y que no dependen directamente de que quien resuelve el problema haya producido un gran número de soluciones alternativas.

La concepción de Duncker de problema tuvo influencia directa en la línea Newell y Simon de resolución de problema principalmente al haber establecido la estructura general de los problemas y su resolución. Sin embargo, como veremos posteriormente, difieren en los mecanismos que dan lugar a los procesos de resolución. En el modelo Newell-Simon la resolución de problema es búsqueda, mientras que en el de Duncker hay una secuencia de refinamientos luego que se establece la idea funcional. Esto hace que la resolución pueda ser vista más como elaboración e instanciación que como búsqueda combinatoria. (Newell, 1981: 17). Desde otra perspectiva también puede decirse que el valor funcional, la dimensión heurística en Duncker, surge a partir de situaciones perceptuales más que de simples combinaciones de la información inicial.

### *1.3. El concepto de problema en Gilhoolly*

Gilhoolly en *Human and Machine Problem Solving* señala que la definición de Duncker dada arriba puede expresarse de otro modo en el vocabulario de las ciencias cognitivas diciendo que “un problema existe cuando un sistema de procesamiento de información tiene una condición objetivo que no puede ser satisfecha sin un proceso de búsqueda” (Gilhoolly 1989: 1).

El valor que tiene esta definición para Gilhoolly radica en que es lo suficientemente amplia como para incluir tantos sistemas naturales de procesamiento de información (los organismos de Duncker) y computadoras bajo control de programas. Para Gilhoolly a esta redefinición de la noción de problema debería entenderse con la precaución de no considerar que siempre que haya una condición estamos ante un problema. Por ejemplo, si un método de solución puede

ser identificado y aplicado sin búsqueda, entonces no hay problema. Así, un adulto instruido no encuentra en “ $18/3=?$ ” un problema. Ni aún “ $18729/3=?$ ” De igual modo, un adecuado programa de computadora puede evaluar la expresión precedente sin un proceso de búsqueda. Pero a pesar de estos inconvenientes, no queda claro si con esta redefinición puede obtenerse un concepto más objetivo de problema.

#### ***1.4. El concepto de problema en Newell y Simon***

Podría considerarse que Allen Newell y Herbert Simon fueron los fundadores de la teoría clásica de resolución de problemas en psicología. Esta teoría prácticamente dominó la psicología cognitiva en los últimos 50 años. Varios pasajes de su obra definen lo que es un problema. Una definición bastante general la encontramos en la obra cumbre sobre este tema, *Human problem solving*,

Una persona está ante un problema cuando desea algo y no sabe inmediatamente que serie de acciones puede realizar para obtenerlo.

El objeto deseado puede ser muy tangible (una manzana) o abstracto (una prueba elegante de un problema).  
(Newell & Simon, 1972)

Newell y Simon en lugar de definir directamente lo que significa el término “problema” para un humano, organismo o mecanismo, parten de la suposición de que lo central es el hecho de que cierta información le es dada al resolutor de problema. La cuestión queda estructurada estableciendo, bajo qué condiciones y a través de qué medios (herramientas y operaciones) comenzando con la información inicial se puede acceder a la información del estado objetivo.

A partir de esta definición general, se agregan luego otras condiciones que establecen la estructura precisa de la misma. Esto claramente puede verse en el siguiente pasaje:

...El resolutor de problemas tiene una interpretación de esta información que le permite exactamente rotular alguna parte de la misma como objetivo y otras partes como condiciones colaterales. De este modo, si se ofrece una representación para esta información (en estructuras simbólicas), y se supone que la interpretación de esta estructura está implícita en el programa de resolución de problema entonces tenemos definido un problema. (Newell & Simon, 1972: 73)

Nótese la inclusión de la representación en la propia definición de lo que es un problema; hay problema si hay representación de tipo simbólica. Respecto a esto, Simon y Newell consideran que no hay necesidad de ofrecer una representación separada para cada problema particular, ofrecen dos tipos de representaciones que abarcan la mayoría de los problemas.

La primera es la representación conjuntística (o representación conjunto-predicado) de problema,

Dado un conjunto  $U$ , encontrar un miembro de un subconjunto de  $U$  teniendo ciertas propiedades específicas (llamada el conjunto-objetivo,  $G$ ) (Newell & Simon, 1972: 74)

En otras palabras, un problema conjunto-predicado consiste en entidades, de un subconjunto, que tiene una propiedad particular, un método para enumerar o nombrar las entidades, y algún método (u oráculo) que determine para cada entidad particular si tiene o no la propiedad en cuestión. La resolución de un problema para este tipo de problema consiste en encontrar una entidad en el conjunto que tenga tal propiedad.

Sin embargo debe advertirse que la simpleza de esta definición parece hacer trivial la noción de problema descripta, puesto que pareciera que podemos contar en principio con la solución y lo único que resta es chequearla. No obstante pueden darse tres circunstancias que muestran que a pesar de su simplicidad pueden surgir situaciones problemáticas:

a) el conjunto de posibles soluciones  $U$  puede ser muy grande.

b) La solución G puede estar dispersa en un amplio radio y rara vez la podemos encontrar al principio.

c) El costo de obtener cada nuevo elemento y testarlo puede ser muy alto. (Newell & Simon, 1972: 74)

El segundo tipo de representación incluido en la noción de problema es como búsqueda o representación por un autómata de estado finito. Este tipo de representación, considera una instancia de un problema como dado por un autómata finito cuyos arcos con etiqueta significan acciones disponibles al agente, sus nodos significan estados y su estado inicial representa estados iniciales del mundo en el que el resolutor de problemas está situado. (Glymour, Kelly & Spirtes, 1991: 107).

En estos casos el resolutor no tiene un modo directo de alcanzar la solución, y la representación depende de los sub-objetivos que va alcanzando durante el proceso de búsqueda.

### ***1.5. Reitman, conducta resolutora de problema versus problemas resueltos o a ser resueltos.***

A casi 30 años del libro *Cognition and Thought* (1965), Walter Reitman sigue siendo una cita obligada en todo trabajo sobre resolución de problema, principalmente cuando se trata de abordar los problemas mal definidos. El libro tiene la virtud de hacer una síntesis estructural de los trabajos realizados hasta el momento, señalando los aspectos principales que están en juego en una teoría general de resolución de problemas. En el capítulo específicamente dedicado al concepto de problema hace una serie de distinciones y llamadas de atención sobre lo que parecen ser confusiones comunes en la investigación de este tópico. La primera, es la que ya mencioné al principio de este capítulo, de que a pesar de los muchos trabajos sobre el tema no se cuenta con una definición adecuada de problema. Al igual que Dewey, señala

acertadamente que un concepto de problema debe ser lo suficientemente amplio como para abarcar todos los casos posibles y lo suficientemente preciso como para que la definición permita categorizar los distintos tipos de problema. Estas dos exigencias se harán mucho más complicadas cuando más adelante aborde el concepto de problema en el ámbito científico. La segunda advertencia, es que no debemos confundirnos en cuanto a la dirección de las investigaciones sobre el tema; gran parte del trabajo sobre resolución de problema se ha centrado más en la conducta de cómo se resuelven problemas y no en las características, tipos y estructuras de los problemas mismos. En otras palabras, las investigaciones psicológicas sobre problemas y como veremos también llegado el caso, las investigaciones histórico-filosóficas, presuponen que los problemas son cajas negras, sin estructuras claras que puedan diferenciar los unos de otros.

Para Reitman, dar un concepto de problema significa, en sentido amplio, abarcar casos que van desde buscar una referencia para una cita hasta problemas de cómo componer una obra musical o una pintura. A partir de estas consideraciones ensaya esta primera definición general e informal:

En un sentido decimos que un sistema tiene un problema cuando tiene o le ha sido dada una descripción de algo pero no tiene todavía algo que satisfaga esa descripción (Reitman, 1965: 126).

En esta definición Reitman cree encontrar un vehículo adecuado para ligar la estructura representacional y los modelos dinámicos de pensamiento humano.

En otras palabras, Reitman entiende que el concepto de problema tiene un significado dual, como proceso psicológico y como producto u objeto.

Agrega otros comentarios que vale la pena mencionar; en primer lugar advierte que es un modo de caracterizar esta noción que tiene la virtud de acercarse a la comprensión del sentido común y ser por ende

admitida sin inconveniente, pero que si se hace un análisis más explícito saltan a la vista varias dificultades. La primera es que intentar diferenciar problema de no-problema es muy difícil, por ej. patear una pelota es demasiado trivial para ser considerado un problema, sin embargo en algunas circunstancias puede ser una dificultad. La consecuencia de estos inconvenientes lleva finalmente a que tengamos que hablar de grados de problematicidad y no estrictamente de la diferencia entre problemas y no problemas.

Finalmente, luego de relacionar los conceptos de descripción, plan y problema, formula la siguiente definición:

Específicamente generamos un problema cuando asociamos con una descripción de lo que deseamos, el requisito de que sea encontrado, obtenido o creado un elemento que satisfaga la descripción. (Reitman, 1965: 128)

Esta definición debe ser entendida dentro del contexto en cual dada una regla o criterio definiendo algún conjunto, si la regla es satisfecha por algún elemento, entonces la regla es formalmente equivalente a una descripción del elemento. Esto le otorga un nuevo rol funcional a las mismas reglas que definen conceptos porque hace posible usarlas como criterio para resolver problemas.

Otro modo de definir problema es en relación al concepto de plan. Un plan es algún elemento  $x$  tal que  $P(x)$  es un conjunto (posiblemente no vacío) de elementos  $y, z$ , etc. cada uno de los cuales es una realización del plan  $x$  (Reitman, 1965: 128). Esta definición de plan deja a su vez abierta la posibilidad de que pensemos en definir algún elemento  $z$  para sistemas humanos y artificiales que sea miembro de  $P(x)$ . Bajo esta hipótesis,  $z$  sería una realización del plan  $x$ . A partir de aquí Reitman define a un problema asociando con  $x$  el requerimiento de que un elemento  $z$  sea encontrado, producido o creado siempre que se trate de un miembro de  $P(x)$ .

Reitman considera a su definición distinta de la vertida por Newell *et al.*, a pesar de estar ambas insertas en el paradigma de

procesamiento de información. La diferencia está en que estos autores limitan el uso del término “problema” a situaciones en la que

un resolutor de problemas desea algún resultado o estado de los hechos que no sabe como alcanzar. El núcleo de lo genuinamente problemático es el conocimiento imperfecto acerca de cómo proceder (Newell, Shaw & Simon, 1960: 257)

Para Reitman, no obstante lo intuitivo de esta definición, ella presenta dos dificultades importantes. La primera tiene que ver con que si basamos una definición en el “conocer los medios que producen la solución” entonces dado que no hay algoritmos que nos permitan saber cuándo podemos llegar efectivamente a una solución todo sería problemático. Lo único que nos quedaría desde esta perspectiva es hablar de grados de problematicidad.

La segunda dificultad es que la definición de Newell *et al* presupone que un sistema de procesamiento de información conoce o no conoce los medios que producen la solución, y un sistema de este tipo (que puede ser una computadora o un humano) no necesariamente tiene que ser consciente de los mismos. La pregunta entonces es qué se agrega con usar “conocer o no conocer” a la definición de problema y su resolución. La única salida es que la problematicidad se base en la presencia o no de variaciones no controladas sobre la solución final. Reitman ejemplifica esto diciendo que atarse los cordones los zapatos es un tipo distinto de problema que ganar al ajedrez, porque las variaciones en cualquier punto de la partida tienen fuertes consecuencias sobre el resultado final. En el caso de atarse los cordones, hay variaciones pero no afectan tanto el resultado final. Nótese que la definición de problema de Reitman, en cambio, no apela a conocimientos sobre reglas sino a la satisfacción de descripciones por elementos.

Finalmente, la definición propuesta por Reitman tiene la ventaja de brindarnos una mejor descripción de los tipos de problemas posibles. Comenzaré por la clasificación más importante para el ámbito científico. La distinción entre problema mal y bien definido.

Por problema bien definido entiende que para cada problema nos es dado algún modo sistemático de decidir cuándo una solución propuesta es aceptable.

La noción de problema bien definido no es problemática dentro de una estructura formal. Pero cuando se trata de problemas empíricos queda la duda si todo problema empírico puede clasificarse como bien o mal definido o, en general, si puede haber problemas empíricos que sean bien definidos. Para Reitman la distinción entre problemas formales y empíricos no es equivalente a la distinción entre problemas bien y mal definidos. Si bien es cierto que sólo los sistemas formales pueden garantizar indiferencia a todo salvo a un conjunto de fuentes de variación, hay también situaciones de tipo empírico que son bien definidas en un sentido práctico. Hay problemas, como por ejemplo armar un rompecabezas, que bajo ciertas circunstancias son claramente bien definidos. Mientras que, por ejemplo, el problema de elegir un empleado no es fácilmente definible. Las ciencias cognitivas han ofrecido una estructura general para tratar los problemas definidos pero no ocurrió lo mismo con los problemas mal definidos. Es una preocupación desde hace casi 40 años encontrar dicha estructura. Todavía no contamos con una estructura de este tipo, aunque merece destacarse la vigencia que tiene la primera aproximación al tema que nos ofrece Reitman. Señala que desde el punto de vista de la resolución de problemas no hay ningún tipo de contradicción en tratar problemas mal definidos con las estructuras y métodos de los problemas bien definidos. La explicación que da de esto es que

No hacerlo así es simplemente confundir la vaguedad, que es una parte intrínseca de nuestro tema, con una completamente innecesaria vaguedad teórica para analizarla (Reitman, 1965: 149).

En síntesis, cualquier abordaje a la distinción entre problemas bien definidos y mal definidos parece requerir de alguna idea de continuo y no de una separación tajante.

En muchos casos los problemas mal definidos requieren un acuerdo sobre una comunidad que de algún modo fija los referentes de los atributos del problema, las operaciones permitidas y las consecuencias de aquellas operaciones. La comunidad podría especificar si tales aspectos son o no ambiguos.

Atribuir el carácter de bien o mal definido no es una cuestión simple, un problema puede ser en algunos aspectos o partes bien definido y mal definido en otros, dependiendo del conjunto de restricciones abiertas de sus componentes.

Reitman también considera los casos de problemas mal definidos cuya aceptación depende de otras personas. En estos casos, es inevitable que la solución a un problema mal definido pueda contar como una aceptación universal, salvo que haya un isomorfismo de estructura e información de un individuo a otro.

### ***1.6. Conclusión sobre modelos psicológicos de la noción de problema***

A pesar de las diferencias entre los modelos anteriormente presentados y de los términos diferentes que emplean los autores expuestos, se puede señalar que los siguientes elementos son intrínsecos a cualquier definición de problema.

*Datos-* El problema tiene en un primer momento determinadas condiciones, objetos, trozos de información, etcétera, que están presentes al comienzo del trabajo en el problema.

*Objetivos-* El estado deseado o final del problema es el estado de alcanzar el o los objetivos, y el pensamiento deberá transformar el problema desde el estado inicial dado al estado final.

*Obstáculos-* El que piensa tiene a su disposición algunas vías para modificar el estado dado o el estado final del problema. Sin embargo, todavía no se sabe la respuesta correcta; es decir, la secuencia correcta de

comportamientos que resolverían el problema no es inmediatamente obvia.

En resumen, cualquier definición de “problema” debería contemplar los siguientes aspectos:

1. el problema está actualmente en un estado, pero

2. se desea que esté en otro estado, y

3. no hay una vía directa y obvia para realizar el cambio. Esta definición es lo suficientemente amplia como para incluir problemas pertenecientes a la geometría (Polya, 1945), al ajedrez (Newell & Simon, 1972) o a los acertijos (Reitman, 1965).

Las concepciones psicológicas de problemas derivadas de experimentos sobre resolución de problemas nos han dejado un conjunto de definiciones generales como para empezar a trabajar esta noción en el ámbito científico. Aunque dichas investigaciones están lejos de proveernos de una caracterización acabada, a través de este panorama sobresalen algunos aspectos, estructuras y objetivos que nos serán de utilidad en los capítulos que siguen. De todas las caracterizaciones aquí presentadas, estimo que la de Reitman es la más lograda, a pesar de que tal vez sus definiciones rebasen el ámbito psicológico. Su idea de problemas como descripciones con el agregado del requisito de que los elementos satisfagan las descripciones se eliminan los aspectos psicológicos del modelo de Newell *et al.* Sin embargo, vale la pena destacar que su definición desliga la noción de problemas de la de problemas bien definidos. Su definición es tan general que admite considerar como problemas cosas que en este momento no lo son, pero que bajo otras circunstancias podrían serlo. También es importante señalar que el objetivo es intentar una equivalencia entre descripciones y conceptos, donde el hecho de que las reglas puedan ser descripciones y soluciones, vincula a esta noción con la dinámica de los procesos de resolución. Esto es algo de lo que carecen otras definiciones, y es clave para entender su vigencia.

## 2. Modelos filosóficos de problema

A pesar de que científicos y filósofos hablan mucho acerca de la resolución de problemas, hay poco acuerdo acerca de lo qué es un problema, que tipos de problemas hay, y constituye una solución a un problema

(Laudan, 1996: 79)

### 2.1. Modelo popperiano de problema

Al igual que en Dewey, en Popper también encontramos que el conocimiento y específicamente la actividad científica está relacionada con la resolución de problemas. No obstante, a lo largo de su obra no es fácilmente discernible una conexión entre resolución de problemas y descubrimiento científico, o colocándolo en términos menos disonantes con su filosofía, entre la evaluación y comparación de teorías y la resolución de problemas.

Una de las dificultades que confunden aún más a la hora de realizar esta caracterización es que no hay una noción uniforme de problema a lo largo de su obra; hay claras diferencias en su concepción de los problemas filosóficos, científicos naturales y científicos sociales. Esta distinción entre problemas filosóficos y científicos es interesante, y no ha sido abordada profundamente en la literatura. Es la existencia de problemas filosóficos lo que lleva a Popper a negar que los mismos sean pseudoproblemas y a proponer otro criterio de demarcación basado en la resolución de problemas. No obstante, a pesar del rol heurístico que le otorga a las concepciones metafísicas y a los problemas conceptuales en general, no pesan para este autor en el seguimiento y abandono de una teoría. Colocado en términos de la clasificación de Laudan que presentaré posteriormente, la resolución de problemas conceptuales no juega un rol decisivo en su filosofía.

Con la defensa de la existencia de problemas filosóficos y metafísicos, Popper se aparta de la concepción empirista y positivista de

problema; admite que existen problemas que no dependen de una conexión directa entre observación y teoría. La filosofía tiene problemas auténticos y no seudoproblemas como sostuvo el positivismo lógico. La pregunta que uno se hace es cómo entonces logra distinguir entre problemas filosóficos y científicos. Popper resuelve esto ofreciendo una concepción objetiva de los problemas científicos basada en el grado de acuerdo que tienen los mismos. Es el acuerdo intersubjetivo lo que da la objetividad o grados de objetividad. En los primeros escritos la noción de problema científico está asociada casi exclusivamente a anomalías empíricas y la noción de problema no va a jugar un rol central debido al lugar que tenía la noción de falsabilidad como criterio de demarcación, un criterio que no es dependiente de la noción de problema.

Recién en *Objective Knowledge* (Popper, 1972) encontramos que la idea de la ciencia como resolución de problemas cobra toda su dimensión. Sin embargo, esto no implica que haya sido un aspecto omitido a lo largo de su obra anterior. Una interpretación de este cambio es dada por Koertge, quien sostiene que es solamente un cambio de énfasis que no marca diferencias sustanciales y contradictorias a lo anteriormente afirmado. En este sentido, tengo una interpretación diferente, aunque no niego que lo afirmado por Koertge sea correcto, esto es que no hay una visión de la ciencia a lo largo de toda la obra de Popper que no pueda ser vista como resolución de problemas. Pero, mis observaciones pasan por otro lado, creo que hay un cambio en la visión que tiene Popper respecto a los procesos que se dan en el contexto de descubrimiento. Se pasa de una versión gestáltica o romántica de creatividad en sus primeros escritos a una versión evolucionista en los últimos, de la intuición creadora en el sentido de Bergson, o la intuición apoyada en algo así como una introyección de los objetos de la experiencia en el sentido de Einstein, a una concepción campbelliana de variación ciega y retención selectiva. Es una cuestión a investigar si es la preeminencia del concepto de resolución de problemas el que lleva a un cambio en el modo de entender la concepción o generación de una teoría

o a la inversa, qué cambios en la psicología de la invención llevaron a maximizar la idea de que la ciencia es resolución de problemas.

Este nuevo modo de presentación no es inconsistente con las primeras ideas, pero el énfasis es diferente. En sus primeros escritos, el progreso fue caracterizado en términos de conjeturas sucesivas. Postula tres requisitos que deben cumplirse para decir que una teoría es mejor que su predecesora: debe estar basada sobre una nueva y simple idea unificante, debe explicar no sólo lo que la vieja teoría explicó sino también tener nuevas consecuencias empíricas, y debe ser capaz de pasar más pruebas que las viejas teorías (Popper, 1963: 241-42).

En *Objective Knowledge* y en *All Life Is Problem Solving* (Popper, 2001), últimas fases del pensamiento de Popper, los problemas ocupan el centro de la escena. Resume el crecimiento del conocimiento de la ciencia en el siguiente esquema: P1--->ST--->EE--->P2. (Siendo P1 el primer problema, ST la solución tentativa, EE la evidencia experimental y P2 el segundo problema). En esta última etapa, Popper sugiere que medimos el progreso comparando P2 con P1 en términos de la profundidad relativa del nuevo problema y aunque no hace un análisis del concepto de profundidad, intuitivamente sostiene que es el grado de abstracción, de ensayos y errores mentales lo que marca la profundidad de los problemas. Podríamos interpretarlo como una extrapolación del criterio de distinción entre problemas animales y problemas humanos. Cualquier ser vivo es resolutor de problemas, desde la ameba a Einstein. Distingue entre problemas animales y humanos, y entre humanos comunes y científicos. Los humanos se diferencian de los animales por la mediación de la conciencia, aunque los humanos también tienen y resuelven problemas no mediados por la conciencia.

Los problemas humanos se caracterizan por ser resueltos por ensayo y error a nivel mental. Los problemas humanos científicos se diferencian de los no científicos por el rol que juega la crítica, o más precisamente el método crítico, que obliga a pasar interminablemente de problemas a problemas. No es el proceso de invención creativa lo que

marca la diferencia entre el científico y el hombre común, ambos usan el método de ensayo y error más la eliminación de errores. Lo que los diferencia son las consideraciones para dar por resuelto un problema o para problematizarlo nuevamente.

La característica distintiva de la ciencia es la aplicación consciente del método crítico. En el estadio 3 de eliminación de error actuamos en un modo conscientemente crítico (Popper, 2001: 7).

La diferencia crucial entre desarrollo científico y precientífico está en la eliminación de soluciones propuestas. (Popper, 2001: 9)

Todo conocimiento precientífico, sea animal o humano, es dogmático... (Popper, 2001: 8)

La mediación de la conciencia podría hacer pensar que Popper ofrece una concepción subjetiva de problema. Los problemas son objetivos porque la mediación del lenguaje, requisito también necesario para la mediación consciente, los objetiviza y permite la crítica pública de las soluciones propuestas.

..la invención del método crítico presupone un lenguaje descriptivo humano en el que los argumentos críticos pueden tomar forma. (Popper, 2001: 8)

Pero esta objetividad parece entrar en colisión con sus argumentos respecto a si las máquinas pueden pensar o no. Para Popper:

Sólo con la vida tenemos problemas y los valores entran al mundo. No creo que las computadoras inventarán alguna vez problemas nuevos importantes, o nuevos valores. (Popper, 2001: 73)

La preeminencia de los problemas como comienzo y finalización de toda indagación llega al extremo en sus últimos trabajos al afirmar que la observación no existe sin un problema por detrás. La ciencia no comienza con observaciones sino con problemas que luego dan lugar a las mismas.

La vieja filosofía de la ciencia enseñaba, y todavía enseña, que el punto de comienzo de la ciencia es nuestra observación sensorial o el sentido de la percepción. Esto suena a primera vista razonable y persuasivo, pero está fundamentalmente equivocado. Uno puede fácilmente mostrar esto estableciendo la tesis: *sin un problema no hay observación*. (Popper, 2001: 6)

En síntesis, el concepto de Popper de problema muestra muchas facetas que dificultan su caracterización. Su posición extrema en lo que podríamos denominar una versión no heurística de los procesos creativos liga demasiado la definición de problema científico a un único método de resolución: ensayo y error y eliminación de errores. Es consciente que un modelo de este tipo, donde se vacía de poder heurístico a los procesos de resolución puede funcionar sólo presuponiendo la existencia de una generación muy abundante de soluciones alternativas. Precisamente es en este punto donde comienzan los argumentos de peso contra el modelo popperiano. El modelo clásico de resolución de problemas cree que esta presuposición no es compatible con las limitaciones computacionales del procesamiento humano.

También se podría arriesgar que el excesivo énfasis en el método de ensayo y error más eliminación de errores, opaca o desvaloriza el espectro metodológico de las disciplinas científicas. Es aquí donde se diferencian claramente Popper y Laudan, tal vez no podamos marcar claras diferencias en un concepto general de problema, pero los métodos de resolución admitidos permiten a Laudan hacer clasificaciones que no son factibles en el esquema de Popper. La clasificación de problemas de Laudan será desarrollada en el apartado 2.5 de este capítulo

Por último, no es fácil encuadrar al concepto de problema de Popper como psicológico o no psicológico. Koertge toma los pasajes de *Objective Knowledge* (Popper, 1972) para afirmar que a pesar de las distintas acepciones a lo largo de su obra, predominó siempre una concepción no psicológica de problema que se hizo más radical al final de su obra. Pero esto no tiene en cuenta los trabajos posteriores antes citados, donde la conciencia fuerza inevitablemente a una interpretación

en sentido contrario. Esto último se ve reforzado por su actitud frente a la resolución de problemas creativos por computadoras que mencioné más arriba.

## ***2.2. El concepto de problema en Polanyi: problema como desequilibrio funcional.***

Michael Polanyi trata específicamente la resolución de problemas en *Personal Knowledge*, y ofrece una concepción general de problema válida para cualquier tipo de animal. Dice en este sentido que,

un problema es una perplejidad, a su vez es un producto de los esfuerzos de cualquier animal despierto para retener el control de sí mismo y el medio circundante. Un animal está en problemas si su perplejidad dura algún tiempo y está claramente tratando de encontrar una solución a la situación que lo desconcierta (Polanyi, 1958: 120).

Es una definición general que remarca el sustrato biológico de todo problema, que incluye en la misma la necesidad de soluciones y en la que, al igual que en Dewey, el desconcierto juega un rol esencial.

A diferencia de Duncker, los aspectos emotivos son imprescindibles para la solución de problemas científicos creativos; identifica al genio en gran parte con la obsesión continua sobre los problemas. Dice en este sentido,

Un problema es un deseo intelectual (una cuasi necesidad en la terminología de K. Lewin) y como todo deseo postula la existencia de algo que puede satisfacerlo; en el caso de un problema lo que satisface es su solución. La obsesión con un problema es en realidad la causa de todo poder inventivo. (Polanyi, 1958: 127).

No obstante, conviene aclarar que a pesar de sostener una versión heurística de la ciencia, considera que no pueden resolverse creativamente problemas científicos siguiendo reglas definidas,

El carácter irreversible del descubrimiento sugiere que ninguna solución de un problema puede ser acreditada como un descubrimiento si es alcanzada por un procedimiento siguiendo reglas definidas (Polanyi, 1958: 123)

El obstáculo a sobreponer en resolver un problema es un “hueco lógico” y requiere un salto para hacerlo. Veremos posteriormente esta relación particular que Polanyi señala entre reglas y heurísticas cuando trate la concepción heurística del descubrimiento científico. Por ahora adelanto que es una forma de entender la noción de heurística más a la Polya que a la Newell y Simon.

En síntesis al igual que vimos anteriormente cuando analizamos el modelo popperiano de problema, Polanyi sostendría también que:

1. Todo proyecto de investigación científica está motivado por problemas
2. Todo experimento está dirigido a resolver problemas.
3. Todo descubrimiento científico resuelve problemas.

### ***2.3. Modelo de problema en Kuhn: la distinción entre problemas y enigmas (puzzles)***

El cuadro de la ciencia que propone Kuhn es una compleja mezcla de filosofía, historia y psicología que ha ido cambiando desde sus primeros trabajos. Esto hace un poco complejo determinar precisamente el significado que tiene cada uno de sus conceptos. El concepto de problema no escapa a esta dificultad, y como veremos más adelante cuando trate la obra de Laudan, es un concepto que puede dar lugar a ciertas versiones distintas de su teoría sobre el cambio científico.

En primer lugar Kuhn nos ofrece una visión de la ciencia y la filosofía centrada en la noción de problemas. Pero a diferencia de, por ejemplo, la posición popperiana, señala que hay categorías de problemas

que definen a su vez modos cualitativamente distintos de hacer ciencia. Concretamente afirma que existe una variedad de problemas a la que denomina “enigma”, que se da con exclusividad en períodos de ciencia normal. La palabra enigma tiene dos acepciones, una ligada a sorpresa y la otra a problemas que se sabe de antemano que tienen una solución. Es esta última acepción la que toma para describir los períodos de ciencia normal, donde se ha consolidado un paradigma y los científicos que trabajan en ese campo quedan limitados a solucionar variedades determinadas de enigmas.

Por lo tanto, para Kuhn, un enigma es un tipo de problema cuya solución es esperable, y no tiende a producir una novedad inesperada. Son problemas cuya motivación radica en ampliar y precisar los alcances del paradigma y que no está en duda el resultado sino el o los medios para lograrlos.

Desde una perspectiva más psicológica, dice acerca de los enigmas que

son, en el sentido absolutamente ordinario que empleamos aquí, aquella categoría especial de problemas que puede servir para poner a prueba el ingenio o la habilidad para resolverlos. Las ilustraciones del diccionario son “enigmas de cuadros en pedazos” y “enigmas de palabras cruzadas”, y éstas son las características que comparten con los problemas de la ciencia normal. (Kuhn, 1971: 70)

Más adelante vuelve de modo negativo a una definición objetiva de problema al caracterizarlo como problema cuya importancia no depende de algo interno al problema:

No es un criterio de la calidad de un enigma el que su resultado sea intrínsecamente interesante o importante. Por el contrario, los problemas verdaderamente apremiantes, como un remedio para el cáncer o el logro de una paz duradera, con frecuencia no son ningún enigma, en gran parte debido a que no pueden tener solución alguna (Kuhn, 1971: 70)

Inclusive acertijos simples pero que los hombres más ingeniosos no puedan resolver, no son enigmas para Kuhn. Da el siguiente ejemplo de esto,

Consideremos un rompecabezas cuyas piezas se seleccionan al azar de dos cajas diferentes de rompecabezas. Puesto que este problema tiene probabilidades de desafiar (aunque pudiera no hacerlo) incluso a los hombres más ingeniosos, no puede servir como prueba de habilidad para resolverlo. En el sentido normal de la palabra no es ningún enigma. Aunque el valor intrínseco no constituye un criterio para un enigma, sí lo es la existencia asegurada de una solución. (Kuhn, 1971: 70-71)

Un problema es científico para Kuhn si es seleccionado por el paradigma y todos los demás serán considerados como metafísicos, de otra disciplina o como demasiados problemáticos para justificar el empleo de tiempo en ellos. (Kuhn, 1971: 71)

Esta característica de los enigmas explica por qué la ciencia normal progresa tan rápidamente, “quienes la practican se concentran en problemas que sólo su propia falta de ingenio podría impedirles resolver” (Kuhn, 1971: 71).

Otro paralelismo entre problema y enigma residen en que para clasificarse como enigma “un problema debe caracterizarse por tener más de una solución asegurada” (Kuhn, 1971: 73). También los problemas de la ciencia normal son enigmas porque, como ocurre en muchos ejemplos de tales, “..debe haber reglas que limiten tanto la naturaleza de las soluciones aceptables como los pasos que es preciso dar para obtenerlas” (Kuhn, 1971: 73). Pero la idea de regla no debe asociarse totalmente al sentido que se le da a la misma en IA, reglas procedurales tipo algorítmicas. La noción de regla que se usa para caracterizar a un problema como enigma puede estar constituida también por compromisos ontológicos, conceptuales, instrumentales y metodológicos. No obstante hay, que aclarar, que puede haber guía en la investigación normal sin reglas, mediante el uso del propio paradigma.

Los enigmas pueden ser clasificados en tres grupos diferentes según:

- a) La determinación de los hechos significantes.
- b) La confrontación de una teoría con los hechos
- c) La articulación de una teoría.

Si comparamos la noción de enigma de Kuhn con la caracterización popperiana de problema notamos algunas diferencias importantes. Para Kuhn la misma definición de enigmas está ligada a la posibilidad de encontrar una solución. Para Popper ni siquiera en lo que Kuhn denomina ciencia normal puede aceptarse de antemano que un problema pueda ser resuelto de modo definitivo. Para Popper no hay problemas que estén limitados por paradigmas y que generen una actividad no crítica de resolución de problema.

Por otro lado, es importante tener en cuenta que el valor de los enigmas kuhnianos no es intrínseco a los mismos, no es un criterio de calidad de un enigma el que su resultado sea interesante o importante.

Como veremos más adelante, esta característica de la concepción kuhniana de problema contrasta con el modelo de problema de Nickles (apartado 2.7 de este capítulo), un modelo de problema que intenta retener esta característica como algo propio del mismo problema.

Desde un punto de vista más general, el concepto de enigma de Kuhn no supone perplejidad o asombro como lo hace el concepto de problema de Dewey. Su uso es más bien opuesto a éste. Como se indicó más arriba, toma el significado de enigma como ligado a que de antemano se sabe que se tiene una solución. No obstante, no descarta que un científico normal puede sorprenderse o quedar perplejo ante un enigma, lo hace pero dentro de un ámbito muy limitado, no por abrir nuevos territorios o poner a prueba creencias establecidas.

Una cuestión central para nuestra definición general de problema es la distinción entre caracterizaciones psicológicas y objetivas. En este sentido, se puede pensar que Kuhn, al asociar el concepto de enigma a un

test de la ingenuidad del investigador y no a la verdad de lo obtenido, relega dicha noción exclusivamente al campo psicológico. Interpretaciones actuales de la obra de Kuhn siguen direcciones opuestas. Por un lado, por ejemplo, N. Koertge, cree que es posible despsicologizar la concepción kuhniana de problema y propone como contrapartida a esto que: a) los problemas tienen estructura interna y hay muchas restricciones internas sobre el conjunto de soluciones aceptables, b) dentro de lo que podríamos denominar contexto de plausibilidad, los científicos seleccionan problemas de investigación, no sólo teniendo en cuenta beneficios cognitivos sino también evaluando la probabilidad de que el problema pueda ser solucionado.

Los enigmas surgen dentro de lo que Kuhn denomina matriz disciplinar, un marco que determina el tipo de fenómeno que se explicará o clasificará. Los problemas no enigmáticos e importantes tienen lugar en la historia de la ciencia pero son relativamente raros y extendidos en el tiempo (Kuhn, 1977: 227).

Nersessian (2002) propone no abandonar una perspectiva psicológica del trabajo de Kuhn, de algún modo disuelta en sus últimas publicaciones más representativas, y usar resultados actuales de la psicología cognitiva para explicar o reinterpretar aspectos ligados al cambio conceptual. Si bien una lectura superficial de la obra de Nersessian sugiere que en principio ella no está directamente relacionada con la definición de problema, esto no es así. Por ejemplo, la idea de modelos mentales que usa Nersessian, daría una noción de problema independiente de una formulación puramente lingüística del mismo. Para Nersessian, la idea de modelos mentales e inferencias ligados a los mismos sería una buena forma de justificar la idea de prácticas científicas, según su opinión uno de los principales legados de la obra de Kuhn.

Otro aspecto relacionado al concepto de problema en Kuhn, es el rol de las anomalías o discrepancias de la teoría con los experimentos. Las anomalías en determinadas circunstancias pueden generar una

revisión general y dar lugar a una búsqueda de nuevos fenómenos cualitativos. Las anomalías pueden ser ignoradas, pero los intentos repetidos de tratar de solucionarlas pueden llevar a una crisis que luego desemboque en una revolución.

#### ***2.4. Problemas como interrogantes***

Una alternativa que parece ineludible en una mirada filosófica sobre el concepto de problema es relacionarlo con el concepto de interrogación. Por ejemplo, Belnap y Steel (1976) definen a una interrogación como un conjunto de respuestas admisibles más la demanda de una respuesta que satisfaga ciertas condiciones de número, claridad y completitud. La relación entre preguntas y respuesta en esta lógica supone que el conocimiento de una interrogación es el conocimiento de uno o más atributos de sus posibles respuestas.

Kleiner, uno de los filósofos del descubrimiento que más trabajó en lógicas interrogativas (Kleiner, 1993), al referirse a la versión Hintikka-Aqvist, dice que si bien captura varias características importantes de las interrogaciones científicas no ilumina demasiado los contextos actuales de investigación. Sólo ofrecen condiciones abstractas para permitir y prohibir interrogaciones y para comparar condiciones epistémicas ante interrogaciones y respuestas.

No puede encontrarse en los estudios abstractos de las lógicas erotéticas las complejidades de atribuir interrogaciones a individuos o comunidades, distinguiendo aquellas con respuestas disponibles a partir del conocimiento establecido en las comunidades, de situaciones en las que las interrogaciones indican deficiencias en el conocimiento de las comunidades. (Kleiner, 1993: 124)

Por otra parte, la lógica interrogativa no nos dice nada acerca de lo que es conocer una respuesta a interrogaciones, aunque en realidad tales condiciones podrían estar implícitas en el conocimiento de una interrogación. Condiciones para un conocimiento de tipo, como la

identificación de conceptos o de especies, deben lograrse mediante análisis filosófico de varios conceptos, tales como número, político, etc.

Pero, en líneas generales, la concepción de problema de los lógicos interrogativos no difiere en su estructura central de los autores expuestos anteriormente,}; es una concepción de problema explícitamente teleológica. Kleiner (1993: 183) sostiene además que la concepción de problema de Newell y Simon está embebida en una teoría de la indagación. Las lógicas interrogativas no tienen vinculación con una teoría de la indagación.

Otra diferencia entre interrogación y problema tal como lo definen Newell y Simon, es que en la lógica interrogativa no es necesario que el interrogador no conozca la respuesta a la pregunta, ni que la respuesta sea difícil de encontrar. Si bien es cierto que en el modelo de Newell y Simon se conoce el objetivo desde el inicio, no se conoce el camino que lleva al objetivo. Esto último hace problemático cualquier intento de asociar interrogaciones y problemas, a menos que se la incluya como parte de la definición de lo que es una interrogación.

La ventaja de tal asociación no sería trivial, nos solucionaría la disputa que estamos mostrando entre concepción psicológica y objetiva de problema. Pero considero que estos arreglos que son necesarios para lograr tal identificación diluyen posteriormente sus beneficios. Transformarían en psicológicas tales lógicas si es que pudiera de algún modo lograrse tal empresa.

### ***2.5. La concepción de problema en Laudan***

El valor de los trabajos de Laudan es que nos ofrece una epistemología basada explícita y sistemáticamente en la noción de problema, con una minuciosa clasificación de los distintos tipos de problemas. Propone, apartándose de la concepción positivista o empirista de problema, la existencia de problemas conceptuales que cumplen un rol importante en la evaluación de teorías. Desplaza las nociones de verdad,

corroboración y confirmación, importantes para la teoría clásica de la evaluación de teorías, y privilegia la de resolución de problemas. No obstante su intento explícito de apartarse del positivismo, hereda con algunos matices una posición contraria a un tratamiento filosófico del descubrimiento científico. Laudan sostiene en *Why Was the Logic of Discovery Abandoned?* (1978) que históricamente sólo fue posible contar con una lógica del descubrimiento o un tratamiento epistemológico del descubrimiento cuando el método científico imperante era el inductivo. Esto no significa que niegue la existencia de métodos generativos, sólo significa que los mismos poseen un valor metodológico pero no epistemológico. La determinación de su confiabilidad es *a posteriori*, sólo posible una vez que fueron de algún modo justificados. Volveremos más adelante sobre estos aspectos cruciales en torno a lo que podríamos llamar la discusión clásica sobre la o las lógicas del descubrimiento. Por ahora mi interés está en determinar cuál es el concepto de problema que emplea Laudan en su concepción del progreso científico.

En primer lugar, Laudan reconoce en sus últimos trabajos que:

A pesar de la discusión imperante sobre resolución de problemas entre científicos y filósofos, hay poco acuerdo en lo que constituye un problema, qué clases de problemas existen y lo que constituye una solución a un problema. (Laudan, 1996: 79).

Sin embargo, no hace un avance en la definición de problema. Nuevamente, como en *Progress and its problems: toward a theory of scientific growth* (1977), sólo propone una clasificación de los tipos de problemas que tienen relevancia para la evaluación de teorías. No obstante, trataré de determinar si tras estas clasificaciones puede extraerse algún concepto implícito de problema que nos permita compararlo con los otros propuestos en esta sección.

Laudan propone distinguir entre problemas empíricos y problemas conceptuales. Los problemas empíricos son problemas que dependen de teorías, pero que suponemos que son problemas acerca del dominio de la ciencia, acerca del mundo real (Laudan, 1977: 15). A

diferencia de Popper, no intenta delinear un concepto objetivo de problema; un problema no necesita precisamente describir un estado real de los hechos para ser un problema: todo lo que se requiere es que para un agente sea un problema real. (Laudan, 1977: 16)

Pero no todo problema empírico es resultado de una conexión entre la teoría y el mundo real tal cual lo concibe el sujeto. Para considerar que algo es un problema empírico, debemos sentir que *hay un premio en la solución*. (Laudan, 1977: 17)

Los problemas empíricos a su vez se clasifican en:

a) *Problemas potenciales*: aquellos que tratan sobre lo que ocurre en el mundo pero aún no tenemos una explicación acerca de ello.

b) *Problemas resueltos o reales*: aquellos que han sido resueltos por una u otra teoría.

c) *Problemas anómalos*: aquellos problemas que han sido resueltos por una teoría rival.

Los problemas conceptuales son aquellos que surgen para una teoría T en cualquiera de las siguientes circunstancias:

1. Cuando T es internamente inconsistente o los mecanismos teóricos que postula son ambiguos.
2. Cuando T hace suposiciones sobre el mundo que van contra otra teoría o suposiciones metafísicas prevalecientes, o cuando T hace afirmaciones acerca del mundo que no pueden ser garantizadas por las doctrinas metodológicas y epistémicas prevalecientes.
3. Cuando T viola principios de la tradición de investigación de la cual es parte (a ser discutida abajo)
4. Cuando T fracasa en la utilización de conceptos de otras teorías más generales a las cuales debe estar lógicamente subordinada. (Laudan, 1996: 79)

De acuerdo al modelo de resolución de problemas, es tan constitutiva del progreso la eliminación de dificultades conceptuales como la eliminación de dificultades empíricas. El modelo de Laudan admite que uno se puede pasar de una teoría bien apoyada empíricamente a una teoría menos apoyada empíricamente al resolver esta última importantes dificultades conceptuales.

Una teoría resuelve problemas empíricos cuando implica, junto con los límites de las condiciones iniciales y finales, una enunciación del problema. Una teoría resuelve o elimina un problema conceptual cuando no puede exhibir una dificultad conceptual de su predecesora. (Laudan, 1996: 81)

En lo que sigue presentaré las críticas más importantes que pueden hacerse al modelo Laudan:

a) En primer lugar, como ya decía al comienzo, no da una definición explícita de problema. Aunque a partir de su caracterización de resolución de problema se puede decir que un problema es una especie de hueco lógico, no hay conexiones formales entre el enunciado del problema y su solución. Así, hay enunciados que no están conectados por implicaciones, aunque hay interrogantes que surgen de la teoría que llaman a buscar tal conexión.

b) Una crítica interesante pertenece a Nickles, quien piensa que, a diferencia de su modelo de problema, el de Laudan es insuficientemente heurístico. La resolución de problemas de Laudan no puede dar cuenta de la evaluación heurística.

c) Concepción metodológica supuesta en el modelo de Laudan resulta demasiado diluida. La necesidad de ofrecer una concepción metodológica general, el reconocimiento de la variabilidad de los métodos en la historia de la ciencia, junto con el deseo de sostener una concepción no relativista de la elección y cambios de teorías lleva a Laudan a una versión metodológica demasiado general. Koertge cita este pasaje de Laudan como ejemplo, "...se puede considerar que cualquier teoría T está resolviendo un problema empírico, si T funciona

significativamente como algún esquema de inferencia cuya conclusión es un enunciado del problema” (Laudan, 1977: 25). Esta definición tan general, lleva inclusive a que las contradicciones puedan ser consideradas una resolución. Para evitar esto no queda otra alternativa que agregar estándares que limiten la posibilidad de que cualquier cosa pueda ser considerada una solución. Una teoría T ha solucionado un problema empírico si además de funcionar en un esquema de inferencia cuya conclusión es un enunciado del problema, responde a estándares tales como aumentar la precisión de los resultados experimentales. Pero existe otro modo de ver la metodología general o meta-metodología de Laudan. Kevin Kelly en *Naturalism Logicized* (2000) considera que Laudan opta por un fundacionalismo metodológico en el que un simple y no objetable método es usado para justificar reglas más sofisticadas, que a su vez son usadas para justificar reglas todavía más sofisticadas y así sucesivamente. La regla que elige Laudan es algo como la maximización (metodológica) de la utilidad con respecto a chances objetivas de éxito estimado usando la regla directa de la inducción.

(R1) Si las acciones de una clase particular, *m*, han consistentemente promovido fines cognitivos, *e*, en el pasado, y acciones rivales, *n*, no han logrado promover tales fines, entonces suponemos que futuras acciones siguiendo la regla “si su objetivo es *e*, debe hacerse *m*” más probablemente promuevan aquellos fines que acciones basadas sobre la regla “si su objetivo es *e*, debe hacer *n*” (Laudan, 1996: 135).

La justificación en última instancia de los métodos complejos sobre el método medio-fin da lugar a su vez a una serie de objeciones que indirectamente tienen relación con nuestro objetivo de lograr una definición de problema. Por un lado, si bien esta justificación funciona para fines inmediatos, queda huérfana de fines a largo plazo. Por otra parte, la determinación de qué medio es apropiado para un fin determinado queda limitada en Laudan al análisis histórico de la correlación entre métodos y fines logrados. A los fines de no desviarnos del objetivo de esta parte, no evaluaré por ahora esta última afirmación

que considero central para una teoría del descubrimiento basado en la noción de problema. Presento de modo general esta idea ahora para mostrar que el concepto de problema en Laudan carece de estructura interna; es una caja negra que se evalúa externamente solamente por los éxitos obtenidos.

## ***2.6. Problema como inconsistencia lógica con estructura histórica en Hattiangadi***

Jagdish Hattiangadi expone su concepción de problema en dos trabajos. *The Structure of Problems (Part I)* (Hattiangadi, 1978) donde analiza la noción de problema desde el punto de vista lógico y en *The Structure of Problems (Part II)* (Hattiangadi, 1979) donde hace una conceptualización de la noción de problema desde el punto de vista histórico. Abordaré estas dos perspectivas separadamente para luego hacer algunas consideraciones finales acerca de los comentarios críticos que se han realizado a este particular análisis de la noción de problema.

### ***a) Concepción de problema desde el punto de vista lógico***

El eje central de la concepción de Hattiangadi pasa por las particularidades del modo en que los científicos eligen algunos problemas, en cómo señalan problemas importantes mientras ignoran el resto. En primer lugar, su concepción de lo que es un problema está esencialmente ligada a la idea de dificultades, y las interrogaciones no necesariamente involucran dificultades. Por ejemplo, las preguntas que un abogado hace a un testigo cuya respuesta ya sabe. En segundo lugar, para Hattiangadi, la lógica interrogativa es irrelevante a la teoría del conocimiento.

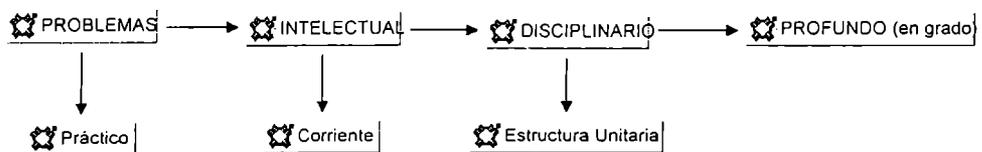
El eje central de la concepción pasa por las particularidades en el modo en que los científicos eligen algunos problemas, en cómo señalan problemas importantes mientras ignoran el resto. En otras palabras, es en

la elección de problemas donde cree que uno puede encontrar los ingredientes esenciales para caracterizar la noción de problema científico y describir posteriormente su estructura. Así, plantea las aproximaciones tradicionales a esta elección; los problemas científicos son elegidos en base a los problemas metafísicos del período en cuestión.

Sin embargo, considera que en general la motivación para construir una concepción de la ciencia como resolución de problemas está en que la estructura de los problemas es el germen de una nueva epistemología, un modo de reformular o de reinterpretar la noción de ‘aproximación’ y evaluación. Esta situación genera serias limitaciones para la aplicación de concepciones filosóficas de problemas al descubrimiento científico.

Volviendo ahora específicamente a la estructura lógica de los problemas, según Hattiangadi, la primera característica general es que los problemas deben ser entendidos en términos de objetivos, “Un problema es un obstáculo que debe ser superado en orden a alcanzar un objetivo” (Hattiangadi, 1978: 347). Una solución, por otra parte, es “superar el problema para llegar al objetivo, o cerca del objetivo o aún hacer posible llegar al próximo obstáculo hacia el objetivo” (Hattiangadi, 1978: 347).

Pero si bien todos los problemas se acercan más o menos explícitamente a la definición de arriba, hay claras diferencias entre los distintos tipos de problemas. Hattiangadi comienza con esta clasificación que luego la irá refinando



La estructura lógica de los problemas que propone Hattiangadi está dirigida a la estructura de los problemas intelectuales y tiene como objetivo dar cuenta de dos aspectos de los mismos que para él merecen

especial consideración. El primero, es la existencia de descubrimientos simultáneos y múltiples, el segundo es el “Problema Fundamental de la Epistemología” o paradoja de Menón. Según esta paradoja o bien conocemos las respuestas que buscamos o bien no las conocemos; si las conocemos no tiene sentido la investigación, y si no las conocemos tampoco tiene sentido la investigación porque no las reconoceríamos aunque nos encontráramos con ellas accidentalmente.

A las preguntas de ¿ debemos buscar conocimiento si a una creencia falsa le sigue otra creencia falsa? y ¿Si no sabemos lo que buscamos, entonces como es que a veces nos enfrentamos a alguna hipótesis y decimos, Ah, ésta es? Hattiangadi cree que puede responderse concentrándose en la noción de problema.

1) Buscamos conocimiento no simplemente porque nos gusta hacerlo sino que *buscamos porque debemos hacerlo con el objetivo de solucionar problemas que surgen en nuestras creencias.* (Hattiangadi, 1978: 351)

2) y cuando alcanzamos lo que queremos, sabemos que esto es aquello que luchamos por conseguir porque, soluciona nuestro problema. Esto da lugar a otros dos problemas:

a) ¿Por qué debe un problema ser solucionado?

b) ¿Cómo un problema señala los desideratas de una buena solución?

La estructura de problema que propone Hattiangadi tiene como objetivo mostrar que la resolución de problemas intelectuales es racional y que a su vez puede explicar los casos de descubrimiento simultáneo y múltiple.

La respuesta a esta pregunta gira en torno a considerar los problemas intelectuales como inconsistencias lógicas. “Debemos buscar una solución a un problema porque un problema es una inconsistencia lógica” (Hattiangadi, 1978: 352).

Una inconsistencia lógica destruye la efectividad de nuestro sistema de creencias debido a que a partir un conjunto de enunciados lógicamente inconsistente cualquier enunciado puede derivarse.

Una forma de evitar esto es ignorar los enunciados que generan las inconsistencias o directamente hacer compartimentos estancos con nuestras creencias de modo que no entren en inconsistencias. El problema de esta última salida es que nunca podremos usar nuestras creencias para derivar conclusiones ingeniosas. Cuando un sistema de creencias entra en conflicto cualquier enunciado puede derivarse, con lo cual, la derivación de consecuencias prácticas a partir de la misma puede ser contradictoria. Esta relación entre problemas intelectuales y consecuencias prácticas lo lleva a Hattiangadi a sostener que los problemas intelectuales son en ciertos sentido problemas prácticos, su única diferencia es que en lugar de remover obstáculos para alcanzar objetivos específicos, “la actividad intelectual remueve impedimentos a actividades dirigidas a objetivos en general” (Hattiangadi, 1978: 353).

Acá Hattiangadi se encuentra con este dilema, si aceptamos que para lograr objetivos debemos remover obstáculos, obviamente una dificultad a remover son las inconsistencias lógicas pero inevitablemente nos surge la pregunta ¿Deben todos los problemas ser inconsistencias lógicas?. La dificultad que surge es que si los problemas son inconsistencias lógicas, entonces las preguntas también deberían serlo. Pero las interrogaciones no pueden ser inconsistencias lógicas. La salida que propone Hattiangadi es separar las interrogaciones de los problemas. La ventaja de esta salida es que permite tratar la noción de problema como inconsistencias lógicas eliminando el psicologismo de la definición.

*b) Dificultades de los problemas intelectuales como inconsistencias lógicas*

Para Hattiangadi, los problemas metodológicos no pueden ser entendidos solamente como inconsistencias lógicas; tienen también estructura histórica. Esto será desarrollado a través del siguiente conjunto de tesis:

Tesis 1: Todo problema (intelectual) de una perspectiva acerca del mundo es una inconsistencia lógica en el conjunto de todos los enunciados de aquel punto de vista (Hattiangadi, 1978: 355). Las refutaciones no contradicen esta tesis porque una refutación es una inconsistencia entre los enunciados del conjunto de creencias y el enunciado refutante.

Pero esta tesis entra en conflicto con ejemplos como el siguiente: “la existencia de estrellas que estallan fue un problema para la teoría de los cielos inalterables de Aristóteles, pero no lo fue para la de Newton” (Hattiangadi, 1978: 356). Esto pone en duda la tesis 1 porque si los problemas surgen de inconsistencias entonces no podemos decir que ante este mismo problema las ideas Newtonianas son mejores que la Aristotélica. Para superar esta dificultad se propone la tesis siguiente.

Tesis 2: Un problema es no sólo un conjunto de creencias inconsistentes, sino *un conjunto de creencias inconsistentes con el conjunto de todas las soluciones* (Hattiangadi, 1978: 357). Pero esta tesis no da cuenta de lo que son las soluciones, razón por la cual se presenta la siguiente tesis.

Tesis 3: afirma que “se obtiene una solución mediante un cambio forzado en el conjunto de enunciados problemáticos produciendo una nueva teoría consistente” (Hattiangadi, 1978: 357).

El problema que genera esta tercera tesis es que tal definición de solución o resolución de problema es una trivialidad. La siguiente tesis intenta resolver este problema.

Tesis 4: “una solución a un problema no debe sólo ser consistente, debe tener al menos tanto poder explicativo como la teoría propuesta del conjunto de enunciados problemáticos” (Hattiangadi, 1978: 358).

Se pasa de la tesis 4 a la tesis 5 debido a la necesidad de restringir la solución a un subconjunto consistente con poder explicativo, esto elimina la posibilidad de que una solución sea inmediatamente una generadora de inconsistencias.

Tesis 5: “el pretendido poder explicativo de un conjunto problemático de enunciados A es un conjunto consistente B tal que todo miembro de B se cree o considera como un candidato razonable a la verdad” (Hattiangadi, 1978: 358).

El problema que genera a su vez esta quinta modificación es que cualquier conjunto de tautologías puede satisfacer el criterio de “poder explicativo”

Esto lo soluciona Hattiangadi con la Condición de Maximalidad: Un conjunto de enunciados A es el poder explicativo de algún problema si (a) A satisface la condición de la tesis cinco y (b) para cualquier enunciado B, si B satisface las condiciones, entonces A es o bien deductivamente equivalente con B, o alguna consecuencia de A no es una consecuencia de B. (Hattiangadi, 1978: 359). Se apuntala la tesis cinco con el requerimiento de que *todo poder explicativo que pueda ser capturado debe ser capturado por una buena solución*.

Corolario a la Tesis 5: Para algunos conjuntos de enunciados problemáticos existen más de un conjunto maximal que son no equivalentes y cada uno de los cuales podría satisfacer la condición de la tesis quinta.

La importancia de este corolario es que un problema podría no tener soluciones alternativas, pero podría tener conjuntos alternativos de desideratas para seleccionar soluciones (Hattiangadi, 1978: 359).

Otra dificultad que se presenta al último mejoramiento es que podrían suceder casos de resolución de problemas en los que el conjunto

de enunciados problemáticos no es reemplazado por un conjunto consistente, sino por un conjunto no consistente. La próxima modificación intenta solucionar este problema.

Tesis 6: Un problema podría también ser solucionado por un conjunto inconsistente de enunciados, si el problema no surge nuevamente en la solución (Hattiangadi, 1978: 362).

Pero esto no excluye que la solución propuesta lo sea en modo trivial. Así queda abierta la posibilidad que se deje al problema sin cambios. Esto lo soluciona Hattiangadi a través de la siguiente tesis.

Tesis 7: Dos problemas P, Q son esencialmente o básicamente lo mismo, si y sólo si hay un problema R, que surge en la intersección teórica-conjuntística del conjunto de creencias problemáticas de P, Q, cuya clase de soluciones incluye todas las soluciones para P y para Q. (Hattiangadi, 1978: 362).

La lógica interrogativa no puede, para Hattiangadi, producir la identidad básica entre problemas con soluciones diversas. La explicación que brinda es que la relación de identidad no es sólo lógica, es una identidad pragmática y contextual. En diferentes contextos intelectuales las mismas preguntas podrían ser diferentes si cada una fue propuesta por una razón diferente. (Hattiangadi, 1978: 364).

Con esto concluye el análisis lógico de problema, mostrando fundamentalmente la irrelevancia de la lógica interrogativa para la teoría de problemas y que la estructura lógica que propone para caracterizar los problemas intelectuales absorbe la distinción entre interrogaciones intrigantes y no intrigantes, pero de un modo que muestra que la utilidad de la aproximación formal a problemas es muy limitada. En otras palabras que no hace falta y es más bien confuso recurrir a una lógica interrogativa para captar la noción de problema intelectual.

*c) La estructura histórica de los problemas*

En *The Structure of Problems, (Part II)* (1979) Hattiangadi comienza reconociendo la dificultad que presentan ciertos problemas científicos, a los cuales encuentra fuertemente dependientes de cómo son formuladas las teorías.

Esta dependencia tiene como consecuencia que no es suficiente entender a los problemas como inconsistencias lógicas para dar cuenta del número y la identidad de los mismos. Inclusive algo más fuerte aún, la estructura lógica de inconsistencia, propuesta en la sección anterior puede llegar a juzgar como un mismo problema a dos problemas distintos.

Por otra parte, usando solamente la lógica, no podemos racionalmente calificar como profundos algunos problemas con respecto a otros.

Hattiangadi sostiene que estas son consecuencias no deseables para una teoría de problemas y que pueden evitarse incorporando la estructura histórica de los problemas. Esto lo logró luego de abandonar la distinción popperiana entre problema y su situación o situación problema. Como veremos posteriormente es el punto de partida que luego toma Nickles para elaborar su modelo inclusión-restricción de problema. La estrategia de Hattiangadi que luego Nickles reproduce, diría casi textualmente, consiste en mostrar que no sólo no es incompatible la estructura lógica de problema como inconsistencia con una estructura histórica del problema, sino también que esto último puede abarcar a los problemas de estructura profunda, cuya metodología no puede ser entendida en términos tradicionales (como inconsistencias lógicas).

Para lograr esto, propone dos tesis:

Tesis i: La vasta mayoría de los problemas que encontramos no tienen más estructura que la estructura lógica vista más arriba, y estos

simples problemas son resueltos teniendo en cuenta la conveniencia. Tienen la estructura mínima que puede tener cualquier problema.

Tesis ii: Sólo unos pocos problemas tienen mayor estructura que el promedio. Estos son los problemas ‘profundos’, cuya metodología no puede ser caracterizada en términos convencionales. *La estructura de los problemas profundos está ligada a una historia de los debates tácitos* (Hattiangadi, 1979: 50)

Pero, ¿cómo sabemos que algunos problemas tienen estructura profunda y otros no? Hattiangadi considera que algunos problemas que yacen en disciplinas que tienen la crítica institucionalizada tienen por esta razón estructura profunda, dado que de otro modo dicha actividad no podría haberse realizado. En otras palabras la actividad crítica es posible porque “*los problemas intelectuales en esos contextos tienen una estructura más compleja*” (Hattiangadi, 1979: 52)

Una dificultad planteada por Koertge (2003) al modelo de Hattiangadi es que no siempre el científico está eliminando inconsistencias. La actividad científica puede estar dirigida también a llenar espacios vacíos dejados por un paradigma o búsqueda de la verdad, verosimilitud o algún otro tipo de objetivo positivo.

### ***2.7. La concepción de problema de Nickles: el modelo inclusión-restricción***

Siguiendo la estructura planteada por Hattiangadi en términos de la necesidad de contar tanto con una estructura lógica como con una histórica para definir los problemas científicos, Nickles propone una conceptualización de problema a través de una lista de condiciones que nos ha dejado la filosofía de la ciencia post Kuhn. Comenzaré describiendo brevemente esta lista para después focalizarme sobre el proyecto subyacente a su trabajo, elaborar un concepto no positivista o no empirista de problema que sea funcional a una perspectiva de la

ciencia como resolución de problema al estilo Laudan. El inconveniente para lograr este objetivo es que no hay solamente un modo de definir post-positivísticamente un problema. Podemos hacerlo ya sea negando que las relaciones de verificación y refutación entre lenguaje científico y observaciones sean las únicas fuentes de generación de problema o mediante un giro histórico o cognitivo. Si bien es cierto que estas perspectivas no necesariamente son mutuamente excluyentes, muchas veces, como creo es el caso de Laudan y Nickles, siguen arrastrando resabios positivistas al resistirse a aceptar ciertas dimensiones del concepto de problema. En algún nivel, por ejemplo, ambos siguen atados a la división de contextos cuando se trata de caracterizar las actividades o productos marcadamente creativos. La relación filosofía de la ciencia-historia de la ciencia ha sido aceptada por los filósofos pero no así la relación filosofía de la ciencia-psicología de la ciencia. En otros temas tal vez este cortocircuito no ofrezca mayores problemas, pero no sucede lo mismo cuando tenemos que abordar los concepto de problema y de resolución de problema.

Primero presentaré la definición de problema como inclusión de restricciones, en segundo lugar expondré sintéticamente los requisitos que Nickles propone para una concepción de problema, luego marcaré algunos defectos que encuentro en su concepción para finalmente justificar la afirmación que anteriormente hice, que su concepto de problema lleva a una concepción positivista de problema al dejar la resolución creativa de problemas nuevamente en un contexto separado.

Para Nickles en *What is a problem that we may solve it?* un problema consiste en "...todas las condiciones o restricciones sobre la solución más el requisito de que sea encontrada la solución (un objeto satisfaciendo las restricciones). Las restricciones caracterizan-en un sentido describen-la búsqueda de la solución" (1981: 109)

Ante la posible crítica de incluir todo en un problema y en definitiva no decir nada sobre el mismo que lo individualice respecto a otras nociones Nickles se defiende argumentando que no existe ninguna

base o criterio que permita hacer una selección entre restricciones que pertenecen o no al problema. De modo tal que decide incluir todas las restricciones dentro de su definición de problema.

#### A. Requisitos lógicos y conceptuales

Los problemas existen y algunos son conocidos. (¿Cómo es posible esto?)

Los problemas son algunas veces solucionados.

Los problemas son idénticos sólo si sus soluciones son idénticas.

Las teorías son idénticas sólo si los problemas que solucionan son idénticos.

Dos problemas distintos podrían ser solucionados por la misma teoría y en este sentido podrían tener la misma solución y *a fortiori*, el mismo rango de soluciones admisibles.

Un problema podría ser solucionado por dos o más teorías distintas.

Los problemas existen sólo en relación a objetivos que no han sido alcanzados.

Los problemas tienen existencia objetiva dentro del cuerpo histórico de teoría, prácticas y objetivos. Algunos problemas son descubiertos, algunos permanecen no conocidos o sólo parcialmente conocidos. Los procesos de descubrimiento podrían ser graduales.

Dos científicos pueden tener el mismo problema sin conocer las mismas cosas acerca de éste y pueden aproximarse al problema desde diferentes direcciones y aun desde diferentes campos.

Las teorías son soluciones putativas de problemas, pero no todas las soluciones de problemas son teorías.

Algunos problemas son subproblemas de problemas más grandes.  
(Nickles, 1981: 86)

#### B. Evidencia que los problemas tienen profundidad conceptual

Los problemas pueden ser muy enigmáticos.

Muchos problemas son mal estructurados y por razones sustantivas (como opuesto a puramente formal, metodológico)

A pesar de 2, los científicos hacen juicios confiables acerca de cuando un problema ha sido solucionado. Frecuentemente hay casi unanimidad.

Los científicos pueden algunas veces hacer juicios confiables sobre si un problema tienen o no solución, incluyendo si es solucionable en términos de un cuerpo dado de teoría y la cantidad de tiempo y esfuerzo requerido para obtener la solución, y de este modo evaluar el éxito probable de programas y propuestas alternativas.

Los científicos hacen juicios confiables (y concuerdan) sobre el peso cognitivo de los problemas (su fertilidad, importancia, generalidad y centralidad). Los científicos saben que algunos problemas son más interesantes que otros.

Existen problemas sobredeterminados, es decir, problemas cuyas demandas restricciones/objetivo no pueden ser todas satisfechas (conjunto de restricciones inconsistentes); pero no todos los problemas son sobredeterminados.

Los procesos de descubrimiento son típicamente estructurados en tiempo, más que una experiencia psicológica momentánea de la solución que se dispara en la cabeza de algún individuo.

El razonamiento complejo tiene lugar típicamente en los contextos de resolución de problemas.

El razonamiento complejo cae dentro de muchos patrones diferentes y no es totalmente inductivo. La inducción enumerativa partiendo de datos y llegando a una solución es rara.

Problemas y soluciones en la ciencia actual son con mucha frecuencia altamente exotéricos.

Hay una tensión esencial entre tradición e innovación en las ciencias que está enraizada en los procesos de resolución de problemas.

Históricamente, la investigación limitada a la tradición en las ciencias ha sido más rápida y continuamente innovativa y progresiva que

la conducta de resolución de problema no ligada a una tradición definida o programa de investigación. (Nickles, 1981: 87)

C. Evidencia que las restricciones pertenecen al problema y no pueden ser eliminadas del “background”

Algunos problemas son más profundos que otros.

Hay muchos otros problemas aparte de la explicación-predicción.

Los datos algunas veces no constituyen el problema (o el principal problema) pero sirven principalmente como evidencia que un problema (o al menos un problema profundo) existe.

Algunos problemas conceptuales son intrínsecamente importantes y no son simples dificultades en el modo de resolver problemas empíricos.

Algunos problemas permanecen no resueltos.

Los problemas pueden ser formulados en modos significativamente diferentes (conceptualmente), formulados más o menos completamente, transformados y reducidos a otros problemas-todos sin cambios esenciales en la presentación de los datos empíricos a ser explicados.

Los problemas pueden ser modelados sobre otros problemas aun cuando los datos o temas sean disimilares.

Reconocer y formular un problema científico puede ser una tarea muy desafiante.

Mientras más restricciones conozcamos sobre un problema más precisamente puede ser formulado.

Formular buenos problemas puede ser un logro científico importante, frecuentemente diferente del descubrimiento o la producción de datos para explicación. (Nickles, 1981: 88)

Veamos brevemente cada restricción. Al y la pregunta sobre su posibilidad da lugar para Nickles a la paradoja de Menón. La paradoja aparece a través del siguiente razonamiento. Admitamos la definición de problema en términos de interrogaciones de la lógica interrogativa de Belnap y Steel. Una interrogación en esta lógica es el conjunto de

respuestas admisibles más la demanda de que una respuesta satisfaga ciertas condiciones de número, distintividad y completitud. A partir de esto, si aceptamos que los problemas existen y los conocemos, su propia definición nos lleva a considerar sin sentido la indagación puesto que conocemos las posibles respuestas. En el caso de que no la conozcamos, no tendremos un problema ni tampoco podríamos reconocer que es una respuesta al mismo. Nickles cree que su concepción inclusión-restricción de problema permite evadir o superar esta paradoja mostrando que la segunda alternativa es falsa. Más adelante evaluaré su respuesta a la paradoja de Menón, principalmente en comparación con la propuesta Simon y Newell.

La restricción A2, tiene como finalidad incluir explícitamente algo que ya se estableció implícitamente en A1, que algunos problemas pueden ser resueltos y que tal resolución puede ser calificada como “descubrimiento” Para Nickles la indagación tiene una forma débil y otra fuerte. La solución en relación a la débil en un dominio particular sólo requiere que se especifiquen las condiciones que indicarían la finalización de la indagación. La forma fuerte de investigación requiere no sólo las condiciones de finalización o el reconocimiento de la solución generada, sino también guías de cómo buscar el estado objetivo. (Nickles, 1981: 89)

La forma fuerte de la indagación no depende de un procedimiento algorítmico o de algún tipo de metodología general. En otras palabras, Nickles admite que hay dos formas posibles de indagación, que se distinguen por aceptar o no una dimensión heurística de resolución de problemas rotulados como descubrimientos. Nickles presenta seguidamente una mirada histórica de estas dos formas y señala que el positivismo clásico y el popperianismo restringieron la investigación filosófica exclusivamente al problema débil de la indagación quedando el problema fuerte a la psicología o a la historia. Esta clásica distinción que Nickles reformula en torno al concepto de problema no responde a la pregunta de si la forma fuerte, o la metodología como heurística como la denomina posteriormente, posee una dimensión heurística. La salida que

propone en este artículo, siguiendo a Laudan, es no obstante bastante conservadora; no va más allá de afirmar que la aceptación de la dimensión heurística colapsa en “pursuit” o prosecución. Esto por cierto rompe con la separación de contextos pero deja afuera del tratamiento filosófico los aspectos auténticamente generativos. Nickles nada dice en este trabajo de si la forma fuerte en sentido generativo puede ser reivindicada por la teoría de la computación, ya sea en su forma empírica (Simon y Newell) o abstracta. Como veremos más adelante, esta relación entre filosofía, descubrimiento y computación ha hecho por distintas vías que resurjan con cierta plausibilidad nuevas concepciones normativas del descubrimiento, lo que a su vez hace particularmente complejo hacer una evaluación de la hipótesis del descubrimiento científico como resolución de problemas.

Tomando como eje las restricciones como elemento clave para definir la noción de problema, Nickles define o caracteriza a otros modelos de problema. En este sentido, por ejemplo, dice que podemos hablar de un modelo empirista mínimo de problema como un hecho empírico en busca de explicación o predicción o un proceso en búsqueda de un método para controlarlo (Nickles, 1981: 90). El modelo mínimo para Nickles necesita por lo menos restricciones en lo que cuenta como explicación o predicción para poder constituir un problema o una definición de problema. Debido a que la forma débil de indagación requiere por lo menos restricciones para reconocer que una solución es adecuada, el modelo empirista mínimo de problema no puede abordar la forma débil de indagación.

Para Nickles esto lo logra el modelo positivista de problema que le agrega al modelo mínimo restricciones a lo que cuenta como una explicación, predicción o control. Esto le permite al modelo positivista de problema, abordar la forma débil pero no la fuerte. Los argumentos para esta última afirmación están basados principalmente en que los positivistas explícitamente negaron que algo filosóficamente interesante pueda tener lugar en el contexto de descubrimiento. Nickles no considera otras opciones, como por ejemplo la presentada por Laudan, que entiende

que este desinterés no es una consecuencia de una especie de dogma de división de contexto sino de la adopción de una forma consecuencialista de proceder científico post S.XVIII. Tampoco considera que haya variantes de confirmación, como la “bootstrap” de Glymour (1980) que tranquilamente podría ser calificada como positivista y sin embargo puede funcionar como un método de descubrimiento. En otras palabras, habría forma de colocar restricciones sobre el modelo positivista de problema que no llevaría a una división de los contextos y permitiría abordar formas fuertes de indagación.

Otra objeción de Nickles al modelo positivista de problema es que no puede abordar ninguna de las restricciones ligadas al tipo C, evidencias de que las restricciones conceptuales pertenecen al problema. Pero, nuevamente no es claro que esto sea una limitación intrínseca a los modelos positivistas de problemas. Suplementar el modelo positivista con teoría de la computabilidad y complejidad puede dar cuenta de la profundidad y comparabilidad de los problemas. Parecen más plausibles otras observaciones, como que una concepción positivista limitaría el tipo o variedad de posibles problemas.

Nickles tampoco concuerda con la definición de problema de Popper. Básicamente considera que a pesar de ser un avance respecto a la concepción positivista, no aborda correctamente las restricciones de la categoría C. Para Popper los problemas no son profundos en sí mismos sino en relación a su “background” (Nickles, 1981: 92). No es claro qué limitación puede generar esta separación entre problema y “background” y en principio parecería que es una mera crítica *ad hoc*. Aun más, parecería deseable esta separación si queremos comparar distintas soluciones a un mismo problema algo que, como vimos anteriormente, en el modelo kuhniano generaba inconvenientes.

Veamos si reformulando los argumentos de Nickles se aclara por qué el modelo popperiano de problema es inadecuado. Nickles entiende la concepción de problema de Popper como un modelo positivista con el agregado de que existe un “background” teórico que hace que un mismo

problema pueda tener distintas dimensiones. Estas dimensiones aumentan el tipo de problemas posibles. Para Nickles, datos anómalos que amenazan teorías importantes no son la única clase de problemas profundos que existen (Nickles, 1981: 92). Puede haber problemas profundos que no necesiten explicar datos adicionales (anómalos) como resolver el conflicto entre mecánica clásica y electromagnetismo. De esto Nickles deduce que la concepción de problema de Popper, no puede dar cuenta de todas las restricciones de C y que por lo tanto es inadecuada. En otras palabras, deberíamos interpretar que como el background teórico está fuera del problema, problemas que se plantean en niveles exclusivamente teóricos no son problemas.

¿Es justa la reducción del modelo popperiano a estos términos? Es llamativo, que a diferencia de su evaluación del modelo positivista, Nickles no analiza el problema de los contextos en relación a Popper; sólo dice que el modelo popperiano aborda el problema fuerte de la indagación proponiendo el método de conjetura y refutaciones. No aclara en este trabajo si este método es la única posibilidad de abordar el contexto de descubrimiento o en qué medida tiene aplicabilidad. En otros términos, si hay modos de abordar la forma fuerte de indagación con métodos de descubrimientos que no sean parasitarios de métodos de confirmación. Veremos más adelante como en sus últimos trabajos (veinte años después) (Nickles, 2003) recién se pronuncia al respecto y según mi interpretación cae desde cierta perspectiva en un modelo popperiano de problema.

La pregunta obvia que a esta altura se hace Nickles es ¿Por qué debemos trazar una distinción entre las restricciones sobre la una resolución de un problema, diciendo que algunas pertenecen al problema mismo mientras otras pertenecen al “background? ¿Sobre qué bases se traza tal distinción? (Nickles, 1981: 93).

Nickles se apoya para responder a estas preguntas en el modelo de Hattiangadi, un modelo que admite la existencia de problemas sin que haya componentes fenoménicos sustanciales y que sostiene que los

problemas científicos, a diferencia de otros tipos de problemas, tienen una estructura histórica. En otras palabras, es la distinción entre problemas comunes y problemas científicos lo que nos lleva a admitir que los problemas científicos tienen estructura histórica.

No obstante, rechaza uno de los principios de Hattiangadi, aquel que sostiene que en general todos los problemas son necesariamente inconsistencias lógicas. Como ejemplo de esto señala que la mera incompatibilidad de teorías puede ser un problema si se requiere una relación de apoyo (Nickles, 1981: 93). La consecuencia es que el modelo de Hattiangadi no puede dar cuenta del problema de explicar datos empíricos.

Nickles acepta que la estructura histórica de los problemas que lleva a que las restricciones pertenezcan al problema y es sobre esta base que desarrolla su modelo de inclusión de restricciones. Para Nickles, la ventaja de este modelo está en su generalidad; puede dar cuenta tanto de la profundidad de algunos problemas, como de tipos de problemas no captados por otros modelos.

### *Críticas al modelo de inclusión-restricción*

A continuación se detallan las principales críticas y limitaciones de este modelo:

*Es demasiado inclusivo:* el modelo de inclusión al colocar todas las restricciones dentro del problema multiplica los mismos de manera innecesaria y no deja lugar a la comparabilidad entre soluciones teóricas distintas a un mismo problema. La respuesta de Nickles es que esta objeción es históricamente indefendible (Nickles, 1981: 97).

*Borra distinciones útiles.* No distingue entre restricciones esenciales al problema de restricciones que no son esenciales. Esto lleva no sólo a que resulte imposible que teorías rivales resuelvan el mismo problema sino a poner al mismo nivel las restricciones que identifican la solución con métodos o cualquier otro tipo de heurística que facilite el

camino a la misma. En otras palabras, no distingue entre heurísticas como restricciones de heurísticas como búsqueda, vaciando prácticamente el contexto de descubrimiento.

*Su definición pierde poder analítico* al incluir parte de factores que influyen los procesos de resolución hacia el logro del objetivo o restricciones que no son esenciales.

Un *modelo demasiado inclusivista* como el de Nickles no podría dar cuenta de los descubrimientos simultáneos. La excesiva inclusividad hace improbable la igualdad de problemas, cualquier mínima diferencia en las restricciones hace a los problemas diferentes.

### **3. Consideraciones finales sobre el concepto de problema**

En esta sección presenté las versiones filosóficas más significativas a mi entender que definen el concepto de problema o aspectos relacionados directamente con el mismo. El objetivo era tratar de encontrar una definición de problema que fuera lo suficientemente rica como para abordar las dimensiones más importantes que tiene esta noción en la filosofía actual de la ciencia. A su vez, se analizó si estas definiciones contenían los elementos necesarios para convertirse en una categoría fructífera para abordar el contexto de descubrimiento. Este último requisito se cumple sin dificultades en las aproximaciones psicológicas porque en general los estudios sobre resolución de problemas estuvieron ligados a líneas o escuelas que creían que el aprendizaje era algo más que ensayo y error, aunque las mismas no lograron reflejar la complejidad de los problemas científicos. En filosofía de la ciencia, por el contrario, hay una cierta inercia a quedarse en el contexto de justificación, contaminando consiguientemente la noción de problema en este sentido. También puede apreciarse que todo intento de pasar de psicología a metodología, como se ve claramente en el caso de

Popper entre sus primeros y últimos trabajos, presenta muchas dificultades. En particular, se diluye lo verdaderamente interesante del concepto de problema. La propuesta de tratar de ajustar una estructura lógica (o no psicológica) y una estructura histórica, como en el caso de Hattiangadi, o mejor dicho de ver a los problemas científicos como aquellos donde coexisten estas dos estructuras, constituye un buen comienzo, pero como mostré antes tiene también limitaciones. Si el objetivo es tener una filosofía de la ciencia que sea sensible a las prácticas científicas, necesitamos algo más que una estructura lógica en el sentido tradicional. Es aquí donde, a pesar de falta de estructura histórica, cobra dimensión el concepto de problema de los seguidores del paradigma de procesamiento de información como Newell, Simon y Reitman. La idea de Newell y Simon de ver la noción de problema desde el punto de vista de la información parece brindarnos una alternativa intermedia entre aproximaciones psicológicas (subjetivas) y filosóficas (objetivas). Es una definición que no excluye una dimensión heurística de la investigación, en especial la dimensión de los contextos generativos. No obstante, es criticable la falta de una estructura histórica lo suficientemente sofisticada como para abordar descubrimientos altamente complejos. No pretendí en estas secciones, obtener una definición válida, sin excepción; más bien la idea fue agotar los usos de esta noción, tratando de determinar lo que se intenta buscar con las definiciones (a veces encubiertas en clasificaciones) y elucidar si logran el objetivo buscado. Los filósofos, al contrario de lo que piensa Agassi (1993), no parecen ver que una perspectiva de la ciencia como resolución de problemas lleva a una idea de descubrimiento como búsqueda. Es por todo esto que el próximo capítulo se centrará en la resolución de problemas.

## **III.**

### **Resolución de problemas**

En esta sección analizaré las distintas concepciones que se han dado acerca de la noción de resolución de problemas. No daré todas las variantes posibles, sino que me limitaré a aquellas que sean relevantes a las nociones de descubrimiento y creatividad científica. Como ha quedado de algún modo perfilado en el desarrollo del concepto de problema en la sección previa, gran parte de las distintas versiones gira en torno al concepto de problema y su relación con procesos heurísticos y no heurísticos de resolución. De esta primera división general surge a su vez un gran número de subclasificaciones que tendrán importantes consecuencias en relación a la racionalidad del descubrimiento, a su impredecibilidad y a las posibilidades de artificialización del proceso de descubrimiento. En otras palabras, a medida que vayamos exponiendo las diversas variantes de esta noción veremos que afirmar que el descubrimiento es resolución de problemas tiene significados muy diversos, que implican diferencias metodológicas y epistemológicas importantes.

Comenzaré con la versión de Newell y Simon del concepto de resolución de problemas dado que no sólo es la teoría clásica sobre

resolución de problema, sino también por su vinculación a lo largo de la historia con los estudios sobre descubrimiento científico.

Aunque el concepto de resolución de problema puede rastrearse en los trabajos de Polya, Hadamard y los psicólogos de la Gestalt Dunker y Mayer, la teoría preponderante sobre resolución de problemas en los últimos 50 años es la de Newell y Simon. A mediados de los cincuenta del siglo pasado estos autores propusieron una versión aparentemente nueva del concepto de resolución de problemas, con profundas implicancias en lo que actualmente denominamos ciencias cognitivas (psicología cognitiva, inteligencia artificial). En líneas generales y como una primera aproximación, podemos decir que la novedad consistió en entender al proceso de resolución de problemas *como una búsqueda sobre un espacio de conocimiento denominado técnicamente “espacio del problema”* Dentro de este marco, resolver un problema significa que se tiene algún conocimiento inicial sobre las condiciones del problema, el objetivo del mismo y algunos operadores que pueden transformar gradualmente las condiciones iniciales hasta producir lo que se denomina “estado objetivo” Los operadores, que son reglas que aumentan o disminuyen o buscan en el espacio del problema, tienen restricciones que deben ser satisfechas antes de ser aplicadas. Al conjunto de estados, operadores, restricciones y objetivos es a lo que se denomina “espacio del problema” El proceso de resolución de problemas puede entonces ser conceptualizado como una búsqueda que une o liga la información contenida en un estado inicial con un estado final. En síntesis, estar ante un problema significa tener un conjunto de soluciones posibles y un test para verificar si la solución se encuentra o no dentro de aquel conjunto.

Como expuse al comienzo, esta forma de concebir un problema y de considerar sus aspectos principales ya estaba en pensadores anteriores y si se analizan fuera de contexto daría la impresión que no es nada más que una redefinición que no avanza fundamentalmente más allá de la que sostuvieron sus predecesores (Polya, Dunker). Pero, esta perspectiva pasa por alto la importancia que tuvo el oportunismo de Simon y Newell al elegir dentro de la larga lista de ítems que involucran cualquier tarea de

resolución de problemas las que se adaptaban mejor al estado del arte de la nueva irrupción tecnológica, la computadora electrónica, y “proponer un formalismo para describir cómo los esfuerzos del resolutor de problemas deben ser dirigidos durante la expansión del conocimiento de la situación del problema” (Hunt, 1994: 220). Este punto de partida, si bien ahora retrospectivamente puede parecer insignificante, logró resultados que ejercieron una influencia decisiva en lo que se conoce actualmente como la “revolución cognitiva”, una nueva forma de abordar la comprensión de la mente y la conducta humana que tuvo una influencia decisiva en la psicología norteamericana (desplazó 50 años de dominio casi absoluto del conductismo dentro de la psicología académica). En líneas generales, la novedad consistió en realizar programas de computadoras (simulaciones computacionales) que se conducían de modo inteligente, o para ser más precisos, que lograban solucionar problemas que suponían cierta dificultad intelectual para los humanos. El ejemplo paradigmático fue el *Logic Theorist* (Newell & Shaw, 1957) que encontró la demostración de 38 de los 52 teoremas presentes en el capítulo II de los *Principia Mathematica* de Bertrand Russell y Alfred North Whitehead.

La computadora junto con el formalismo que idearon Newell y Simon para operacionalizar los principios de su teoría, significó para estos autores una forma totalmente novedosa de experimentar en psicología. Con esta estrategia podían determinar las condiciones suficientes que hacen que una computadora pueda resolver un problema. En otras palabras, vieron una alternativa fructífera a la dificultad que presentaban los estudios sobre resolución humana de problemas: ninguna condición experimental podía establecer confiablemente cuáles eran los factores que producían una solución determinada. No se logró con la simulación computacional establecer de modo concluyente cuáles son efectivamente los factores que producen la resolución humana de problemas. Sin embargo, constituye un avance respecto a explicaciones alternativas si suponemos que hay algún tipo de analogía hombre-computadora o que tienen a cierto nivel, el necesario para la resolución

de problemas, el mismo tipo de sistema. ¿Cuáles son los fundamentos que llevan a adoptar esta analogía? La hipótesis, para algunos una metáfora, de que las tanto las computadoras como los humanos son a cierto nivel procesadores de información simbólica.

## **1. Computadora y humanos como procesadores de información simbólica**

La analogía entre computadoras y humanos en el caso de Newell y Simon está fundamentada en que ambos, hombre y máquina, son sistema que procesan información o, más específicamente, son procesadores simbólicos de información. Esta hipótesis no establece que ambos sistemas sean idénticos. Por el contrario, desde un comienzo el famoso trabajo de Miller *The Magical Number Seven, Plus or Minus Two: Some Limits on Our Capacity for Processing Information* (1956) claramente mostró que a nivel de memoria de corto plazo la computadora y el ser humano tienen diferencias notables, pero que los mecanismos para salvar estas limitaciones son básicamente los mismos, estrategias que evitan a la explosión exponencial del espacio del problema.

Una primera generalización acerca de que los procesos de pensamiento son procesos de información simbólica es la siguiente:

Todos los procesos de pensamiento son construidos a partir de un conjunto pequeño de procesos elementales de información. (Simon, 1977: 276)

La organización de estos procesos depende a su vez de estas dos generalizaciones:

1. Los procesos son organizados jerárquicamente (en cuanto a su complejidad).

2. Los procesos son ejecutados serialmente, debido a que las computadoras son mecanismos serialmente organizados. Por otra parte, es más simple construir teorías de procesamiento de información que operen serialmente.

Respecto a la resolución de problemas, el paradigma de procesamiento de información establece las siguientes generalizaciones:

1. Resolución de problemas es búsqueda de posibilidades de solución mediante ensayo y error altamente selectivo.
2. Las búsquedas de resolución de problemas son selectivas en el sentido que exploran sólo un minúsculo espacio de un gran número de posibilidades. En muchos casos interesantes la búsqueda no es gobernada por procedimientos sistemáticos sino por reglas o principios empíricos llamados heurísticas.
3. El análisis medio-fin es una de las heurísticas básicas de la resolución humana de problemas. (Simon, 1977: 277)

## 2. Modelo Newell-Simon de resolución de problemas

La definición de Newell y Simon de lo que es resolver un problema es parte de la propia definición de problema. Esto puede verse claramente en *Empirical Explorations with the Logic Theory Machine* (Newell & Simon, 1957) donde expresa lo siguiente:

Abstractamente, una persona tiene un problema si tiene un conjunto de posibles soluciones y un test para verificar si un elemento dado de ese conjunto es en realidad una solución a su problema. La razón de por qué los problemas son problemas es que el conjunto original de posibles soluciones dado al resolutor de problemas puede ser muy grande, la solución real estar muy dispersa, rara vez se

la puede encontrar o el costo de obtener cada nuevo elemento y de testarlo es muy alto. (Newell & Simon, 1957:113)

“Tener un conjunto de soluciones” debe ser interpretado de la siguiente manera: el resolutor de problemas tiene los mecanismos (operadores) que le permiten generar el conjunto de soluciones posibles. En otras palabras, una persona se encuentra ante un problema si está ante varias posibilidades de solución manifestada en parte por operadores o estrategias que pueden generar este conjunto de posibilidades. De esto se desprende que para Simon los componentes esenciales de un problema son las condiciones iniciales y las reglas que transformarán las condiciones hasta llegar a la solución pretendida. Analizadas fuera de contexto, estas concepciones podrían sorprender como algo trivial y obvio, y no explicarían la importancia que tuvieron para los comienzos de las ciencias cognitivas. Pero esta definición muestra dos aspectos de todo problema que convenientemente tratados en relación con las limitaciones de memoria de trabajo y las limitaciones de cómputo del ser humano pueden reelaborarse de un modo simple y potente.

Respecto a las reglas, operadores o estrategias Simon advierte a partir de sus estudios sobre la resolución humana de problemas (análisis de protocolos) que podemos explicar cómo se resuelve una cantidad significativa de problemas sin la necesidad de postular capacidades mentales muy complejas. Pero ¿Cómo se puede saber que efectivamente esos operadores son los que efectivamente el ser humano utiliza? La psicología de la Gestalt, por ejemplo, también abordó la resolución de problemas y no postuló tales operadores. Para responder a esta pregunta hay que hacer previamente una aclaración. Por un lado, hay que tener en cuenta si el problema puede solucionarse con un determinado operador, y por otro, si el ser humano usa ese operador u otro recurso para solucionar el mismo problema. Simon encontró una respuesta a la primera pregunta usando sugerencias de sus estudios de la segunda. ¿Qué quiere decir esto? Quiere decir, que vislumbró que se podía establecer la suficiencia de estos operadores mediante una nueva herramienta experimental, la

computadora digital, que ofrecía un escenario controlado al que mediante una representación general se le podían modelar las condiciones iniciales y los operadores, y así producir con el mismo lenguaje la respuesta que un humano produce en las mismas circunstancias.

Una versión más abstracta de la concepción de Simon de resolución de problemas la encontramos en *Artificial Intelligence and Hard Problems: The Expected Complexity of Problem Solving* (Glymour, Kelly & Spirtes, 1991). En este trabajo se clasifican los problemas tratados por Newell y Simon en dos categorías basadas en el tipo de representación: problemas predicados-conjunto y autómata finito.

En el primer caso, para la formulación “predicado-conjunto”, tenemos que:

    Especificar un problema en esta formulación significa que es dado, de algún modo, un conjunto,  $U$ , y el objetivo de buscar, producir o determinar un miembro de un subconjunto  $G$  de aquel conjunto- esto último identificado de modo más general por un test que puede ser realizado sobre elementos de  $U$  (Glymour, Kelly & Spirtes, 1991: 109).

Y para problemas representables por un autómata finito:

    Especifica que el mundo puede suponer un conjunto de estados discretos describable por una colección finita de predicados unarios. La aplicación de un operador podría (o no) cambiar el estado del mundo, pero un operador siempre da el mismo estado resultante a partir del mismo estado anterior. Algún estado es diseñado como el estado inicial o estado comienzo. Otros estados, posiblemente incluyendo el estado inicial, son designados como estados objetivos. Así construido, una instancia de problema es determinada por un autómata de estado finito, cuyos números de estados son conocidos por el resolutor de problemas, pero cuyo grafo y conjunto de estados objetivos no son conocidos. La tarea es producir un camino en el autómata, esto es, un camino del estado inicial al estado final. Al resolutor de problemas no se le dice qué estados son estados finales, y así para poder reconocer cuando parar, debe preguntar a un oráculo (Glymour, Kelly & Spirtes, 1991: 117).

La importancia de individualizar esta última clase de problemas es que si se conocen los estados objetivos (como ocurre en los casos de problemas tipo Torre de Hanoi o el misionero y los caníbales), la elaboración de algoritmos para resolverlos es trivial (si tales problemas tienen solución). Más adelante volveremos sobre esta caracterización de Glymour *et al.* cuando analicemos la relación entre complejidad y resolución de problemas.

La idea clave de la aproximación de Simon es que la resolución de problemas es computacionalmente difícil y requiere típicamente recurrir a procedimientos de búsqueda heurística, y por supuesto, que los resolutores reales de problemas efectivamente usan técnicas heurísticas de resolución de problemas.

### **3. Contexto histórico del modelo de resolución de problema de Newell y Simon.**

La simplicidad de este modelo tal vez no muestre la significación que tuvo en la historia del concepto de creatividad y la psicología de resolución de problemas. Es inevitable preguntarse por qué no surgió antes un modelo tan simple, que a pesar de sus limitaciones, ha mostrado ser tan fructífero. Shanker en *Wittgenstein's Remarks on the Foundations of AI* (1998), uno de los trabajos más profundos que conozco sobre los orígenes y limitaciones de la IA, explica que en parte esto se debe a la poderosa influencia de la concepción griega de creatividad, ejemplarizada por el Eureka de Arquímedes. Actitudes contemporáneas hacia la creatividad han sido en gran parte moldeadas por el cuadro romántico del genio, que estuvo a su vez basado en el mito griego de la inspiración (Abrams 1953).

Esta concepción entendió la creatividad como algo sobrenatural, una especie de don divino que no era pasible de ningún tipo de análisis

racional. Es una influencia que perdura hasta mediados del siglo XIX, que como bien señala Shanker se basa en:

La idea de que hay un paralelo entre procesos inconscientes que subyacen a la creación poética- donde la poesía es vista, en términos románticos, como la percepción y representación de la estructura oculta de la naturaleza- y aquellos estados involucrados en la resolución de problemas (Shanker, 1998: 123)

Hay muchas sutilezas que estas explicaciones globales pasan por alto, pero lo importante es que “el paso de la creatividad poética a la literaria llevó a una reorientación en el modo en que fue abordado el fenómeno de inspiración” (Shanker, 1998: 124). Esta reorientación llevó a que se dejara de pensar que los individuos creativos son seres anormales y que podían, en principio, explicarse los procesos de producción creativa en términos de aquellos que están por debajo de umbral consciente.

Esta reorientación será clave en el desarrollo de la Inteligencia Artificial, ya que permitió pensar en una dimensión cognitiva sin la intervención de procesos conscientes, cuestión que fue descartada en el siglo XIX cuando se afirmó que las máquinas no podían pensar porque la selección de premisas era un proceso eminentemente consciente.

Los trabajos de Poincaré a comienzos del siglo XX marcan un punto de inflexión. Se empieza a reconocer un rol importante a los procesos inconscientes en la creatividad. Sin embargo, a pesar de que quedaron dudas acerca de cómo se combinan los procesos conscientes e inconscientes, “al menos quedó claro que la clave para descubrir la naturaleza de la creatividad descansa en desentrañar los secretos de la mente inconsciente” (Shanker, 1998: 125). Es en este punto donde comienzan a generarse los cimientos de una aproximación muy particular a la creatividad científica; donde, forzando un poco la interpretación, podemos decir que posturas no racionales acerca de la creatividad permitieron luego elaborar concepciones mecanizadas y racionales de la misma. Es este origen, como veremos más adelante, lo que hace

particularmente elusiva una evaluación apropiada la concepción de resolución de problemas creativos que nos dio la IA a partir de mediados del S.XX. Este es claramente su punto de partida, la comprensión de resolución de problemas creativos depende de la comprensión de procesos inconscientes.

Este era específicamente el objetivo que consideraron tenía el GPS<sup>1</sup>,

explicar los procesos inconscientes que se supone que existen durante la incubación, la imaginería empleada en el pensamiento creativo y su significación para la efectividad del pensamiento y, por sobre todo, el fenómeno de iluminación, el flash repentino de *insight* que reveló la solución de un problema buscado por mucho tiempo (Newell, Shaw & Simon, 1959: 1).

Pero el programa de Newell y Simon va un poco más allá de lo que sugiere esta frase, lo inconsciente no es sólo importante para entender la creatividad sino que es crucial. En otras palabras, aquello que se encuentra a nivel consciente no es decisivo para entender los procesos creativos.

Pero, no fue directa la vía con la que se llegó a la idea que la creatividad era un producto de procesos inconscientes que podían mecanizarse. Según Shanker lo que posibilitó que surgiera esta nueva forma de entender los procesos creativos fue la emergencia de una nueva comprensión del término inconsciente, como designando los procesos inferenciales que tienen lugar en el cerebro (Shanker, 1998: 125-126)

La experiencia “Ah” (aquella en la que se produce una comprensión repentina) podía explicarse como resultado del hecho que aunque no se piense conscientemente sobre un problema, el cerebro

---

<sup>1</sup> General Problem Solver (Resolutor General de Problemas) podríamos decir que fue el primer programa heurístico. Intentaba como su título lo indica, erigirse en una estructura que podía resolver cualquier tipo de problema. Desde un punto de vista de la programación actual, la “inteligencia” que se le atribuyó puede explicarse por la complejidad de la programación del momento. Actualmente puede reescribirse casi como una simple base de datos indexada.

continúa trabajando y la última fase (consciente) es sólo la culminación de un proceso gradual y continuo que lo precede. Estas dos últimas características, como veremos más adelante, seguirán siendo los únicos argumentos que sostendrá la concepción de Simon de descubrimiento frente a las objeciones derivadas de lo que denomina críticas de las tres “i”, *insight*, inspiración e intuición, una vez que estos procesos empezaron a ser abordados como procesos no graduales a través de sistemas computacionales conexionistas.

El cambio de postura respecto al inconsciente tiene como antecedente los trabajos de percepción de Helmholtz, quien fue uno de los primeros en postular la existencia de procesos inferenciales en el cerebro. Pero, tuvo que pasar un tiempo para que se aceptara la posibilidad de plantear que era posible hablar de razonamiento no consciente. “El razonamiento fue visto como volicional y de este modo como una actividad consciente” (Shanker, 1998: 129).

Si bien esto, desde una perspectiva actual, hace más entendible por qué los críticos más fuertes a la IA vuelven a rescatar el rol de la conciencia, no ofrece todavía una explicación de cómo es posible llevar la idea de inconsciente cognitivo al ámbito de resolución de problemas. El problema central que debía superar una teoría de resolución de problemas basada en la noción de inconsciente cognitivo radicaba en que, si bien es fácil admitir que problemas cuya resolución obtenemos conscientemente posteriormente la podamos obtener inconscientemente, no ocurre lo mismo a la inversa.

Una cosa fue insistir que en casos de “fenómenos Ah” el cerebro debe haber resuelto el problema, y que a partir de  $x$  (un cálculo, prueba, etc.) constituye una solución del problema, esto *debe* haber sido lo que el cerebro infirió; pero es completamente otro asunto explicar cómo el cerebro supo que  $x$  constituyó una solución al problema cuando es algo que eludió completamente a la mente consciente (Shanker, 1998: 131).

En este contexto es donde surge la concepción de descubrimiento de Poincaré, “Descubrimiento es discernimiento, selección” (Poincaré,

1913: 58). Pero, es importante tener en cuenta que, a diferencia de lo que ocurría en el S. XIX, para Poincaré los procesos selectivos no están necesariamente asociados a procesos conscientes. Dicho de otro modo, existen procesos selectivos no conscientes. Poincaré no niega la posibilidad de que haya reglas inconscientes, pero señala la extremada sutileza y delicadeza de las mismas. La estrategia de la IA, según Shanker, consistirá en considerar que esta sutileza y delicadeza es un derivado de la complejidad del ámbito que inspira a Poincaré, y que en otros ámbitos menos complejos pueden encontrarse reglas simples. El punto importante es que estas reglas simples posteriormente servirán para abordar problemas complejos.

Si la IA comienza con casos más simples, puede mostrar que

los procesos que tienen lugar en la resolución humana de problema pueden ser un compuesto de procesos de información elementales, y por lo tanto... pueden ser llevados a cabo por mecanismos (Newell, et al., 1958: 152).

Con esto la IA mostraba que aún en la resolución de acertijos el cerebro no puede ser confinado a mero ensayo y error. Habría que hacer una salvedad en estos comentarios, como lo señalé anteriormente a propósito del análisis de la concepción gestáltica de resolución de problemas, fue esta corriente la que explícitamente ofreció una concepción de que los procesos de resolución de problemas que no se reducía a métodos de mediante ensayo y error. Hay una dimensión heurística en la concepción de resolución de problemas de Poincaré, pero una dimensión que no es generativa. Aunque tampoco es una versión del tipo de la de Popper-Campbell donde la generación se produce por el exceso de producción ciega y la retención selectiva. Los trabajos de Poincaré fueron de tipo autobiográficos y no representaban los trabajos sobre resolución de problemas en la naciente psicología experimental. Los experimentos llevados a cabo por los psicólogos de la Gestalt, particularmente el trabajo de Karl Duncker, fueron otras vertientes que llevaron a adoptar la dimensión heurística en el punto de vista de Newell y Simon sobre resolución de problemas. Lo que quedó de estas

investigaciones fue que aún en la resolución de problemas difíciles, inclusive aquellos que se producen por *insight*, las respuestas dadas en el transcurso del proceso no son aleatorias y poseen una estructura común. También, y esto es aún más importante, que los mecanismos que permiten la resolución de problemas simples no difieren sustancialmente de los que se necesita para resolver problemas complejos. Aunque, vale aclarar, consideraban que la base física sobre la cual estos procesos funcionaban era completamente distinta.

#### **4. La noción de resolución de problemas a partir de la emergencia de la noción de cómputo**

A principio de los 30, con los trabajos de Gödel y Turing, comienza lo que podríamos denominar ciencia de la computación (en sus aspectos teóricos y prácticos). Esta nueva ciencia cambiará radicalmente el curso de las ideas y tradiciones anteriores. La historia del surgimiento y desarrollo de esta disciplina es una historia que tiene varias facetas, en muchos casos con efectos contradictorios. Intentaré, sin ser exhaustivo, exponer los aspectos más relevantes de esta historia en función de los objetivos de la temática que nos ocupa. Por un lado, tenemos las limitaciones de los sistemas axiomáticos para abordar algunos problemas matemáticos. Por el otro, el descubrimiento de que reglas computacionales muy simples, con suficiente tiempo pueden ejecutar o producir cálculos muy complejos. Estas reglas, por otra parte, pueden ser ejecutadas por una máquina de Turing, y no dependen de que la máquina sea consciente de las mismas. Además, el hecho de que tales algoritmos sean cadenas lineales, junto con el descrédito de la omnipotencia de la introspección, llevó casi naturalmente a que lo computacional sea el único modo fructífero de abordar los procesos inconscientes presentes en los procesos creativos.

En otras palabras, el punto crucial para entender la novedad en el concepto de resolución de problemas en Newell y Simon es entender que en la explicación del misterio de la creatividad no podemos ser conscientes de los procesos preconscientes que llevan al momento de *insight*.

A partir de esto Shanker deduce que la tarea de Newell y Simon fue la siguiente: si la resolución de problemas debe tratarse como el paradigma del pensamiento o el núcleo de todo pensamiento y si los pasos atómicos de un programa deben ser tales que no presupongan ninguna inteligencia, entonces ambos no deben presuponer *insight*.

Pero el argumento de Newell y Simon va mucho más allá. Ellos afirman también que cualquier cosa que esté involucrada en el proceso de creación, desde la preparación a la incubación, iluminación o verificación, debe ser tal que pueda ser expresada en términos que puedan ser ejecutados en una máquina de Turing. Por lo tanto, el *insight*, en el sentido fuerte que se le otorga a esta noción como cambios repentinos y sin reglas subyacentes, debe ser eliminado completamente de una teoría computacional de la creatividad. Pero a pesar de esto, queda flotando la siguiente pregunta: ¿todo lo que satisface la tesis de Turing tiene que satisfacer los aspectos centrales de la noción de resolución de problemas de Newell y Simon? o en otras palabras, ¿hay modos de resolver problemas que satisfagan las Tesis de Turing, pero que no satisfagan algún aspecto central de la noción de resolución de problemas de Newell y Simon? La respuesta a estos interrogantes no es trivial; implica en caso de contestarlas afirmativamente que toda resolución computacional de problemas es una confirmación de la concepción de Simon-Newell de resolución de problemas. Esto llevaría consiguientemente a que los únicos límites a la concepción del descubrimiento científico como resolución de problemas están dados por la existencia de procesos no computacionales involucrados en el descubrimiento y la creatividad. Esta última tesis ha sido defendida en los 90 por Roger Penrose. Diremos algo más acerca de esta tesis tan radical más adelante.

Matemática y psicología procedían en dirección opuesta en cuanto a resolución de problemas, los matemáticos seguían problemas de investigación que no podían ser probados en sistemas formales, mientras psicólogos debatían si ejemplos primitivos de conducta de resolución de problemas podían explicarse en términos mecánicos. Es aquí donde innovaron Newell y Simon quienes:

fueron los primeros en reconocer que desde un punto de vista mecánico el último problema, los primitivos en la conducta resolutoria de problemas, ofrecía la estructura perfecta para responder a los inconvenientes que derivaban de una resolución mediante sistemas formales. Si casos más simples de *insight* pueden ser simulados mecánicamente, entonces no hay razones *a priori* para que la IA no pueda ascender la escala cognitiva de habilidades de resolución de problemas. Como Newell y Simon lo explicaron en uno de sus primeros trabajos sobre GPS, “pensamiento creativo es simplemente una clase especial de conducta resolutoria de problema” (Newell, Shaw & Simon, 1959: 3) (Shanker, 1998: 148-49)

Los mecanicistas post-computacionales nos han persuadido de que la “novedad” en la resolución de problemas llega a través de procesos ordinarios de pensamiento en interacción con la información disponible en el problema. No hay necesidad de postular un proceso especial llamado *insight* puesto que éste se reduce simplemente a información indexada.

Pero todo esto contrasta con el hecho que quizás los avances más importantes en nuestra comprensión de la creatividad en los últimos años se hayan basado en una observación cuidadosa de las acciones de los agentes y/o investigaciones biográficas, y no en los estudios de laboratorios o simulaciones computacionales. Tal vez, una explicación de la creatividad demande “explorar investigaciones hermenéuticas en orden a reconstruir los eventos que esperamos comprender” (Shanker, 1998: 183).

En síntesis, la historia del concepto de resolución de problemas en Newell-Simon y de la IA clásica nos permite realizar las siguientes afirmaciones:

1. La clave de la explicación del misterio de la creatividad es que no podemos ser conscientes de los procesos preconscientes que llevan al momento de *insight*.
2. El proceso de *insight* para ser tratado computacionalmente debe ser descompuesto en subprocesos que no lo presupongan.
3. Tratar computacionalmente a la creatividad tiene la ventaja de que puede darse una definición operativa de la misma y, por consiguiente, ofrecer una medida para las prácticas experimentales que la involucren.
4. La complejidad de los procesos de razonamiento científico no está en las reglas sino en la interacción de reglas simples con información o base de conocimiento indexadas.
5. Subyace a la IA clásica lo que Fredkin denominó, “Filosofía Digital”, el mundo es discreto y es por lo tanto comprensible mediante un programa. Descontando el factor tiempo, la eficacia está en relación al programa, que puede ser muy simple.
6. Si le incorporamos el factor tiempo, puede ser necesario aceptar reglas más complejas o menos confiables pero que den más probabilidad de éxito en el menor tiempo posible.
7. La distinción entre problemas mal definidos o mal estructurados y bien definidos o bien estructurados no es una diferencia cualitativa, es sólo una diferencia en cuanto a la complejidad de los mismos. De esto, más el supuesto de que no hay límites claros entre ambos tipos de problema, se infiere que las reglas o estrategias de resolución de los bien estructurados o definidos sirven para los mal-estructurados o definidos.
8. Problemas que no pueden ser abordados por sistemas formales pueden ser abordados mediante reglas usadas en la resolución de problemas más simples.

9. La resolución de problemas debe ser gradual, caso contrario no es posible vincular la dificultad de resolución a la complejidad subyacente del problema.

## **5. La paradoja de Menón y como lograr una concepción de resolución de problema que eluda esta paradoja.**

Toda definición de problema y su resolución, en tanto coloque el objetivo de un problema como parte de la misma, debe enfrentarse a la conocida paradoja de Menón. En un contexto de resolución de problemas, esta paradoja podría enunciarse de la siguiente manera: Si la búsqueda del conocimiento de un ítem requiere de su conocimiento, entonces la búsqueda es imposible porque presupone que su objetivo no ha sido alcanzado o es sin sentido porque la verdad de sus presuposiciones es el cumplimiento de su objetivo.

La solución a un problema puede ser conocida o no. En ambos casos no hay un problema porque si es conocida la solución no tiene ningún sentido buscarla y si no es conocida, nunca sabremos si la hemos encontrado.

Del primer cuerno del dilema Polanyi infiere la necesidad de conocimiento tácito. Si todo conocimiento es explícito no podemos conocer un problema o buscar una solución (Polanyi, 1966).

¿Cómo evade esta paradoja la teoría de Simon?

En su trabajo *Discussion: Meno paradox* (Simon, 1977) ofrece como un ejemplo para superar esta paradoja el problema de probar teoremas en un sistema formal. Dado un sistema formal S y a) un procedimiento efectivo para determinar si una expresión en S es una fbf (fórmula bien formada), b) un procedimiento para determinar si una fbf

es un axioma y, c) un procedimiento efectivo para determinar si una fbf, C, es una consecuencia directa de algún otro conjunto de fbf. Bajo estos supuestos, un problema para el sistema S sería generar una fbf, por ejemplo P, y establecer la tarea de determinar si P es un teorema de S. P es un teorema de S si y sólo si P es el miembro final de alguna prueba de S. Por lo tanto, se sabe lo que se está buscando: una secuencia de fbf tal que cada miembro es una consecuencia directa de algún miembro previo y P es el miembro final. Los procedimientos efectivos nos permiten determinar si cualquier objeto que se nos presenta es una de tales secuencias. Nuestra habilidad de conocer lo que estamos buscando no depende de tener un procedimiento efectivo para buscarlo: sólo necesitamos un procedimiento efectivo para testear candidatos.

¿La solución que da Simon con este ejemplo lo compromete con una teoría particular (entre otras) de resolución de problemas? ¿Es idéntica al modelo de resolución de problemas de inclusión-restricción de T. Nickles en *What Is a Problem that We May Solve It?* (1981)

En el apéndice del trabajo antes citado, tanto Simon como Nickles reconocen la similitud de sus conceptos de resolución de problemas. Sin embargo, en *Search and Reasoning in Problem Solving* (Simon, 1983) parece hacer una clara distinción entre la resolución de problemas como búsqueda, como razonamiento y como satisfacción de restricciones. Aunque expresa que tales clasificaciones no se dan en forma totalmente pura, en el sentido que una misma actividad inteligente puede ser caracterizada como instanciando estas tres nociones, identifica o asocia descubrimiento con búsqueda (search), circunstancia que haría por lo menos inaplicable los argumentos que usa en *Discussion: Meno Paradox* para evitar dicha paradoja. Si confrontamos los dos trabajos parecería que en *Search and Reasoning in Problem Solving* coloca más énfasis en caracterizar la resolución de problemas por las estrategias u operadores que cambian el estado inicial o más precisamente expanden el estado inicial de un modo selectivo, inclusive en situaciones donde hay un importante conocimiento del dominio.

Estas observaciones, que pueden parecer poco significativas, adquieren otra dimensión cuando las relacionamos con una teoría general de resolución de problemas del descubrimiento científico. Un punto de vista de la resolución de problemas como restricción sería más compatible con una perspectiva en filosofía de la ciencia que adopte la “tesis del divorcio”, la separación del contexto de descubrimiento del contexto de justificación. Como intentaré mostrar posteriormente, esto es así aún admitiendo la existencia de algoritmos de descubrimiento con estas características.

Ahora, queda otra alternativa, suponiendo que una perspectiva de la resolución de problemas como búsqueda nos obligue a sostener la división de los contextos ¿Evitaría esto la paradoja de Menón?

La respuesta a esta pregunta dependerá de las condiciones necesarias para que funcione la aproximación heurística a resolución de problemas. Fundamentalmente que la exigencia de precisión del estado inicial y del estado objetivo no implique caer en uno de los cuernos de la paradoja. En una primera aproximación, podríamos decir que la resolución de problemas como búsqueda, en tanto no asegura por medio de las heurísticas que llegaremos indefectiblemente al estado final, no hace trivial la búsqueda. Esta circunstancia puede apreciarse mejor si en lugar de tomar los ejemplos típicos de la teoría de resolución de problemas como los acertijos de la Torre de Hanoi, el Misionero y los caníbales tomamos un tipo de problema como el del viajante de comercio. El problema del viajante puede ser enunciado informalmente de este modo: si un viajante de comercio, partiendo de su ciudad de residencia tiene que visitar exactamente una vez cada ciudad de una lista dada y luego regresar a su casa, puede seleccionar el orden en que las ciudades son visitadas de modo tal que la distancia recorrida en su viaje sea tan pequeña como sea posible, suponiendo que conoce la distancia entre cada par de ciudades. En el caso de este último problema, tenemos un estado inicial bien definido y un objetivo que si bien no es visible como los acertijos antes nombrados, está claramente constreñido. No obstante, la búsqueda del camino que una los dos estados no es trivial en

tanto crece el número de ciudades. El aumento de ciudades puede ser tal que lleve a que el problema no pueda ser solucionado ni siquiera por las más veloces de las computadoras actuales. En síntesis, la complejidad del espacio del problema, a pesar de que puede ser generado con reglas simples y el objetivo estar bastante determinado, no hace trivial la búsqueda del camino hacia la solución.

## **6. Modelo inclusión-restricción de Nickles y la paradoja de Menón**

En *What Is a Problem that We May Solve It?* (Nickles, 1981) encontramos que la paradoja se evita entendiendo que un problema consiste en todas las condiciones o restricciones sobre la solución más la demanda de que se halle o genere la solución (un objeto que satisface las restricciones). Con esto según Nickles, sabemos lo que cuenta como una respuesta, sin tener en realidad la respuesta. El punto importante para el tema en cuestión es que no se tiene desde el comienzo el conjunto de todas las respuestas admisibles sino las restricciones que delimitan el rango de posibles soluciones. Según Nickles la resolución de la paradoja de Menón no presenta dificultades para el modelo de inclusión de restricciones, porque el enunciado de un problema genuino o interrogación es, además de la demanda, ya una descripción de la respuesta- el objeto buscado. Las restricciones no sólo dicen cuando se está ante una solución sino también en qué espacio buscarla, es decir tienen una dimensión heurística.

Elegir caracterizar a la resolución de problemas como búsqueda o como restricción tiene consecuencias importantes en cuanto a la racionalidad del contexto de descubrimiento. Las restricciones, aunque tienen un rol heurístico para guiar la búsqueda de soluciones, pueden no poseer ninguna dimensión heurístico-generativa.

En síntesis, hasta ahora hemos expuestos dos teorías de resolución de problema: el modelo Simon y Newell, dirigido a abordar directamente el problema de la generación científica y el modelo de Inclusión de Restricciones de Nickles, que intenta adecuar la teoría del descubrimiento científico como resolución de problema a la filosofía de la ciencias post Kuhn. Como ya vimos cuando caracterizamos la noción de problema, son dos objetivos que usualmente entran en conflicto, si complejizamos la noción de problema de modo que recoja todas las exigencias que nos indica la filosofía de la ciencia de estos últimos 50 años corremos el riesgo de diluir una de las virtudes de la teoría de resolución de problemas aplicadas al ámbito científico, esto es, la racionalidad de los procesos generativos. Por otro lado, si recurrimos a un modelo heurístico a la Simon, nos quedamos en un modelo simplificado que a lo sumo funciona en dominios o períodos muy restringidos.

## **7. Desafíos generales a la definición de problema y resolución de problemas científicos.**

Meheus y Batens en *Steering problem solving between Cliff Incoherence and Cliff Solitude* (1996) abordan específicamente algunos de los inconvenientes presentados por el modelo inclusión-restricción. Su propuesta es un modelo contextual de resolución de problemas que posee algunas ventajas sobre el modelo inclusión-restricción. Dado que su trabajo plantea minuciosamente requisitos generales para cualquier teoría de resolución de problemas a aplicarse al contexto de descubrimiento, empezaré por señalar los aspectos más significativos de esta propuesta.

En primer lugar, un modelo de resolución de problema debe poder explicar por qué hay diferencias y similitudes notables entre individuos, grupos y tradiciones en la resolución de problemas científicos y por qué

algunos logran antes las soluciones o de un modo más racional que otros. En segundo lugar, una teoría de resolución de problema debe poder explicar por qué una solución es aceptada por la comunidad científica. (Meheus & Batens, 1996: 154).

A partir de estas condiciones o exigencias generales, se articulan cuatro desafíos básicos propios de la resolución científica de problemas. En primer lugar tenemos lo que estos autores denominan desafío de la racionalidad en la resolución creativa de problemas, un desafío que gira en torno a problemas cuya importancia está normalmente asociada a un conjunto de restricciones incoherentes o débiles. La resolución de estos problemas está ligada a restricciones específicas de grupos de investigación o individuos. Como estos individuos o grupos están dentro de una tradición, estas divisiones dentro de la misma producen a su vez otro desafío, el de la relevancia. Cualquier postura no ortodoxa dentro de una tradición queda sujeta a la posibilidad de que su solución no sea relevante para los otros miembros de la tradición. Obviamente la salida inmediata y fácil a este inconveniente reside en pensar que la resolución de problemas creativos se encuentra por encima de estas tradiciones. En otras palabras, que la creatividad es un producto de la resolución de problemas sin restricciones. Esto último es precisamente lo que Meheus, *et al.* entienden como una actividad no racional de la creatividad científica o una resolución no racional de problemas. En otras palabras, en la resolución de problemas científicos, hay una tensión constante entre la racionalidad de los procesos creativos y el reconocimiento de la relevancia creativa por otros miembros de la tradición. Estos autores no hacen más que cambiar los nombres de la vieja paradoja de Menón, pero tienen el valor de conceptualizarla en términos más acordes y funcionales a las teorizaciones sobre el descubrimiento científico. Pero sería injusto limitar hasta ahí sus aportes, la resolución de la misma, apela a mostrar que dentro de la ciencia actual, los posibles resolutores no son individuos o grupos homogéneos. En la diversidad de los sujetos resolutores de problema está el punto de apoyo que servirá para elaborar una salida a

esta tensión entre lo que denominan desafío de la racionalidad y desafío de la relevancia.

Desafío de la racionalidad: es un desafío que surge en la resolución de problemas creativos, dado que muchas veces se tiene que salir de las restricciones sobre las cuales ha sido planteado el problema, o dentro de las restricciones asumidas o reconocidas por el resolutor de problemas. Dependiendo de los puntos de vistas que tome un grupo de investigación, esto será, o bien una selección o una extensión, y en algunos casos un reemplazo de las restricciones contenidas en el problema. Dentro del modelo de Nickles este desafío no puede enfrentarse o justificarse a pesar de que se trata de un modelo cuyo componente esencial son las restricciones del problema. La cuestión no es trivial porque irremediablemente cuestiona que la creatividad pueda ser justificada racionalmente.

Desafío de la relevancia: el problema es por qué una solución es relevante a otros. En la medida que seamos demasiado permisivos con la cantidad de restricciones que forman parte del problema, más difícil se hace que un problema sea considerado el mismo por terceras partes. Esto no significa que las terceras partes deban compartir la solución, sólo se trata que reconozcan que la resolución de un problema pertenece al mismo problema, sea esta compartida o no.

Desafío de la aceptación: consiste en lograr que una resolución que deriva de un conjunto específico de restricciones pueda ser aceptada por la comunidad o tradición cuyas restricciones generales son muy diferentes.

Desafío de la fuerza o coherencia: este es un desafío que caracteriza al modelo de inclusión-restricción de Nickles, cuya motivación central pareciera estar vinculada al objetivo de brindar una caracterización objetiva de problemas en relación a grandes grupos de investigación.

Desafío de la identidad: en la solución de muchos problemas se requiere que aumentemos o varíemos las restricciones del mismo, porque

entonces considerar que cuando llegamos a una solución estamos solucionando el problema inicial.

En la siguiente figura esquematizo estos cuatro desafíos presentados por Meheus.



Los inconvenientes que surgen cuando consideramos estos cuatro desafíos respecto al modelo de Nickles, fundamentalmente el hecho de que la resolución de ciertos problemas creativos no puede ser considerada racional a partir de dicho modelo, llevaron a Meheus y Battens a proponer el modelo contextual de resolución de problemas (1996).

## 8. Modelo contextual de resolución de problemas.

Se trata de un modelo que, como dije más arriba, es un mejoramiento de la línea seguida por el modelo inclusión-restricción de T. Nickles. Básicamente, este modelo jerarquiza las restricciones que definen a un problema de manera tal que cambios en algunas de ellas no lleven necesariamente a producir otro problema. A diferencia de Koertge, cuya propuesta radicaba en no permitir que el inclusionismo borrara la dimensión heurística del modelo de problema (una propuesta interesante, que resalta la importancia de modelos tipo Simon), estos autores proponen clasificar las restricciones y permitir su inclusión o no, de acuerdo a los cuatro desafíos. Veremos luego si estas dos propuestas, la de Koertge y Meheus *at al.* son incompatibles o complementarias en relación a modelos de resolución de problemas. El modelo contextual, para poder clasificar las restricciones que hacen posible responder a los desafíos antes aludidos, supone que un modelo de resolución de problemas debe contar con los siguientes elementos:

- i. un problema
- ii. certezas
- iii. enunciados relevantes
- iv. instrucciones metodológicas. (Meheus & Batens, 1996: 161)

En este modelo (ii)-(iii) son restricciones sobre (i) siendo solamente la segunda constitutiva del problema. En otras palabras no todas las restricciones que pueden estar asociadas a un problema lo

individualizan, sólo las certezas poseen esta cualidad. Un problema es tomado aquí en un sentido estrecho, como objetivo a ser alcanzado y las restricciones como aquello que le da significado al problema. La interpretación del problema, su espacio lógico, los modos y medios para atacarlo, así como las condiciones que fijan su resolución son determinados por las restricciones (i)-(iv). (Meheus & Batens, 1996: 161)

La restricción certeza es la clave en este modelo. Son restricciones que no son cuestionadas dentro del contexto y especifican el espacio lógico del problema. Su función es determinar el significado de las entidades que tienen lugar en las otras restricciones. Como ejemplo de esta restricción citan la aceptación por parte de Kepler de la evidencia de que las órbitas planetarias son circulares cuando comenzó a trabajar con la órbita de Marte. Sólo las órbitas circulares eran consideradas soluciones posibles por Kepler. Cae también bajo la restricción certeza, lo que determina parcialmente las operaciones que se consideran justificadas. En otras palabras, la lógica subyacente al contexto considerado.

El tercer elemento, y segunda restricción, está constituido por los enunciados relevantes que a diferencia de las certezas solamente imponen condiciones sobre la solución correcta. Poseen un rol positivo y negativo: permiten derivar la solución correcta y eliminar posibles soluciones.

Por último tenemos el cuarto elemento y tercera restricción, las instrucciones metodológicas que especifican las operaciones que deben o deberían realizarse en la búsqueda de la solución. (Meheus & Batens, 1996: 163). Este tipo de restricción hace referencia a los métodos heurísticos de resolución de problema tales como análisis medio-fin o heurísticas generales que guían los procesos de resolución de problema.

Para Meheus el carácter de cada restricción puede variar en diferentes contextos, lo que es una certeza en un contexto puede llegar a ser un enunciado relevante en otro contexto. No parece ocurrir lo mismo con la restricción denominada instrucciones metodológicas. Meheus no hace esta distinción. Más adelante veremos que este es un defecto de su

modelo pues se vuelve en contra de sus propios objetivos de lograr un modelo racional de la creatividad científica.

Este es un problema importante en relación a uno de los objetivos de mi trabajo, esto es, tratar de determinar en qué medida se puede asociar la racionalidad del descubrimiento a la existencia de heurísticas generales o específicas con cierta independencia contextual. Las consideraciones que Meheus realiza sobre las instrucciones metodológicas, hacen que difiera también de la interpretación amplia que le da a la palabra “problema” como todo aquello que tiene la propiedad de ser alcanzado. En la idea de problema que intento defender, en consonancia con el modelo de Koertge, Simon y Reitman, no son parte de la noción de problema los métodos que llevan a su resolución aunque sí tal vez los productos de estos métodos o procesos a partir de las condiciones iniciales del problema. En otras palabras, difiero con que sea común en ciencias cognitivas tal interpretación de problema, aunque acuerdo que dicha interpretación es adecuada al uso en filosofía de la ciencia, en especial el modelo inclusión-restricción de Nickles.

Respecto a las consecuencias de este modelo para la distinción entre problemas bien y mal definidos acuerdo plenamente y creo que es una confirmación de lo manifestado anteriormente, la independencia de las instrucciones metodológicas respecto a los elementos contextuales del problema. Para ser más preciso, es importante aclarar que para Meheus un problema no es mal definido si en el momento de su surgimiento los enunciados relevantes son incompletos o inciertos. Un problema sería bien definido para este modelo “si y sólo si dado el conjunto de certezas, los enunciados relevantes y las instrucciones metodológicas determinan una respuesta única a la solución correcta del problema” (Meheus & Batens, 1996: 164).

Meheus considera además que determinar si un problema es bien o mal definido es una cuestión de tipo empírica y bajo ninguna circunstancia es *a priori*. Vimos anteriormente que Reitman, referencia obligada en la distinción entre problemas bien y mal estructurado,

advertía que esta clasificación no era coincidente con la distinción entre formal y empírico. Usamos esta distinción para preguntar si el carácter irreductiblemente empírico de los problemas bien definidos puede llevarse también a los problemas formales. En este sentido, la propuesta de Meheus parece no hacerse eco de los desarrollos en teoría de la computación, donde hay intentos de avanzar en una dirección contraria a su propuesta. Al hacer esta crítica tengo en mente la epistemología de la indagación confiable de Kevin Kelly. Establecer este tipo de relaciones tiene como objetivo considerar si los avances de estas ciencias pueden brindarnos un concepto de problema y su resolución que muestre diferencias con los modelos de Nickles y Meheus fundados más en una versión de problemas ligados a una filosofía de la ciencia historicista post-kuhniana.

Por último, Meheus sostiene que los mecanismos inconscientes juegan algún rol importante en la resolución de problema y que su influencia no pone en tela de juicio la racionalidad del modelo contextual. En este sentido sigue la idea subyacente al modelo Newell y Simon de la creatividad como proceso no consciente pero guiado. En otras palabras, la existencia de procesos inconscientes es compatible con modelos computacionales de resolución de problemas basados en reglas y desde una perspectiva actual no es un desafío importante a los modelos racionales de resolución de problema del descubrimiento científico.

Las exigencias y desafíos a un modelo de resolución de problema cobran dimensión cuando se intenta utilizarlos para abordar la actividad científica en todos sus aspectos, principalmente, como hemos visto anteriormente, respecto a los cambios y elección de teorías. A diferencia de lo que ocurre con simples acertijos lógicos o ciertos tipos de problemas formales, la aceptación y relevancia de los problemas científicos es una cuestión más compleja que ha llevado inclusive a cuestionar la objetividad de ambas nociones. En este sentido, para Meheus, un problema y sus restricciones son definidos respecto a un sistema de conocimiento y prácticas relacionadas. La dificultad antes planteada reside en decidir qué sistemas y prácticas relacionadas llevan a

una definición determinada o a una definición general de problema y sus restricciones. (Meheus & Batens, 1996: 166). Los candidatos posibles podrían ser grupos de investigación, tradiciones de investigación y disciplinas. El tamaño de estos candidatos afecta los desafíos presentados por Meheus de modo que cuando más pequeños sean, más difícil será responder a los desafíos de la relevancia y aceptación. Por otro lado, mientras mayores sean las unidades de referencia, más problemático será satisfacer los desafíos de la racionalidad y coherencia/fuerza.

En este modelo, por lo tanto, el problema se traslada a decidir qué prácticas y sistema de conocimiento deben ser individualizados para definir el problema y relacionarlos con los desafíos a los que el modelo debe responder. El modelo contextual se aparta del modelo de problemas de Nickles al no sostener la objetividad de los problemas, ni siquiera dentro de una misma tradición de investigación. Esto hace que se consideren como relevantes las diferencias entre las restricciones del resolutor de problemas y otros investigadores dentro del dominio. Un caso especial de esto es la relación entre restricciones propias y las compartidas por grupos mayores.

### *Las ventajas del modelo contextual*

El modelo contextual presenta algunas ventajas frente a los modelos que presenté más arriba. Estas pueden resumirse de la siguiente forma,

a) Da la posibilidad de entender desde dos perspectivas los problemas mal definidos: Los problemas pueden ser mal definidos para el resolutor aunque pueden ser bien definidos con respecto a restricciones generales.

b) El agregado de nuevos enunciados relevantes o nuevas instrucciones metodológicas o el reemplazo de antiguas, no tiene influencia en el significado del problema. Un problema no cambia de significado a menos que cambien las certezas. (Meheus & Batens, 1996:

173). Si un matemático decide en algún punto seguir una heurística diferente para una prueba dada y no cambia nada más, entonces está tratando con el mismo problema.

c) El término creatividad cobra un sentido específico sin atarse a la concepción romántica del mismo. Resolver un problema creativamente significa resolver un problema mal definido, un problema cuya certezas, ítems relevantes e instrucciones metodológicas no determinan una única solución. Esta vinculación del modelo de problema con sus elementos constitutivos, lleva a que la resolución no racional de problemas bien definidos no sea considerada como creativa.

d) Al dejar lugar a las restricciones individuales del resolutor de problemas (sea individuos o grupos) puede explicarse racionalmente la resolución de un problema en aquellos casos en los que una tradición de investigación no posea las restricciones necesarias para resolver el problema.

e) Esto lleva obviamente a explicar por qué “ningún modelo de resolución de problemas es capaz de enfrentar el desafío de la racionalidad a menos que defina un problema y sus restricciones con respecto a los resolutores reales de problemas” (Meheus & Batens, 1996: 170)

Dada esta exposición crítica de las principales teorías de resolución de problemas, ya estamos en condiciones de relacionar los aspectos esenciales de esta noción. En pocas palabras, la preocupación central está en determinar en qué medida entender el descubrimiento desde la perspectiva de resolución de problemas puede darnos una mejor comprensión del contexto de descubrimiento y si existe una dimensión heurística de este contexto. En términos tradicionales podemos decir que se trata de determinar si existen reglas en dicho contexto, reglas que de algún modo permitan hablar de racionalidad del mismo.

## 9. Componentes generales de la noción de resolución de problemas

Como vimos en el capítulo anterior sobre la definición de problema, la pregunta acerca de qué es un problema nos lleva a considerar los siguientes componentes: situación inicial, operadores y criterios o métodos de resolución,

Por otra parte, un problema en una situación determinada está asociado a estos tres niveles:

a) Tareas de dominio: situación u objetivo que definen objetivamente al problema.

b) Espacio del problema: La representación del dominio mediante objetos, relaciones, operadores y restricciones sobre operadores.

c) Estrategias: búsqueda heurística, extraer información sobre la estructura del espacio usando información para guiar la búsqueda, elección de nodos, elección de operadores, *Breadth*, *depth*, *best-first*, búsqueda de progresiva profundización.

Un aspecto importante a considerar es que las estrategias pueden o no garantizarnos la obtención del objetivo deseado. Las estrategias sin garantías son llamadas heurísticas, las estrategias con garantía son llamadas algoritmos.

Un hecho importante que brindaron los estudios empíricos sobre resolución de problemas es que usualmente la búsqueda eficiente requiere sacrificio de garantía y sacrificio de optimalidad. En otras palabras, existe una tensión constante entre optimizar y satisfacer.

La selectividad de las heurísticas o algoritmos viene del conocimiento de la estructura del problema; es un elemento fundamental de lo que usualmente se conoce como búsqueda heurística y que contrasta con lo que se denomina variación ciega en la que ninguna información de la situación del problema privilegia algún tipo de acción determinada.

De todos modos la versión heurística de la resolución de problemas es compatible con errores; de hecho esto es lo que hace que se busque satisfacción y no la optimización.

En cuanto a las estrategias, podemos distinguir entre los denominados métodos débiles y métodos fuertes. Los métodos débiles usan poco conocimiento del dominio y son generales. Entre los más comunes tenemos:

- a) Subiendo a la colina, que usa una medida de progreso para guiar la búsqueda.
- b) Recocido simulado: camino sarandado, evita máximos locales.
- c) Dividir y reinar: soluciona subproblemas.
- d) Análisis medio-fin: nota diferencias y toma acciones.
- e) Métodos de satisfacción de restricciones: programación lineal y otros procedimientos algorítmicos.

Cada método posee cierto sesgo que lo caracteriza y permite a partir de esto clasificaciones generales que nos dan tipos diferenciados para obtener resoluciones de problema.

## **10. Estrategias de resolución de problemas**

### ***10.1. Resolución de problemas como búsqueda:***

Se postula algún tipo de espacio donde la solución está oculta. Se construye una estructura de símbolos que modela este espacio y operadores que alteran esta estructura de símbolos llevando de un nodo a otro. Resolver un problema para esta metáfora consiste en buscar el

modelo del espacio moviendo de un nodo a otro junto con los vínculos que los conectan hasta que se encuentre la solución.

### ***10.2. Resolución de problemas como razonamiento:***

Se postula un sistema de lógica que nos permita deducir nuevos enunciados a partir de axiomas y enunciados previamente deducidos. Presentamos un problema mediante un conjunto de axiomas en el lenguaje formal de nuestra lógica. En esta metáfora, resolver un problema consiste en acumular sucesivamente información hasta que se encuentre la respuesta al problema.

### ***10.3. Resolución de problemas como satisfacción de restricciones:***

Se postula un conjunto de objetos y varios subconjuntos definidos por las restricciones que satisfacen. En esta metáfora, resolver un problema consiste en reducir el conjunto original a un subconjunto o un único objeto que satisfaga todas las restricciones.

De estas tres formas de entender la resolución de problemas sólo la resolución de problemas como búsqueda está dirigida a descubrir nuevos objetos o procesos. En la metáfora de satisfacción de restricciones desde el inicio el espacio del problema está completo, restando sólo desechar lo que no se ajusta a las restricciones establecidas. En la metáfora de razonamiento, obviamente por el carácter deductivo, la información ya se encuentra en los axiomas o enunciados de partida. }

Estas consideraciones llevan a que problemas de descubrimiento son aquellos que requieren de la generación del espacio del problema para producir u obtener el estado objetivo. Es a partir de estas características que el modelo de resolución de problema como búsqueda puede ofrecerse como una variante a la paradoja de Menón, la solución

no se encuentra al inicio del problema, y las restricciones que impone los objetivos y los operadores permiten identificar la solución correcta. Pero, vale aclarar, que este modelo en principio no resulta plausible para problemas bien definidos o bien estructurados. Cuando veamos este tipo de problema veremos que no es claro que dicha paradoja pueda resolverse con un modelo racional de resolución de problemas.

Sobre la paradoja de Menón y su relación con el descubrimiento existe cierta discusión que toca aspectos cruciales de la vinculación entre racionalidad y método. Polanyi sostiene que el único modo de hacer frente a esta paradoja es mediante la admisión del conocimiento tácito. En otras palabras, que el conocimiento tácito es necesario para resolver dicha paradoja de modo que deje lugar a la resolución problemas creativos. En *Discussion: The Meno Paradox* Simon alega que las premisas de Polanyi son falsas y que una salida no racional a esta paradoja no es necesaria, por lo menos por la vía propuesta por Polanyi.

La tesis de Polanyi es que “podemos conocer más de lo que podemos decir” (Polanyi, 1966: 4). Dicha afirmación encuentra apoyo empírico en un conjunto de procesos cognitivos que hacemos, como en el hecho que podemos reconocer rostros sin poder expresar cómo lo hacemos. (Polanyi, 1966: 4-7) o en cómo comprendemos la conducta de otra persona mediante procesos empáticos no conscientes (Polanyi, 1966: 16-17).

...si todo conocimiento es explícito, capaz de establecerse claramente, entonces no podemos conocer un problema o buscar su solución (Polanyi, 1966: 21-23)

Simon va a mostrar que no es posible argumentar a favor de la tesis del conocimiento tácito usando la paradoja de Menón. Partiendo de un sistema formal determinado S, dirá que a tal sistema se lo pondrá ante un problema generando un formula bien formada P y estableciendo la tarea de determinar si P es un teorema de S. En este caso, sabremos que estamos buscando, una secuencia de fórmulas bien formadas tal que cada miembro es una consecuencia de algunos miembros previos y P es el

miembro final. Ahora, si suponemos además que hay un procedimiento efectivo para determinar si una expresión dada en S es una fórmula bien formada, que indicaría que hay un procedimiento efectivo para determinar si una fórmula bien formada dada es un axioma, y que disponemos de un procedimiento efectivo para determinar si una fórmula bien formada dada C es una consecuencia directa de algún otro conjunto de fórmulas bien formadas. El procedimiento efectivo nos permite determinar si un objeto presentado ante nosotros es una de tales secuencias.

De esto puede verse según Simon, que nuestra habilidad de conocer lo que estamos buscando no depende de tener un procedimiento efectivo para buscarlo: necesitamos sólo un procedimiento efectivo para probar posibles candidatos.

Independientemente de la validez de esta crítica a la posición de Polanyi, el problema que deja abierto es si la salida que propone es a costa de perder la racionalidad del contexto generativo. Cuando pasamos de demostradores de teoremas de sistemas decidibles a no-decidibles el procedimiento efectivo queda vinculado a los procesos test y no a los procesos de tipo generativos. En otras palabras, podemos admitir la innecesariedad del conocimiento tácito en demostración de teoremas sin entrar en contradicción con la paradoja de Menón, pero lo hacemos pagando el precio de la pérdida de racionalidad de los procesos generativos.

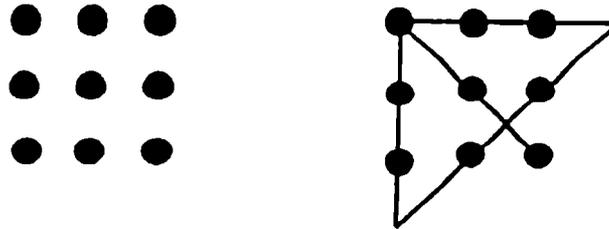
La pregunta que queda pendiente entonces es qué sucede con problemas complejos o mal definidos, ¿pueden entenderse con la metáfora de búsqueda? o ¿son problemas que requieren de otros tipos de suposiciones para su resolución? Veamos los distintos tipos de alternativas que se han propuesto.

En primer lugar, tenemos la resolución de problemas por medio de ensayo y error. Es una concepción del aprendizaje seguida entre otros por el conductismo. En filosofía de la ciencia ha sido reivindicada por filósofos que, a diferencia de conductismo, sostienen la existencia de

entidades teóricas. En relación al descubrimiento, su forma más elaborada la tenemos en los escritos de Campbell y Popper sobre epistemología evolucionaria o evolucionista. La idea básica de esta aproximación es dar por supuesto que existe la innovación o la resolución creativa de problemas en el sentido que vimos en Shanker, y que la única forma de explicar esta emergencia o novedad es mediante la variación ciega y retención selectiva. Si la generación no es ciega, no es posible hablar de creatividad o innovación porque ya estaríamos con anterioridad en posesión de lo que buscamos o intentamos producir. La concepción evolucionista del descubrimiento asume la paradoja de Menón y cree que la única salida posible es postular el modelo de variación ciega y retención selectiva (VC+RS). Es éste el argumento que específicamente usa Campbell en su trabajo *Evolutionary Epistemology* (Campbell, 1974), donde subordina a mecanismos de variación ciega a cualquier tipo de producción de conocimiento totalmente nuevo. Esto no significa que excluya la posibilidad de heurísticas en la producción de conocimiento no creativo; por el contrario, cree que la epistemología evolucionista es compatible con la concepción de Simon de resolución de problemas científicos, pero con la salvedad de que no le es posible a esta última avanzar más allá de lo conocido. Campbell, a diferencia de Popper, admite a cierto nivel la existencia de heurísticas en la ciencia, pero no admite que mediante las mismas podamos elaborar una teoría general de descubrimiento científico. Esta forma de entender la resolución de problemas creativos, que ha ejercido una larga y profunda influencia en la comunidad filosófica, constituye uno de los desafíos más importantes para una teoría racional o heurística de entender el descubrimiento científico. Es por esta razón que más adelante ofreceremos un análisis detallado de la misma con sus reformulaciones más recientes.

#### *10.4. Resolución de problemas como eliminación de fijaciones*

Como mencioné anteriormente, los estudios y teorizaciones sistemáticas sobre resolución de problemas comenzaron con los psicólogos de la Gestalt o psicología de las formas. La monografía de Duncker (*On problem solving* 1945) es considerada por todos los investigadores sobre resolución de problemas como la primera contribución sistemática al campo. Anteriormente mencioné algunas características de esta teoría en relación al concepto de problema; ahora intentaré sintetizar los aportes al concepto de resolución de problemas. En líneas generales, podemos decir que su valor principal radica en haber vislumbrado, a partir de ejemplos concretos, la dimensión heurística en la resolución humana de problemas. ¿Qué significa esto? Significa que en problemas que en un principio son difíciles, porque no está claramente establecido el estado final u objetivo, los seres humanos no se conducen ciegamente cuando proponen las soluciones posibles. Los protocolos verbales de sus experimentos mostraron que siempre existe lo que denomina un “valor funcional” que guía las alternativas propuestas como solución. En los problemas que trató, existe un elemento clave, cuyo reconocimiento lleva directamente a la solución. No hay un acercamiento progresivo al objetivo; por el contrario, hasta que no se encuentra el elemento clave, no se hacen avances productivos. Dentro de esta corriente, al hablar de resolución de problemas, se está haciendo referencia a dos aspectos distintos de los procesos resolutivos. En primer lugar, está la idea que podríamos denominar “la explicación del error”, identificado por la “fijeza funcional” como el obstáculo que impide el libre desenvolvimiento de los procesos exitosos de resolución de problemas. Resolver un problema bajo esta categoría significa eliminar información o métodos que encasillan al sujeto en alternativas no exitosas. El clásico ejemplo que ilustra esto es el problema de unir nueve puntos con sólo 4 rectas.



**Problema de los nueve puntos y su solución**

En este ejemplo quien intenta resolver el problema no se da cuenta de que puede trazar líneas que no dejen una figura cerrada; los procesos de resolución no muestran signos de progreso, produciendo frustraciones que pueden llevarlo incluso a desistir del problema.

Otra forma de entender la resolución de problemas dentro de esta metáfora, que puede o no ser complementaria de la mencionada anteriormente, es la que sostiene que podemos resolver problemas mediante el reconocimiento perceptual de patrones. Resolver un problema de acuerdo a esta concepción es más reconocimiento que búsqueda. Como se considera que dicho reconocimiento se produce en lapsos de tiempo muy breves, se lo asocia a un tipo de heurísticas distintas al modelo Simon-Newell. Son heurísticas globales, heurísticas que no suponen una serie de pasos graduales hacia el objetivo.

La concepción gestáltica de resolución de problemas no fue ajena a la epistemología evolucionista; fue considerada por Campbell en su trabajo *Blind variation and selective retention in creative thought and other knowledge processes* (Campbell, 1987). Admite que es un modelo que tiene elementos como para hacer frente a una teoría de la creatividad científica (a diferencia de las heurísticas computacionales de Simon, que no pueden avanzar hacia lo no conocido), pero considera que los procesos de *insight* que integran esta concepción de creatividad pueden deberse en última instancia a procesos subyacentes de variación ciega.

La concepción gestáltica fue muy innovadora en su momento, pero le faltó una teoría detallada de cómo se representa el conocimiento y de los mecanismos que producen tales procesos creativos. Esto sigue siendo así, no es todavía claro que los modelos conexionistas y los modelos dinámicos instancien algunos de los principios gestálticos antes mencionados.

### ***10.5. Resolución de problemas como búsqueda en espacio del problema.***

La resolución de problemas como búsqueda en el espacio de problemas constituyó la forma predominante de entender la resolución de problemas hasta el advenimiento del conexionismo a mediados de los 90. La clave en esta aproximación está en la noción de espacio del problema y su transformación o generación. La idea de búsqueda estaba ya implícita en la concepción gestáltica, pero como expresé más arriba, faltó una explicación de los mecanismos que materializaran artificialmente los pasos cruciales que llevaban a la solución. La metáfora de búsqueda no sólo ofreció una explicación de los mecanismos para la resolución de problemas interesantes sino que brindó también la presentación de los mismos en forma de programas. Para muchos, esto último constituyó el aporte fundamental y lo distinguió claramente de otras aproximaciones.

No obstante, si uno hace una reconstrucción histórica más precisa de cómo se dio la evolución dentro de esta teoría de la relación entre resolución de problemas y descubrimiento, encuentra que la parte computacional si bien ha sido importante a partir del famoso *The Logic Theorist* (Newell, Shaw & Simon, 1963) (Newell & Simon, 1957), los progresos más significativos sobre descubrimiento aparecieron recién a mediados de los 70 con los trabajos *Problem solving and rule induction: A unified view* (Lea & Simon, 1974) e *Information processing, data inferences and scientific generalization* (Gerwin, 1974). Estos dos trabajos fueron claves en la evolución de los modelos computacionales

de descubrimiento científico y en la vinculación entre descubrimiento y resolución de problemas. En lo que sigue describiré sintéticamente cada uno de estos aportes y la impronta que dejaron.

## 11. Resolución de problemas y espacios del problema.

El principal aporte de *Problem solving and rule induction: A unified view* (Lea & Simon, 1974) consistió en haber señalado que en la resolución de ciertos problemas (por ejemplo problemas criptoaritméticos<sup>2</sup>) la búsqueda no tiene lugar en un solo espacio sino en dos. Hasta ese momento resolver un problema significaba buscar en un espacio de datos, que podían ser tanto los datos iniciales, como las transformaciones posteriores de esos datos por medio de operadores. La novedad que trajo este trabajo es que ciertos problemas se resuelven buscando también en un espacio de reglas o hipótesis. Es decir, mostró la importancia que tenían los espacios del problema y que no debía restringirse a un solo espacio como se había hecho hasta ese momento.

Estas nuevas ideas ofrecieron una estructura más adecuada para entender la resolución de problemas científicos que necesitaban de una versión más compleja de los espacios del problema. A fin de comprender esta característica hay que señalar que el razonamiento científico no sólo ha sido considerado desde la óptica de resolución de problemas sino también desde la formación de conceptos, un punto de vista que sostiene que gran parte del razonamiento científico consiste en formar nuevos conceptos vía inducción sobre la base de evidencia experimental (Klahr,

---

<sup>2</sup> El problema tratado consistía en encontrar una asignación de enteros de 0 a 9 a las letras de la palabras DONALD, GERALD y ROBERT tal que: cada entero le es asignado una única letra y cada letra tiene un único entero, y la asignación satisface la ecuación: DONALD+GERALD=ROBERT. A la letra D se le asigna desde un comienzo el número 5.

2000: 27). El Inductor de Reglas Generalizado (*Generalized Rule Inducer*), propuesto por Lea y Simon, considera que ambas actividades - aprendizaje de conceptos y resolución de problemas- son sistemas de procesamiento de información que emplean procesos de búsquedas guiados. Lo que los diferencia es que lo hacen sobre espacios distintos. Esta unificación en una estructura común de dos actividades que parecían notablemente diferenciadas permitió abordar lo que se conoce como tareas de inducción de reglas, que incluye cuestiones tales como extrapolación de secuencias, inducción de gramáticas y adquisición conceptual.

Un ejemplo de inducción de reglas es el célebre experimento 2-4-6 de Wason (Wason, 1960) en el que se les da a los integrantes del experimento triplos como el 2-4-6, 8-10-12 y se les pregunta qué regla tiene el experimentador en mente. Resolver este problema requiere buscar en dos espacios: un espacio de reglas y un espacio de instancias. Es decir, los involucrados en el experimento buscan primero hipótesis acerca qué regla subyace a todos los triplos y también buscan triplos que sirvan de instancias para testear la regla encontrada.

Lo importante en estos experimentos es que muestran que no hay que testear las reglas propuestas directamente, sino que previamente se debe buscar una buena instancia. Debido a la necesidad de buscar en dos espacios el test opera en un espacio diferente del generador de hipótesis (regla). Pero, la información de cada espacio guía la búsqueda en otro espacio. La información de reglas previamente generadas puede influenciar la generación de instancias, y la información acerca de la clasificación de instancias determina la modificación de las reglas. Entender que a diferencia de la resolución de problemas la inducción de reglas requiere de dos espacios fue un paso decisivo para aplicar la teoría de resolución de problemas al descubrimiento. En el descubrimiento científico también ocurre algo similar, la búsqueda puede realizarse entre un espacio de datos y un espacio de hipótesis que intenta explicarlos o predecirlos.

Este reconocimiento de que el descubrimiento es una búsqueda en dos espacios llevó posteriormente a una interesante investigación sobre como operaban estos dos espacios, cuál era su estructura interna y si había o no la necesidad de incorporar más espacios.

### ***11.1. Del modelo de descubrimiento científico como búsqueda dual a búsqueda en múltiples espacios.***

En *4-Space Model of Scientific Discovery* Schunn y Klahr (1995) proponen dividir el modelo dual en cuatro espacios: El espacio de hipótesis del modelo dual, se divide en espacio de representación de datos y en un espacio de hipótesis. Por otro lado el espacio de experimentos se divide en espacio de paradigmas experimentales y espacio de experimentos. Veamos que significan cada uno de estos nuevos espacios.

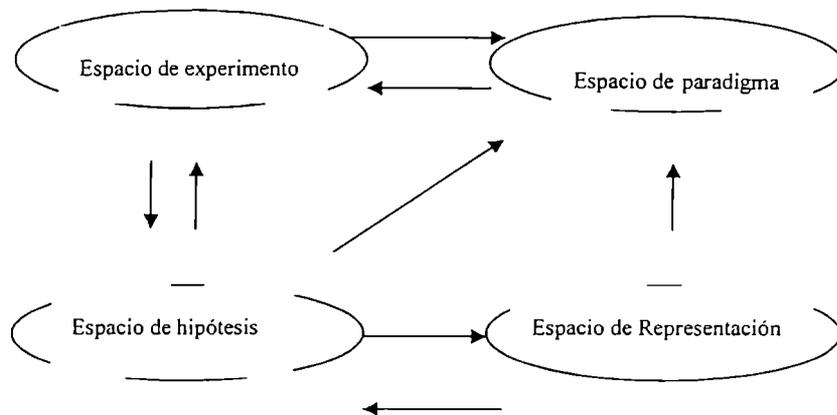
a) Espacio de representación de datos: se eligen representaciones o abstracciones de los datos a partir de posibles características.

b) Espacio de hipótesis: se extraen relaciones causales de los datos usando el conjunto de características de la representación corriente.

c) Espacio de paradigma experimental: una clase de experimentos se elige que identifique los factores a variar, y los componentes que se mantendrán constantes.

d) Espacio de experimentos: se configuran los parámetros dentro del paradigma elegido.

Los experimentos llevados a cabo por Schunn y Klahr mostraron no sólo la necesidad de extender la cantidad de espacio sino que los mismos están interconectados y dependientes.



(Schunn, & Klahr, 1995: 40)

La multiplicidad de los espacios o la extensión de los mismos plantean cuestiones interesantes tales como por qué estos espacios o por qué sólo estos espacios. Pero, el punto que quiero destacar es que en relación al concepto de resolución de problemas, ir más allá de los dos espacios puede significar la necesidad de abandonar algunos principios de la teoría clásica de resolución de problemas. Específicamente, la extensión a espacios de experimentos puede salirse del esquema de resolución de problemas de Simon. Con esto quiero decir que no es evidente, por ejemplo, que podamos concebir todas las posibilidades de las prácticas experimentales desde una representación simbólica interna.

Espacio de paradigmas experimentales: Podría resumirse este espacio como la búsqueda de nuevos métodos para recolectar datos (Schunn, & Klahr, 1995: 42). La importancia de este espacio se debe a que es improbable la existencia de métodos generales para realizar la tarea de recolección de datos. Es una tarea que no está necesariamente atada a la creación de nuevos instrumentos, aunque en algunos casos puede serlo. Los experimentos llevados a cabo por Schuman *et al.* muestran que lo que guía a los procesos de este espacio es el testeo de hipótesis y no su refutación. Los paradigmas son creados en base a las suposiciones de la hipótesis y a través de analogía con otros paradigmas.

Espacio de experimentos: El objetivo de este espacio es seleccionar los experimentos posibles. Dos heurísticas guían esta selección de acuerdo al modelo de los autores antes mencionados: heurística de examen y heurística de discriminación. La heurística de examen selecciona experimentos que directamente demuestran los efectos hipotetizados. Por ejemplo, una hipótesis sobre la conducta de los ácidos en la presencia de agua lleva a la selección de un experimento mediante agua. La heurística de discriminación selecciona experimentos que pueden discriminar entre las hipótesis rivales bajo consideración. (Schunn, & Klahr, 1995: 42)

Por otro lado, los objetivos prácticos de la selección de experimentos son alcanzados a través de procesos denominados manejo de complejidad y regulación de riesgo. El manejo de complejidad implica regular la complejidad del diseño del experimento y la interpretación de la complejidad, donde la complejidad se define en relación al estado corriente de comprensión y pericia experimental. Regulación de riesgo implica elegir experimentos basados en la probabilidad percibida para producir un resultado informativo. (Schunn, & Klahr, 1995: 42).

Espacio de representación de datos: la falta de un lenguaje que sirva para representar cualquier tipo de datos hace que la elección y generación de distintos tipos de representación sea una cuestión difícil de alcanzar. Las investigaciones sobre cambios de representación han ofrecido algunas respuestas parciales que están lejos de ser completas. Algunas de las heurísticas que han sido detectadas son las siguientes:

Detectar invariantes: detectar regularidades y elegir nuevas representaciones que enfatizan estas regularidades.

Analogías: producir representaciones mediante analogías con fenómenos previamente entendidos.

Búsqueda por fuerza bruta: proceso de buscar azarosamente a través de un conjunto de representaciones de los objetos en el medio.

Espacio de hipótesis: el proceso fundamental es la inducción fragmentada, la construcción fragmento por fragmento de la hipótesis. Una vez que se generó el primer fragmento de hipótesis los procesos de alcances determinan la generalidad o el ámbito de la hipótesis. Por ejemplo un biólogo podría hipotetizar que una enzima funciona en un cierto modo cuando la temperatura ambiente está entre 40 y 50 grados.

Con una o más hipótesis como *input*, el proceso de abstracción genera hipótesis más generales. Existen muchos mecanismos para la producción de hipótesis, como el mapeo representacional que usa dos heurísticas, la heurística de función única que favorece el mapeo de objetos cuando no se conoce ninguna otra función. La heurística de determinación del mismo tipo favorece el mapeo de objetos sobre cosas de la misma dimensionalidad.

Espacio de Instrumentos: Thagard en *Ulcers and bacteria I: Discovery and acceptance* (Thagard, 1998a) y en *Ulcers and bacteria II: Instruments, experiments, and social interactions* (Thagard, 1998b) propone considerar la necesidad de incorporar un espacio de instrumentos. La idea que subyace en la propuesta de Thagard es que el descubrimiento y la evaluación de la teoría bacterial de las úlceras habría sido imposible sin la existencia de varios instrumentos científicos que hacen posible el examen de las bacterias y el sistema gastrointestinal. Instrumentos como los microscopios, endoscopios y otras tecnologías jugaron un rol crucial en las investigaciones de la *Helicobacter pylori* y las úlceras. (Thagard, 1998b: 317)

Sin embargo, los trabajos de Thagard ya suponen la existencia de dichos instrumentos y no parece existir la necesidad de decidir entre varios tipos de instrumentos, o de producir algunos totalmente nuevos, para cada uno de los procesos involucrados. Es decir, no hay un tratamiento de las heurísticas involucradas en el espacio de instrumentos que haga racional la generación o elección de los mismos. Una alternativa sería considerar a este espacio como parte del espacio de experimento y usar las heurísticas de este espacio. Si bien, como señalé

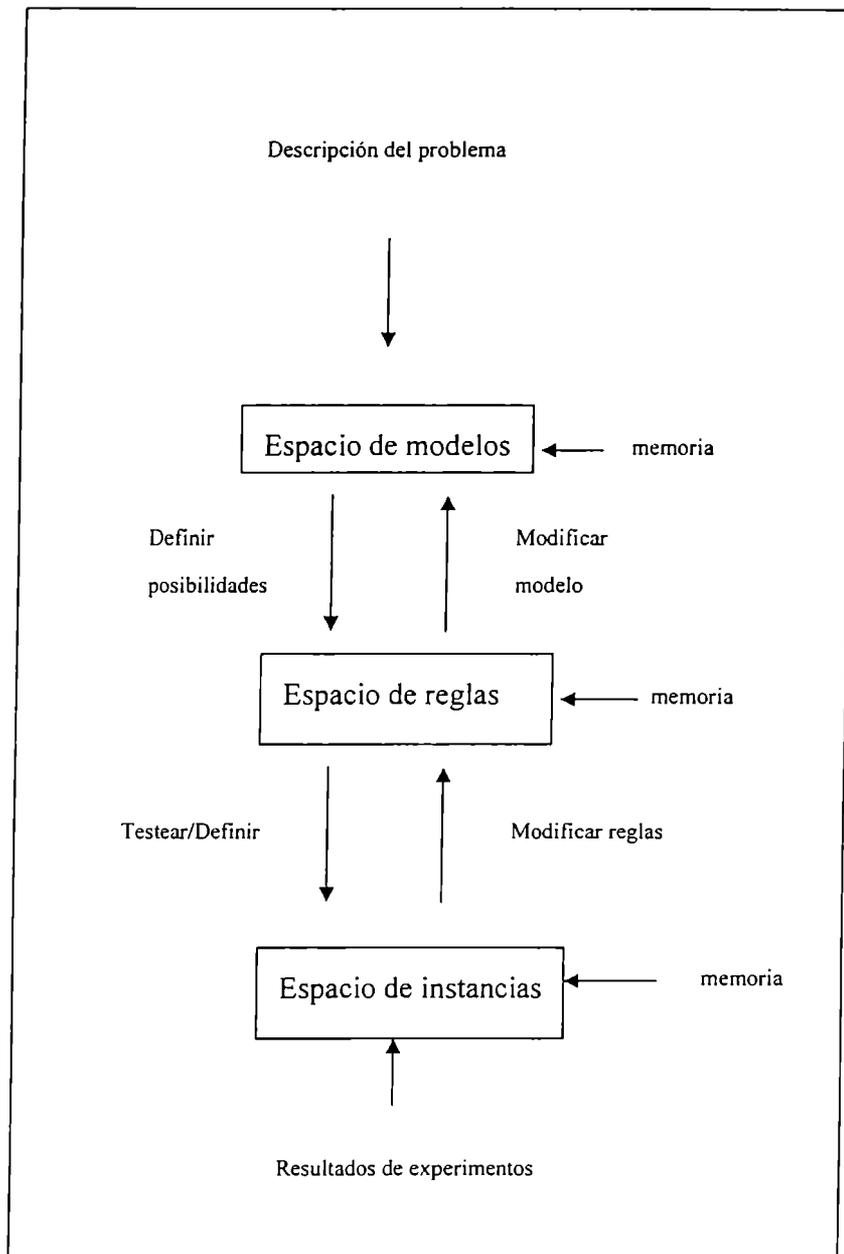
más arriba, existe una asociación entre métodos e instrumentos, las heurísticas o restricciones para la generación de instrumentos no pueden suplantarse por las de elección y generación de métodos.

La extensión de espacios para resolver un problema determinado depende del resolutor de problema. Ciertas búsquedas o procesos en un espacio pueden no ser necesarias en un experto. Por ejemplo, el conocimiento experto en un tema puede evitar la necesidad de buscar representaciones de datos o del tipo de modelo experimental a proponer para casos determinados. Esta característica ha hecho que se considere que la necesidad de extender los espacios a dos o más sea una cuestión relativa. No seguiré ahondando en esta dirección; mi preocupación con el problema de los espacios radica en tomar como dado que en algunos casos son necesarias algunas extensiones y tratar de determinar qué tipo de heurística, modelo de descubrimiento o paradigma computacional son necesarios para explicar el funcionamiento de tales extensiones. Es decir, dimensionar en qué medida una concepción limitada de los espacios de resolución de problemas científicos conspira contra una teoría general de descubrimiento como resolución de problemas en el sentido que le da a esta hipótesis H. Simon y seguidores.

### ***11.2. Modelo jerárquico de tres espacios del problema***

Burns y Vollmeyer en *Problem Solving: Phenomena in Search of a Thesis* (2000) proponen un modelo de resolución de problema de tres espacios organizados jerárquicamente. En este trabajo consideran que los modelos duales de Simon-Lea y Klahr-Dunbar son insuficientes como una teoría general de resolución de problemas porque omiten los procesos de comprensión que se producen antes que se den las búsquedas en los dos espacios. Si bien Hayes y Simon ya habían incorporado la comprensión como una parte de los procesos de resolución de problemas, no consideraron las implicancias que podría tener este aspecto sobre los espacios del problema. Trataron a la comprensión como un subproceso

que ayuda a mejorar la búsqueda pero no como un proceso jerárquicamente superior. La comprensión del problema quedó asociada casi exclusivamente al espacio de datos, específicamente a la representación de los mismos. Burns y Vollmeyer proponen también relacionar la comprensión del problema con el espacio de reglas o hipótesis (en el sentido usado por Schunn-Klahr). Es decir, prácticamente todos los espacios quedan afectados por la comprensión del problema. Es esta característica la que permite a estos autores jerarquizar los espacios y plantear un nuevo modelo de tres espacios de problemas. El modelo ofrece no sólo representación de instancias sino también define el espacio de reglas que pueden alcanzarse. El siguiente diagrama lo muestra esquemáticamente:



Teoría jerárquica de los tres espacios de resolución de problemas. (Burns & Vollmeyer, 2000: 4)

Como lo ilustra la figura, si bien el modelo es jerárquico, el espacio de reglas puede llevar a movimientos en el espacio de modelos de modo tal que se modifique el modelo elegido.

Los autores ven una ventaja interesante en tratar la resolución de problemas como espacios múltiples:

...sugieren una serie de cuestiones sobre la naturaleza de los procesos de búsquedas. Para cada espacio nos tenemos que preguntar los puntos que señalaron Simon y Lea (1974): 1) ¿Cuáles son los estados de conocimiento? 2) ¿Cuáles son los procesos generativos, 3) ¿Cuáles son los procesos test?, 4) ¿Cuáles son los procesos de selección? (Burns & Vollmeyer, 2000: 4)

La siguiente tabla es la propuesta que dan para los procesos de búsqueda

	<b>Espacio de instancias</b>	<b>Espacio de reglas</b>	<b>Espacio de modelos</b>
<b>Estados de conocimiento</b>	Estados de una tarea	Reglas hipotetizadas	Posibles modelos de las tareas
<b>Procesos generativos</b>	Operadores para cambiar el estado de las tareas	Operadores para generar reglas (por ej. inducción)	Operadores para generar nuevos modelos
<b>Procesos test</b>	Evaluar cuán cercano a su estado objetivo está el estado de la tarea	Testear hipótesis (por ejemplo, decir, generar instancias críticas)	Evaluar cuán bien ajusta el modelo corriente.
<b>Procesos selección</b>	Seleccionar operadores o métodos de evaluación	Decidir qué regla testear, o cómo generar una regla	Seleccionar un método para evaluar o generar nuevos modelos

**Tabla 1: Cuatro componentes de espacio de problemas generalizado para cada uno de los tres espacios. (Burns & Vollmeyer, 2000: 4)**

Según estos autores, el modelo de 4-espacios de Schunn-Klahr se diferencia del modelo jerárquico en que no está diseñado para ser usado dentro de una estructura jerárquica. Pero, me parece que las diferencias van más allá de esto. El modelo de 3 espacios no le da un lugar a lo que denominamos espacio de experimentos y paradigma experimentales. Estos procesos quedan fuera del modelo, siendo bastante limitado para

abordar la resolución de problemas científicos. Pero debemos reconocer que tiene la ventaja de proponer un espacio de modelos que da lugar a la producción de hipótesis. Otro aspecto a considerar es si el modelo no es limitado para expresar todas las dimensiones de las prácticas experimentales, si no entra en conflicto con la filosofía actual de la experimentación. La resolución de un problema mediante experimentos no necesariamente admite un sistema jerarquizado como el presentado por Burns & Vollmeyer. Es difícil interpretar algunos episodios de las ciencias experimentales con una preeminencia tan fuerte de la teoría por sobre el experimento.

Pero, también es cierto que ninguno de los modelos propuestos parece ofrecer una noción de espacios que capte la experimentación en todas sus dimensiones, aunque propongan como el caso de Klahr un espacio de experimentos.

### *11.3. Espacios del problema más allá de la búsqueda*

Algunos psicólogos cognitivos como John Laird (1993) proponen extender los espacios de problemas al medio externo, no agotándose la noción de espacio en la representación interna de los resolutores de problemas. Para este autor las versiones anteriores no funcionan cuando se tienen que abordar problemas que involucran interacciones con un medio externo dinámico. La pregunta que inevitablemente surge es si esto puede hacerse sin abandonar los supuestos de la IA clásica o de procesamiento de información. Laird considera que la arquitectura Soar 5 puede hacer frente a este desafío, pero tengo mis dudas que esas interacciones puedan realizarse usando una arquitectura de tipo simbólica. Tal vez esto pueda entenderse mejor exponiendo versiones extremas de lo que se conoce como “cognición situada” La cognición situada pone énfasis en el contexto de la cognición y niega que el procesamiento simbólico tenga un rol exclusivo en dicho proceso. Si bien es cierto que hay versiones simbólicas de la cognición situada como la de

Vera y Simon (Vera & Simon, 1993) una versión no simbólica parece que tiene la ventaja de hacer que estas aproximaciones psicológicas al descubrimiento confluyan con las aproximaciones históricas y filosóficas de resolución de problemas. La concepción tradicional de la IA distingue representación interna y externa, sin embargo no se le dio demasiada importancia a esta última. Pero, ¿Qué es una representación externa? Una definición general de representación externa es la dada por Zhang:

Podemos definir una representación externa como conocimiento y estructura en el medio, como símbolos físicos, objetos, o dimensiones y como reglas externas o relaciones embebidas en configuraciones físicas. (1997: 180)

Las representaciones externas tienen estas características:

1) ofrecen información que puede ser directamente percibida y usada sin ser interpretada y formulada explícitamente.

2) tienen anclaje en la conducta cognitiva. Las estructuras físicas en las representaciones externas restringen el rango de acciones cognitivas posibles en el sentido de que algunas son permitidas y otras prohibidas.

3) cambian la naturaleza de la tarea: tareas con o sin representaciones externas son tareas completamente diferentes desde el punto de vista del que realiza la tarea, aún si la estructura abstracta de la tarea es la misma. (Zhang, 2000 68: 170)

En muchos casos una representación externa puede ser tan compleja que hace imposible su total transformación en interna. Los estudios sobre representación externa normalmente la igualan con la interna o no logran separar estas dos representaciones. Trabajos sobre representación en filosofía de la ciencia ni siquiera hacen esta distinción. En otras palabras, tanto en filosofía de la ciencia como en IA es común ver a la representación externa como algo que sólo tiene relevancia una vez que es codificado internamente.

Los diagramas, grafos, y cuadros son ejemplos de representación externa que se usan en resolución de problemas. Estas representaciones pueden dar acceso a conocimiento y habilidades que no están disponibles a partir representaciones internas. Zhang y Norman (1994) definen a una

representación externa como aquella que ofrece información que puede ser percibida y usada sin ser formulada explícitamente.

#### *11.4 Conclusión sobre espacios del problema y sus extensiones:*

La noción de espacios de problemas es por sí misma interesante, aunque todavía la misma proceda de experimentos psicológicos muy artificiales. No tenemos todavía un tratamiento de este espacio con casos científicos interesantes. El rol que Thagard le confiere a los experimentos en el descubrimiento parece ser un buen punto de partida para comenzar a acercarse a este tipo de representación. Hasta aquí he expuesto sintéticamente los principales trabajos sobre esta noción y su relación con la idea de que el descubrimiento científico puede entenderse simplemente como una búsqueda guiada en estos espacios. Pero aunque todavía restan trabajos y evidencias, la extensión a espacios de experimentos, espacios de paradigmas experimentales, espacios de instrumentos y espacios externos ofrece algunos ejemplos o casos que difícilmente de los que difícilmente se pueda dar cuenta con la idea de búsqueda. Fundamentalmente, la idea de espacio externo o representación externa es algo que merece más consideración especialmente en relación con la filosofía o epistemología de la experimentación.

## 12. Tipos de problemas y su resolución

Aunque parezca obvio, muchas personas no se dan cuenta que hay diferentes clases de problemas y que cada clase requiere un método de resolución diferente.

(Root-Bernstein, 1989)

En esta sección vuelvo nuevamente a la clasificación de problemas, pero con el objetivo de plantear cuestiones tales como: la posibilidad de emplear métodos generales para los distintos tipos de problemas, qué componentes permiten o impiden las transferencias de métodos de resolución, la posibilidad o no de establecer diferencias cualitativas entre los distintos tipos y hasta qué punto es posible resolver mediante heurísticas problemas no estructurados, etc.

Empezaremos por problemas y métodos de resolución generales para finalmente abordar uno de los aspectos más álgidos de la teoría de resolución de problemas científicos, los problemas mal definidos.

Root-Bernstein, propone esquemáticamente 10 tipos básicos de problemas y sus métodos de solución asociados (Tabla 2). Pero, al contrario de lo que uno en principio podría pensar, dicha clasificación no está orientada a ofrecer un vademécum de problemas y métodos de resolución sino a mostrar que ciertos errores son productos de un incorrecto abordaje metodológico a determinados tipos de problemas y que por ende cualquier preeminencia o encumbramiento de determinados tipos de métodos carece de sentido. Un resultado que como veremos más adelante, ha recibido un tratamiento formal interesante para problemas de optimización combinatoria en lo que se conoce como *No Free Lunch Theorem* (Wolpert & Macready, 1995). También deriva algo que a mi modo de ver es cuestionable, que métodos como el experimental están limitados a producir datos y no por ejemplo invención de teorías. En síntesis, lo que Root-Bernstein trata de presentarnos *Discovering* (1989),

un libro muy particular que intenta reproducir la mente del científico creativo a través de diálogos ficcionales, es que no hay un método general para los 10 tipos de problemas aunque, podamos de algún modo reducir aún más dicha lista. Por ejemplo, si tenemos un problema de definición necesitaremos un método taxonómico.

TIPO	EJEMPLOS	METODOS DE SOLUCION
DEFINICION	¿Qué es la energía? ¿qué especie es ésta?	Inención de conceptos o taxonomías
TEORIA	¿Cómo explicar la distribución de las especies? ¿Qué causa que los objetos caigan?	Inención de Teorías
DATOS	¿Qué información es necesaria para testear o construir una teoría?	Observación, experimento
TECNICA	¿Cómo pueden ser obtenidos los datos? ¿Cómo los podemos analizar? ¿Cuántos fenómenos serán mejor exhibidos?	Inención de instrumentos y métodos de análisis y exposición
EVALUACION	¿Cuán adecuada es una definición, teoría, observación o técnica? ¿Es una anomalía o un artefacto?	Inención de criterios para la evaluación
INTEGRACION	¿Pueden dos teorías o conjuntos de datos ser integrados? ¿Mendel contradice a Darwin?	Reinterpretación y reconsideración de conceptos y teorías existentes
EXTENSION	¿Cuántos casos explican una teoría? ¿Cuáles son las condiciones límites para aplicar una técnica o teoría?	Predicción y testeo
COMPARACION	¿Qué teoría o conjunto de datos es más útil?	Inención de criterios de comparación
APLICACION	¿Cómo puede esta observación, teoría o técnica ser usada?	Conocimiento de problemas no resueltos relacionados
ARTEFACTO	¿Estos datos mejoran una teoría? ¿Es la técnica de recolección de datos apropiada?	Reconocimiento que el problema es insoluble tal cual está establecido

Tabla 2 (Root-Bernstein, 1989: 61).

Pero para Root-Bernstein las dificultades con los problemas no terminan con determinar sus tipos o clases, el orden en que deben ser resueltos es una propiedad importante.

Todo problema existe dentro de lo que James Danielli llamó un "área de problemas" o "problemas de primer orden" Problemas de primer orden son cuestiones tales como "¿cómo trabaja el sistema inmunológico?" o "¿Qué es el cáncer? (Root-Bernstein, 1989: 62)

Estos problemas de primer orden nunca son abordados directamente, para eso deben ser transformados en problemas de menor orden a través de un proceso de división. Pero estas divisiones no están todas al mismo nivel, distintos subproblemas deben ser resueltos antes que otros. Todo esto nos lleva a considerar que los problemas forman un árbol que va conectando distintos niveles hasta que se conecten con técnicas conocidas que permitan su resolución. Pero no todo encadenamiento de niveles lleva a una solución, podría haber un regreso infinito hacia lo no conocido o que tal como está planteado en el primer nivel sea tan general que no admita división en subproblemas. (Root-Bernstein, 1989: 63)

Ahora complicaremos el cuadro presentado anteriormente, ¿Qué pasa cuando apoyándonos en la concepción predominante en filosofía de la ciencia tomamos como no decisivos los resultados obtenidos por los métodos de solución? Entramos aquí nuevamente en la distinción entre problemas mal estructurados o mal definidos y problemas bien estructurados o bien definidos.

Como ya vimos anteriormente, este es un punto fundacional en la IA clásica, una distinción cuya propuesta marcó en gran parte el programa de este controvertido movimiento. Para comenzar volveré nuevamente con una definición general de problemas mal definidos, como aquellos para los cuales los espacios no son claramente o decisivamente especificados y para los cuales no hay un algoritmo de decisión o búsquedas plausibles.

La literatura sobre el tema ha planteado varias dificultades para esta clasificación.

1. los problemas bien estructurados corresponden a la ciencia normal y los mal estructurados a ciencia revolucionaria.
2. Sólo los problemas bien estructurados son pasibles de búsquedas heurísticas.
3. ¿Es posible transformar los problemas mal estructurados de modo tal que puedan ser tratado por métodos heurísticos?

4. Hay bases para pensar que los métodos heurísticos son insuficientes para abordar algunos tipos de problemas mal estructurados.
5. La distinción entre problemas bien estructurados y mal estructurados es de grado y por ende no hay que postular procesos especiales para resolver problemas mal estructurados, basta con los métodos que resuelven problemas bien estructurados.
6. La diferencia entre estos tipos de problemas está basada solamente en la complejidad de la búsqueda necesaria para obtener su resolución.
7. La tecnología puede jugar un rol importante vía la resolución mecanizada de problemas, pudiendo incluso cambiar el estatus de algunos problemas (Kleiner 1993: 190).

Sin ánimos de considerar que he realizado una lista exhaustiva, veamos qué respuestas concretas ha ofrecido Simon para esta lista de problemas. En parte fue expuesto en la introducción a su teoría de resolución de problemas, pero insistiré nuevamente en esto, aunque desde una perspectiva más puntual y de algún modo distinta. En primer lugar, para Simon no hay una distinción clara entre ambos tipos de problemas, progresivamente vamos encontrando problemas que se van transformando cada vez más en problemas no estructurados. Este gradiente le sirve de indicio para suponer que son mal estructurados solamente por la cantidad de búsqueda que implica su resolución. Es la complejidad del problema, medida por la cantidad de espacios del problema lo que en definitiva hace que en determinado estadio de la tecnología consideremos a algunos problemas como mal estructurados y a otros como bien estructurados. En otras palabras, un problema mal estructurado es simplemente un problema más complejo medido por la cantidad de pasos que se requieren para su resolución. Por otro lado, los mecanismos de búsquedas o reglas heurísticas no necesitan ser complejos; con suficiente capacidad de procesamiento es posible abordar problemas cada vez más complejos con reglas simples. La falta de una división clara aumenta las esperanzas de transformar problemas mal estructurados en problemas bien estructurados, hecho que de algún modo

ha sido corroborado por los resultados obtenidos cuando se ha contado con mayor capacidad de cómputo. Pero, vale aclarar que a pesar de que pueda abordarse un problema mediante un sistema computacional nuevo, no implica que estemos ante un tipo de resolución que podamos rotular como perteneciente al punto 2), si bien es cierto que podemos considerar a un sistema computacional como una heurística a otro nivel. Hay una versión de 2) que es la que toman todos los libros generales sobre descubrimiento como el de Kleiner y Kantorovich que intentan seguir una versión racional y normativa del descubrimiento. Estas reglas son las que sin llegar a ser 100% seguras, la mayoría de las veces producen resultados garantizados y lo hacen sin depender de numerosos procesos de ensayo y error. Por ejemplo, la tercera ley de Kepler puede resolverse mediante las heurísticas del programa BACON que tienen las propiedades recién expuestas o por algoritmos genéticos. Más adelante se brinda una caracterización de BACON.

S. Kleiner (1993) en *The logic of discovery a theory of the rationality of scientific research* sigue esta dirección, siendo optimista con la transformación entre estos tipos de problemas, pero no coloca demasiado énfasis sobre un punto que está teniendo cada vez más impacto: no se trata de simplemente de abordar los problemas mal estructurados con las reglas heurísticas de los problemas bien estructurados, se trata de pensar que estas reglas aunque sean muy simples pueden combinarse y producir resultados inesperados. Con esto no obstante no quiero dar a entender que se resolvió la transformación entre problemas bien y mal estructurados; creo que existen otras variantes que ni siquiera con esta extensión pueden abordarse. Acuerdo en este sentido con Shanker en que tenemos que aceptar una gran desmitificación de la creatividad pero no podemos resignarnos a que toda esa literatura en torno a la creatividad con palabras como *insight*, *eureka*s, u otras similares ha quedado desechada.

Veamos qué ha pasado con estos conceptos en otras áreas. Por ejemplo, en educación ya son muchos las investigaciones que han manifestado desacuerdos en aplicar métodos de resolución de problemas

estructurados a problemas no estructurados. La idea general que ha quedado en este ámbito es que las habilidades para resolver problemas bien estructurados son necesarias pero no suficientes para resolver problemas mal estructurados (Brabeck & Wood, 1990) (Kitchener & King, 1981) (Mines, et al., 1990) (Wood & Games, 1991) y que la resolución de problemas mal estructurados tiene que abordarse en forma más cualitativa que la resolución de problemas bien estructurados. (Hong, 1998: 1). Los problemas mal estructurados tienen varias soluciones posibles y múltiples procesos de resolución que pueden ser obtenidos dependiendo de la percepción del resolutor.

En síntesis, con estos resultados puede verse claramente que la atribución de “mal estructurado” a un problema no es muy clara y que debemos volver nuevamente sobre los elementos que lo definen. Un primer paso es distinguir entre “mal estructurado” y “mal definido”

Los problemas mal definidos son aquellos que no admiten una estrategia de resolución clara, pero sí mediante la mediación de un experto calificado (Hayes, 1989: 30-31). Los problemas mal estructurados son aquellos que no tienen soluciones conocidas y respecto de los que no hay unanimidad en una solución ni siquiera por la mediación de expertos. Resolver problemas mal estructurados requiere componentes tales como contenido de conocimiento, conocimiento estructural, estrategias específicas del dominio y estrategias de búsqueda generales, que se usan para solucionar problemas bien estructurados tal como aquellos que van “más allá de lo puramente cognitivo” tales como valores / creencias / actitudes, evaluación / monitoreo / planificación y habilidades de justificación (Sinnott, 1989).

Schön va un poco más allá y define a los problemas mal estructurados dejando la estructura de resolución de problemas por búsqueda:

Conceptualmente los problemas mal estructurados podrían ser pensados como un proceso de diseño, *no como una búsqueda sistemática de soluciones de problemas* (Schön, 1990) (Las cursivas son mías).

Claramente esto pone límites a la idea de pensar la teoría de resolución de problemas como búsqueda e identifica algunos procesos de resolución de problemas como procesos de diseño cuyo tratamiento presupone otros componentes. Tal vez, debamos pensar en procesos perceptuales y de reconocimientos de patrones como los procesos básicos y esenciales que permiten abordar este tipo de problemas y no procesos de búsqueda que presuponen fundamentalmente un repertorio de representaciones ya dadas. Son problemas cuya resolución está más cerca del constructivismo y la acción situada dependiente del dominio y del contexto. Estos problemas no aceptan un abordaje general al estilo que proponen las teorías de procesamiento de información para los problemas bien estructurados.

Resumen de diferencias entre problemas bien estructurados y mal estructurados.

Crterios	PBE	PME
<b>NATURALEZA DE LOS PROBLEMAS</b>		
Comentarios de enunciado del problema	Un objetivo conocido Un estado inicial bien conocido, conjunto restringido de estados lógicos Parámetros de restricción	Vagamente definidos números de objetivos. Información incompleta, imprecisa, ambigua, e incierta. Relaciones inconsistentes entre conceptos, reglas, y principios basadas en casos sobre contexto.
Solución	Una respuesta única, convergente para alcanzar una satisfacción en una resolución final	Múltiples soluciones, caminos de soluciones o soluciones completas. Ningún acuerdo universal sobre las soluciones apropiadas.
<b>PROCESOS DE RESOLUCION DE PROBLEMAS</b>		
Problemas de representación	Activar esquemas	Buscar información Seleccionar información Desarrollar justificaciones acerca de las selecciones
Procesos de solución	Buscar soluciones	Generar soluciones Seleccionar soluciones
Monitoreo	Implementar soluciones	Evaluar la solución, monitorear procesos de solución y desarrollar justificaciones
<b>COMPONENTES DE RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS</b>		
Cognición	Conocimiento específico del dominio Conocimiento estructural	Conocimiento específico del dominio. Conocimiento estructural;
Metacognición	Conocimiento de la cognición	Conocimiento de la cognición Regulación de la cognición
Variables no cognitivas		Creencias/actitudes/valores
Habilidades de justificación		Habilidad para desarrollar argumentos.

Tabla 3. (Hong, 1998: 32)

En síntesis, la literatura sobre resolución de problemas mal estructurados en educación muestra, a diferencia de los problemas bien estructurados, que requiere componentes más cualitativos que aquellos que se requieren en los problemas bien estructurados, que el conocimiento del dominio es esencial. De esta forma se invalidan estrategias generales de resolución de problemas, en consecuencia el paradigma de procesamiento de información y búsqueda es insuficiente, dado el rol que cumple la percepción y el reconocimiento de patrones.

Esto último, que será desarrollado en la siguiente sección, muestra que tanto los cambios de representación como la creación de nuevas representaciones escapan a una teoría de resolución de problemas centrada en la noción de búsqueda heurística en una estructura de procesamiento de información. La propuesta de Schön de entender a estos procesos desde el punto de vista del diseño abre nuevas perspectivas, fundamentalmente en relación a los contextos experimentales, donde dicha palabra tiene un significado importante.

### **13. Resolución de problemas y representación**

A los pocos años de emerger la IA se vio que unos de los problemas principales para tener una teoría general de resolución de problemas radicaban en la fuerte dependencia de la misma respecto a la representación y sus cambios. Un problema está casi resuelto si se encuentra la representación correcta del mismo. Los primeros modelos de resolución de problemas fueron desarrollados para modelar problemas que no exigían el uso de distintos tipos de representación y podían abordarse desde un tipo muy general. Por casualidad, o porque esto no se buscó conscientemente, los problemas elegidos no necesitaban apelar a distintos tipos de representación, ni requerían durante el proceso de resolución la necesidad de producir cambios importantes. A mediados de los 60 se dieron las primeras reflexiones importantes sobre este aspecto de la resolución de problemas, pero su tratamiento y respuestas tuvieron que esperar más de dos décadas. Los éxitos parciales logrados en este período tal vez explican por qué esta necesidad no fue apremiante en un principio. A mediados de los 70 empiezan los debates en torno a si pensamos o no mediante imágenes, es decir si hay o no una representación de tipo imaginista o pictórica, y a mediados de los 80 un nuevo modo de representar problemas, la representación sub-simbólica o sistemas conexionistas, lleva un nuevo tipo de representación a

programas computacionales. Son estos últimos resultados los que impactarán definitivamente sobre las ciencias cognitivas, tanto por las consecuencias pragmáticas que producen como por los debates teóricos a que dan lugar. Representaron una alternativa interesante para aquellos que criticaron la IA clásica llegando inclusive a sostener que era un nuevo modo de instanciar los principios de la psicología de la Gestalt como por ejemplo el holismo.

Las discusiones que generaron el conexionismo y sus resultados mostraron la dificultad que tenemos para probar la existencia de un tipo de representación cualitativamente diferente sino contamos con una máquina de propósito general que no suponga para su funcionamiento una representación de tipo simbólica. A esto último tal vez lo podamos reformular mejor mediante una pregunta ¿Cómo podemos probar que un sistema de procesamiento de información, sea humano o artificial, usa un tipo de representación no simbólica?

La posibilidad de traducir lo no simbólico a lo simbólico y las ventajas de contar con una máquina simbólica han pesado a la hora de inclinar la balanza. Pero sin caer en una posición tan fuerte como sostener que efectivamente pensamos mediante imágenes, es indudable que hacemos analogías y que es un componente clave para entender entre otras cosas la práctica científica, fundamentalmente en lo concerniente a productos creativos de la misma. Medio siglo de representación simbólica en ciencias cognitivas no ha producido modelos (computacionales) aceptables de resolución de problemas mediante analogías. Este es tal vez el argumento más fuerte para pensar que necesitamos explorar otras alternativas representacionales. Desde un ángulo diferente, pero en una dirección relacionada, las computadoras han dado la posibilidad de presentar en pantallas gráficamente la información, y han permitido transformar esta información de un modo que no era posible mediante papel y lápiz. Esto ha alentado a proponer que podemos razonar diagramáticamente con posibilidades que van inclusive más allá de meras ventajas heurísticas. Pero dadas las objeciones que se pueden hacer a todo tipo de uso de representación

interna no simbólica, lo más apropiado es decir que la manipulación de representaciones externas diagramáticas tiene efectos sobre nuestros modos de resolver problemas.

Como sostiene Giere (1988), adoptar un punto de vista representacional respecto a los modelos hace ineludible enfrentarse a la noción de similaridad, una noción altamente sospechosa para los filósofos. Cualquier cosa puede ser similar a otra en algún aspecto haciendo totalmente vacía esta noción, o haciendo imposible dar una concepción general de la noción de similaridad. La salida que encuentra Giere es considerar la noción de similaridad dependiente del contexto, admitir que no hay solamente una especificación de la misma dependiendo del interés particular del que modeliza. Estos inconvenientes no surgen en una posición instancial de los modelos donde la analogía queda restringida solamente a modelos isomórficos. Pero en las representaciones que se hacen, por ejemplo, con un mapa, no es una entidad lingüística lo que representa a un territorio determinado. Según Giere, es un objeto mapa lo que se usa para representar otro objeto llamado región geográfica. La carga de vacuidad sólo puede salvarse externamente señalando qué parte y en qué grado estas partes del objeto representante es similar al objeto representado. En otras palabras, no hay posibilidad de pasar de isomorfismo a similaridad en base a características intrínsecas del objeto representante. La relación de similaridad puede tener características más abstractas que las que posee por ejemplo un mapa de una región o un mapa de subterráneos, relaciones más abstractas que las localizaciones espaciales sólo son indicadas muy esquemáticamente y la información importante es topológica.

En un diagrama la relación es aún más abstracta; por ejemplo en el diagrama de un circuito eléctrico lo que importa son las conexiones y no las localizaciones espaciales. No obstante, las formas de la misma tienen importancia para la comprensión del circuito.

Usando también la relación de semejanza, Ibarra-Mormann (Ibarra & Mormann, 1997) proponen las siguientes formas de representación, isomorfía, sustitución, homomorfía y homología. Esta clasificación proviene a su vez de la posesión de semejanza objetual, estructural y lógica entre representante y representado. El objetivo es lograr un tipo de representación general, más que caracterizaciones regionales que den cuenta de aspectos centrales de la importancia de la representación en prácticas científicas claves, principalmente en aquellas de tipo creativo. Si bien toman en cuenta que las representaciones pueden tener como función reducir o inducir complejidad, no existe una comparación clara de las ventajas y desventajas de las distintas formas de representación en función de estos posibles productos de las representaciones. Decir que las reducciones o inducciones dependen del sujeto no salva este inconveniente. ¿Pueden las representaciones homológicas basadas en la semejanza lógica ofrecernos los requisitos necesarios para realizar las analogías que se hacen en las prácticas científicas? ¿Cómo hacemos para decidir estas cuestiones? ¿Nos basta el análisis histórico de las prácticas científicas? Es aquí donde veo una distancia entre los estudios sobre resolución de problema en ciencias cognitivas y el análisis de esta noción en la filosofía de la ciencia.

Una alternativa es recurrir a las investigaciones cognitivas sobre resolución de problema, pero aquí nos surgen otras preguntas. ¿Podemos decir que existen representaciones alternativas con efectos en la resolución de problema? ¿Pueden transferirse estos resultados al análisis de la actividad científica? Veamos brevemente qué resultados interesantes se han dado en la relación entre resolución de problema y representación en las ciencias cognitivas.

Un trabajo liminar y ampliamente citado es el intento de explicar el *insight* dentro de la teoría de resolución de problemas en la versión clásica (como búsqueda en espacios simbólicos). Los trabajos de Kaplan (Kaplan & Simon, 1990) tuvieron cierta dificultad en encontrar una explicación completa de estos procesos dentro de la estructura antes mencionada. Hallaron que la búsqueda de invariantes es una heurística

que juega un rol decisivo para explicar las diferencias en tiempos de resolución de tableros con distintas representaciones. No obstante, no explica los procesos que guiarían la producción de estos distintos tipos de representaciones; los sujetos no producen mediante esta regla las distintas configuraciones dadas a los diferentes grupos. La pregunta inevitable al analizar este caso es si estos resultados más bien contradicen los resultados esperados y obligan a tomar una salida tipo variación ciega o gestáltica. Sin embargo, otra lección que deja es que además de justificar la importancia o existencia de determinadas representaciones, es un problema esencial, y tal vez el más difícil, explicar los procesos de cambios de representación. Esto, obviamente, sino consideramos que hay un único tipo representación.

Una segunda línea de trabajos dentro de la tradición cognitiva, son las investigaciones “en vivo” de Dunbar (1995) (1999) de la producción de los científicos en el laboratorio de inmunología y biología molecular. En estos ambientes, donde los descubrimientos se realizan con una frecuencia semanal, han detectado que una de las actividades más frecuente es la producción de analogía, por ejemplo, pudieron relevar 99 analogías en 16 reuniones. Las analogías no son realizadas de modos azarosos sino que responden a los objetivos del científico, que pueden ser formular hipótesis, diseñar experimentos, confirmar experimentos o explicar un resultado. Las analogías ligadas al diseño y confirmación de un experimento son muy similares al experimento o al organismo involucrado en el experimento. Pero cuando los objetivos son formular hipótesis los científicos tienden a realizar analogías con otros organismos o con organismos con estructura similares. Los resultados de estos experimentos muestran que, además de forzar las generalizaciones de los resultados obtenidos le sigue en importancia la producción de cambios de representación para resolver el problema. Una enseñanza de estos resultados es la necesidad de incorporar formas distribuidas de generar representaciones.

Una tercera línea de trabajo está constituida por los trabajos que comparan la distribución espacial de información y su eficacia sobre la

resolución de problemas (Ormerod & Chronicle, 1999); un debate prolífero donde básicamente lo que se discute es si la complejidad del problema tiene o no que ver con cómo la información se distribuye espacialmente y no tanto con la cantidad de símbolos u objetos que contiene la misma.

Si bien los resultados se condicen con ciertas intuiciones que tenemos acerca de esto, el valor que han tenido es mostrarnos en términos cuantitativos los tiempos se producen en que distintas configuraciones en comparación con procedimientos que obvian esta información espacialmente presentada. Hay trabajos que ponen en duda que efectivamente haya diferencias significativas entre una computadora que no tiene en cuenta la distribución espacial y los humanos (Best & Simon, 2000), pero no se discute que la distribución espacial no tenga efectos sobre la rapidez para resolver problemas.

Por último, tenemos investigaciones y programas que admiten las ventajas de ambas representaciones y creen que lo que caracteriza a un experto es la capacidad de moverse sin dificultad entre representaciones simbólicas y no simbólicas. Un novato puede moverse bien en cada tipo de representación pero tiene problemas para pasar fácilmente de una a otra. (Tabachneck-Schijf, et al., 1997)

He intentado presentar el problema de la representación y sus cambios dentro de lo que podríamos denominar una perspectiva de resolución de problemas, haciendo referencia a cómo se tratan estos conceptos en la filosofía de la ciencia. En todos los casos, inclusive obviando el problema de la representación mental, se observa que la introducción de nociones como la de semejanza es ineludible para dar cuenta del rol de las inferencias analógicas. Por otro lado, todo debilitamiento de la noción de semejanza lleva a un debilitamiento de la noción de analogía. La línea más fructífera a seguir no es buscar un concepto objetivo de representación no simbólica sino determinar en qué medida aspectos no interpretativos pueden influir en la resolución de problemas científicos. Pero para esto se necesitan experimentos más

puntuales que usando estas distinciones muestren de modo cuantitativo las diferencias buscadas.

## 14. Resolución de problema y complejidad

Hemos visto anteriormente que hay varios factores que pueden hacer dificultoso o imposible la resolución de un problema: la falta de métodos conocidos, la ausencia de claridad en el objetivo o de información contextual disponible. Pero, en el análisis de problemas bien y mal estructurados, quedó que tal distinción sólo proviene en última instancia de diferencias en la complejidad del problema. Más precisamente, que a los fines de establecer la dificultad en la resolución de un problema, lo único que importa es la complejidad del mismo medido por la cantidad de espacios de problemas involucrados en su búsqueda. Particularmente la teoría computacional de la complejidad se dedica especialmente a esto, a evaluar algoritmos y clasificarlos en “*difíciles (hard)*” o “*fáciles (easy)*”.

Dentro de esta teoría uno de los problemas más importante es el problema del viajante de comercio o TSP como se lo denomina en la literatura. Es un problema que ha servido como test para toda nueva idea algorítmica propuesta, y fue uno de los primeros problemas que se conjeturó como “difícil” en un sentido técnico. (Johnson & Papadimitriou, 1985: 37). Un problema es “difícil” como el TSP si únicamente están disponibles algoritmos de optimización de naturaleza enumerativa (sólo una enumeración completa garantizará obtener una solución óptima). Los problemas “fáciles” son aquellos para los que existen buenos algoritmos -entendiendo a su vez por buenos algoritmos métodos de solución cuyo tiempo de ejecución se incrementa a lo sumo polinómicamente con el tamaño del problema.

Estos problemas “difíciles” en  $NP^3$  son aquellos para los cuales todos los algoritmos conocidos requieren tiempo exponencial, tienen la peculiaridad de que todos los problemas en NP pueden ser “reducidos” polinomialmente a ellos; es decir, si se puede dar una solución en tiempo polinomial para uno de ellos, se podría dar para todos los de NP. Esta propiedad ha sido usada para definir una subclase separada en NP: la de los problemas NP-hard. Se dice que un problema es NP-hard si cualquier problema en NP es polinomialmente transformable en él, aunque el problema en sí no pertenezca a NP. Si el problema además pertenece a NP, entonces se lo denomina NP-completo.

El hecho de que hasta hoy (luego de considerables esfuerzos a lo largo de muchos años) no se hayan podido encontrar algoritmos eficientes para problemas NP-completos lleva a pensar a la mayoría de los investigadores que una vez que se demuestra que un problema pertenece a esa clase, ya no vale la pena tratar de buscar algoritmos eficientes para él. Lamentablemente, muchos de los problemas importantes que aparecen en investigación operativa son NP-completos.

Los algoritmos pueden ser pensados como programas computacionales escritos en un lenguaje computacional determinado. En el contexto de la teoría de la complejidad computacional un algoritmo “soluciona” un problema como el del viajante si siempre construye un ordenamiento que dé una longitud con el recorrido mínimo.

El objetivo es encontrar algoritmos eficientes para resolver problemas, pero “eficiente” se entiende en un sentido muy preciso. La noción de eficiencia involucra todas las fuentes necesarias para ejecutar un algoritmo y los tiempos en llevar a cabo dicha resolución. Los requisitos temporales se expresan en función del tamaño de una instancia

---

<sup>3</sup> P denota la colección de todos los problemas de decisión los cuales tienen algoritmos determinísticos en tiempo polinomial. NP denota la colección de todos los problemas de decisión los cuales tienen algoritmos de solución no-determinísticos en tiempo polinomial.

del problema. La idea subyacente es que la complejidad de un problema varía simplemente por el tamaño del mismo.

#### ***14.1. Resolución de problemas y complejidad: el problema del viajante de comercio***

Es inevitable mencionar el problema del viajante de comercio si uno pretende formular una teoría general sobre resolución de problemas. No obstante, son pocos los trabajos que abordan este tema en la literatura sobre ciencias cognitivas. Por ejemplo, no forma parte de los problemas del clásico libro de Newell y Simon *Human Problem Solving* (1972) y recién se hace referencia al mismo en *Simulating human performance on the traveling salesman problem* (Best & Simon, 2000). Es paradójico que un problema con una historia tan rica en métodos de resolución y con propiedades tan particulares no haya ocupado un rol central en los trabajos sobre resolución de problemas en la IA.

Remitamos la enunciación informal del problema del viajante: si un viajante de comercio, partiendo de su ciudad de residencia tiene que visitar exactamente una vez cada ciudad de una lista dada y luego regresar a su casa, puede seleccionar el orden en que las ciudades son visitadas de modo tal que la distancia recorrida en su viaje sea tan pequeña como sea posible, suponiendo que conoce la distancia entre cada par de ciudades.

El problema consiste en minimizar la distancia recorrida, pero como bien los señala Hoffman y Wolfe a pesar de esto, no podemos emplear métodos del cálculo diferencial, porque estamos en una situación combinatoria: nuestra elección no es sobre el continuo sino sobre el conjunto de todos los “tours” (1985: 1).

Lo que interesa entonces, es encontrar un algoritmo eficiente para resolver problemas. Cuando hablamos de eficiencia en este contexto suponemos que hemos considerado todas las fuentes computacionales

necesarias para ejecutar el algoritmo. Otro aspecto es el factor tiempo, puesto que cuando se evalúa generalmente se lo hace dentro de este parámetro. El tiempo a su vez se mide en relación al tamaño del problema o instancias del mismo. Hay muchos modos de describir las instancias de un problema, pero puesto que suponemos una fuente computacional, tenemos que describirla por medio de cadenas de símbolos.

A partir de todo esto, se puede hablar de una función de complejidad de tiempo, que expresa para cada longitud posible, la mayor cantidad de tiempo requerido por el algoritmo para resolver un problema de un tamaño determinado. El esquema de codificación y la computadora son otras de las condiciones que hacen que la función anterior quede definida. Pero el punto interesante es que a pesar de la influencia que puede tener el esquema de codificación y el modelo computacional sobre la función de tiempo, tiene poco efecto sobre los NP-completos.

La función de tiempo varía notablemente entre los distintos algoritmos, pero pueden clasificarse en dos categorías principales, aquellos cuya función tiempo es polinómica y aquellos que son exponenciales. Un aspecto interesante es el efecto diferencial de la tecnología sobre estos dos tipos de algoritmos, los algoritmos exponenciales no quedan tan afectados en su rendimiento por mejoramiento tecnológico.

Todo esto lleva a una segunda clasificación de problema. Los problemas pueden ser intratables, para los cuales no hay función de tiempo polinómico, o pueden ser tratables para los cuales sí existe una función de tiempo. La intratabilidad de un problema resulta ser independiente del esquema de codificación y modelo computacional usado. (Garey & Johnson, 1979: 9).

Hasta aquí tenemos los principales conceptos y consecuencias de problemas cuya dificultad proviene de la complejidad tomada a partir de la cantidad de espacios de problemas. Vemos que para algunos problemas, a medida que sus instancias van creciendo no es posible

encontrar un algoritmo de tiempos polinómicos que lo resuelva. La pregunta obvia es, ¿a qué tipo de recursos debemos apelar para resolver estos casos?. Una primera respuesta sugiere abandonar la pretensión de hacerlo mediante algoritmos de optimización. Téngase en cuenta lo que dijimos a propósito de Simon, que la diferencia entre problemas bien y mal estructurados es sólo una diferencia en la complejidad de los problemas tratados. Es decir, que estamos ante casos que por su dificultad, tienen algunas de las características de los problemas mal estructurados. El objetivo de incluir todo esto pasa por reflexionar si las investigaciones sobre estrategias en la resolución de estos tipos de problema no da algunos indicios importantes sobre la metodología del descubrimiento. Recordemos lo que se expuso anteriormente a propósito de Laudan y Kelly: abordar los problemas desde esta perspectiva tiene la virtud de hacer más transparente su estructura, superando la idea de que los problemas son cajas negras afectadas sólo por restricciones externas. Veamos brevemente como han evolucionado los métodos de resolución aplicados a este tipo problemas y qué enseñanza puede sacarse de los mismos para una teoría del descubrimiento científico.

La dificultad de resolver en forma exacta los problemas “difíciles” cuyos algoritmos de resolución requieren tiempos exponenciales hace que deba optarse por algoritmos que no ofrecen soluciones exactas, pero lo hacen en tiempos humanamente razonables. A este tipo de algoritmos se los denomina “heurísticas” Se han propuesto diferentes tipos de heurísticas para resolver problemas complejos,

Heurística del vecino más próximo (*Nearest neighbour heuristic*): comienza en alguna ciudad y luego visita la ciudad más cercana. Continúa visitando la ciudad más cercana que no ha sido visitada continuando hasta que el recorrido está completo.

Heurística de inserción más barata (*Cheapest insertion heuristic*): es un algoritmo “codicioso o avaro” (greedy) que comienza con un sólo nodo y luego agrega un nodo a la vez, cuya inserción hace el más pequeño incremento a la longitud del recorrido.

Heurística de inserción más lejana (*Furthest insertion heuristic*): inserta un nodo cuya distancia minimal al recorrido existente es el más larga.

Heurística de ahorro (*Savings heuristic*): clasifica los arcos en orden ascendente al costo. Agrega arcos en este orden, en tanto no violen restricciones, hasta que todas las ciudades hayan sido visitadas.

Algunas heurísticas son iterativas: parten de una solución dada y posteriormente la mejoran. Otras heurísticas son constructivas, estas van generando paso a paso la solución.

Desde la perspectiva de búsqueda, las heurísticas pueden no ser aleatorias sino sistemáticas, en el sentido que los procesos de búsquedas no aprovechan la estructura del problema y tienen como única guía encontrar el punto entre los puntos más cercanos, aquellos que hacen el recorrido más corto. Hay una versión más sofisticada de este tipo de heurística, la 2-Opt, que consiste en borrar dos arcos que conectan a su vez otros dos nodos y reemplazarlos por otros dos que reconectan el recorrido de un modo más corto.

Otras heurísticas son las que aprovechan la estructura del problema, como algoritmos genéticos, recosido simulado y algoritmos meméticos que tienen como ventaja la superación del problema de los óptimos locales de las heurísticas de búsquedas locales.

En un principio, se podría pensar que en su implementación computacional las heurísticas globales tienen ventajas por sobre las heurísticas locales, pero esto no es necesariamente así. El mejoramiento de arquitecturas computacionales y velocidad de cálculo favorecen la resolución usando heurísticas más simples. Un resultado que sintoniza con otras aproximaciones computacionales ligadas a las ciencias de la complejidad, como son los autómatas celulares. La idea que presenta esto último, que inclusive ha merecido títulos provocativos como *A New Kind of Science* (Wolfram, 2002) y que ha generado no pocos debates, es que la complejidad es un producto de reglas muy simples o que algo complejo no necesariamente presupone que el mecanismo que lo produce es complejo.

Es una nueva forma de interpretar lo creativo que, a diferencia de las metáforas anteriores que lo entendían como algo que es producto de variaciones ciegas cuasi-aleatorias al estilo Campbell o como productos de reconocimiento preceptuales holísticos de corte gestáltico, supone que la creatividad es producto de reglas simples que tienen la propiedad de generar conductas extremadamente complejas. Autómatas celulares y algoritmos genéticos son productos de nuevos tratamientos computacionales sobre la complejidad que nos hacen pensar en nuevas metáforas sobre la creatividad.

Hasta aquí he abordado algunos aspectos de la complejidad computacional y resalté algunos resultados que pueden ser interesantes para nuestro problema. Mostré ciertas tendencias convergentes en aproximaciones a la complejidad en la resolución de problemas que suponen grandes dificultades de resolución para instancias muy grandes del mismo. La pregunta que queda es si podemos transferir estas estrategias a la resolución humana de problemas, o también, si los humanos no cuentan con otras estrategias que sean más afines a lo que las autobiografías de científicos famosos y creativos nos dicen acerca de cómo lograron la producción de nuevos conocimientos, objetos, métodos, etc.

#### ***14.2. El problema del viajante desde el punto de vista humano-perceptual***

De los resultados anteriormente expuestos se podría conjeturar que la complejidad de los problemas y en especial el problema del viajante de comercio están en función exclusivamente del número de nodos o ciudades a ser conectados o complejidad del espacio del problema. MacGregor y Ormerod (1996) realizaron estudios psicológicos sobre el rendimiento humano en este problema y ofrecieron evidencias de que la complejidad del problema no surge únicamente de la cantidad de nodos sino de la cantidad de puntos interiores. Es decir, encontraron que

la complejidad no depende solamente de la cantidad de puntos sino de la distribución espacial de los mismos. Sus pretensiones van inclusive más allá de la simple comprensión de los procesos involucrados en la resolución de este tipo de problema; se proponen también encontrar mecanismos que puedan competir con los algoritmos usados normalmente para resolver estos problemas a través de computadoras. Es decir, suponen que hay modos de resolución de problemas que son cualitativamente diferentes a los antes mencionados y que indicarían que la comprensión o solución repentina de problemas, o idea precomputacional de la creatividad, es algo que puede verificarse experimentalmente. Es importante señalar que la validez de estos resultados socavaría la concepción de resolución de problemas de Simon-Newell, ya que ofrecería evidencias de que no hay gradualidad en todos los procesos de resolución de problemas y que su concepción no agota las dimensiones de la creatividad científica. Veremos enseguida como Simon recoge el guante y trata de contrarrestar esta amenaza a su teoría. Primero expondré brevemente esta aproximación de corte gestáltico intentando hacer al mismo tiempo una selección que muestre aspectos que permitan valorar mejor la comparación propuesta.

Los experimentos que se hicieron tuvieron como objetivo de medir la calidad de las soluciones humanas frente a las computacionales, además de determinar que el rendimiento humano no depende tanto de la cantidad de puntos sino de la cantidad de puntos no interiores. Esto último se hizo comparando los resultados de los sujetos experimentales con tres procedimientos heurísticos: algoritmo del vecino más cercano, algoritmo de ángulo interior más grande y una variación de la heurística "convex hull" usando un criterio de heurística de inserción más económico o barato. La gente usa una envoltura convexa como parte de la estrategia para resolver el problema del viajante, la envoltura convexa de un conjunto de puntos en el plano es el polígono convexo más pequeño que cierra todos los puntos en el conjunto. Estas tres reglas fueron elegidas porque podían ser usadas también por humanos

(MacGregor & Ormerod, 1996). En el Apéndice 1 puede verse una exposición más detallada del experimento.

En síntesis, a partir de estos experimentos llegan a la conclusión de que los sujetos logran las soluciones debido a la percepción de propiedades globales y espaciales del problema.

Otra evidencia en esta dirección es que el efecto de la información contextual, como sobreponer un mapa, disminuye el rendimiento a nivel de la heurística del vecino más próximo. Esto obviamente puede interpretarse como un desvío hacia un procesamiento de tipo local.

Estos resultados siguen siendo significativos para problemas con más nodos. Como referencia citan al trabajo de Lee (1985) que sostiene que la correlación se sigue manteniendo para problemas con 60 nodos o ciudades.

Dos años después de los trabajos antes citados, publican dos trabajos sobre el mismo tema donde siguen verificando los resultados obtenidos en los dos primeros experimentos (Ormerod & Chronicle, 1999) (MacGregor, Ormerod & Chronicle, 1999). No obstante como dato curioso, no van a proponer un experimento que sobrepase en cantidad de nodos a los experimentos de Lee. El número máximo que consideran en sus experimentos es 48 nodos o ciudades. (En el Apéndice 1 se puede ver una presentación más detallada de los experimentos).

En síntesis, lo que estas series de experimentos muestran es que para el problema del viajante, y a cierto nivel de instancias del mismo, es posible que el ser humano use estrategias distintas a las sugeridas por la teoría clásica de resolución de problemas basadas en reglas heurísticas locales. Estos experimentos apoyarían una psicología de la resolución de problemas y del descubrimiento al estilo gestáltico, basada en reconocimiento no gradual de patrones. Contradicen también la salida que Simon y Newell encontraron al problema del *insight* en la creatividad científica. De acuerdo a estos resultados, no pueden reducirse estos casos a gran cantidad de conocimientos indexados, constituyendo evidencia de que estamos ante una cognición perceptual-espacial.

Simon responde a los desafíos planteados por Ormerod, Chronicle y Mc Gregor en *Simulating human performance on the traveling salesman problem* (Best & Simon, 2000). En este trabajo, hacen una serie de experimentos donde muestran que combinando estrategias globales que ofrecen un plan general junto con estrategias locales en resolución mediante computadoras puede lograrse un rendimiento igual al de los seres humanos. Además afirman que la admisión de estrategias locales es inevitable si se quieren explicar las demoras como función lineal del tamaño del problema. Los resultados coinciden además con los resultados de Graham, Joshi y Pizlo (2000). Ellos mostraron que el tiempo requerido por los humanos para resolver el problema del viajante es una función lineal del tamaño del problema.

### ***14.3. Comentarios finales***

La discusión planteada por estos trabajos abre nuevas perspectivas (o recicla viejas) sobre modelos de resolución de problemas, principalmente vuelve a colocar en escena la concepción gestáltica de resolución de problema y la cognición espacialmente basada.

Simon mismo reconoce que las estrategias globales son necesarias para predecir completamente el rendimiento de la resolución humana de este tipo de problemas. Aunque cabe aclarar que diseña una heurística global cuyas propiedades no apoyan aspectos cognitivos tan radicales como los planteados por MacGregor et al. No obstante hay un aspecto importante de los resultados de Ormerod y Chronicle que Best y Simon ignoran. Casi coincide con los resultados de Best y Simon en relación a la demora que se registra en los dos primeros movimientos y pone en duda, por el lapso de tiempo involucrado, que pueda reinterpretarse desde heurísticas locales tipo la del vecino más cercano. Es decir, no parece que puedan realizarse tantos análisis locales en tan breve período de tiempo. A la luz de esto, podríamos reinterpretar los resultados obtenidos por Best y Simon y considerar que ese 80% de heurísticas locales son

superfluas, la latencia en las mismas son producidas simplemente porque el sistema de trazado en forma secuencial lo lleva a reflexiones innecesarias. Pero, repito, con los tiempos de reconocimientos de buenas figuras es improbable que pueda realizarse con un 80% de heurísticas locales.

En otras palabras, parece inevitable admitir que los humanos tienen *insight* globales, como han sostenidos aquellos que han adherido a una concepción romántica de la creatividad y que esta variante no es reductible a los principios de la IA clásica. Para terminar, aún siendo muy cautos en la interpretación de estos resultados, debemos admitir que hay indicios para sostener que la resolución de problemas con componentes espaciales puede estar basada perceptualmente y que la complejidad de algunos problemas puede no estar ligada totalmente a la cantidad de puntos o nodos. La distribución espacial de estos últimos puede ser un factor clave en la rapidez con que los mismos se resuelven.

## IV.

# Heurística y resolución de problemas

Las heurísticas de Polya nos ofrecen un  
puente entre la teoría y la práctica.

S. Feferman

### 1. Heurística, resolución de problemas y descubrimiento

El término “heurística”, cuyo origen es griego y que muchos atribuyen su uso moderno al trabajo del matemático húngaro Polya, comenzó a mediados del SXX a tener un rol cada vez más importante en la filosofía de la ciencia. Fue Lakatos, un discípulo de Polya, quien le otorgó un estatus especial en filosofía general de la ciencia. Para Lakatos el término sirve para calificar el potencial de las hipótesis para generar nuevos hechos e ideas, y constituye la base sobre la cual califica como progresivos y degenerativos los “programas de investigación” En ciencias cognitivas, como ya algo adelanté en pasajes anteriores, fueron

Simon-Newell quienes vieron que había un modo de superar las limitaciones de una aproximación formal a la dinámica de la ciencia, que se podía dar cuenta de cómo se desenvuelve la ciencia día a día. La novedad de esta aproximación consistió en abandonar la idea de que los resolutores de problemas eran tomadores de decisión lógicos y bayesianos, que seguían estrictamente las reglas de la lógica o de las probabilidades, y sostener por el contrario que eran sujetos limitados computacionalmente que seguían reglas simples pero lo suficiente poderosas como para resolver problemas muy complejos. Un punto de inflexión en este movimiento generado por Polya y los psicólogos de la Gestalt fue el rol que jugó la computadora digital al permitir experimentalmente testear qué reglas eran suficientes para producir los resultados buscados. Es a partir de este aspecto donde se separan los trabajos de Polya y los de Simon-Newell sobre heurística. Las heurísticas muchas veces no se diseñan primero, y luego se implementan computacionalmente; por el contrario muchas veces son un resultado de una interacción hombre-computadora, siendo el producto final heurísticas híbridas o directamente no humanas. Es precisamente esta forma de producir heurísticas que algunos usarán luego para cuestionar los modelos computacionales como simulación efectiva de la reconstrucción histórica de descubrimientos.

La importancia de las prácticas científicas en las concepciones generales y específicas de la ciencia hace, como dice el epígrafe, ineludible contar con este tipo de concepto. El amplio uso que han tenido en IA ha derivado en que muchos identifiquen el concepto de heurística con procedimientos tipo reglas implementadas en algoritmos computacionales. En ese sentido, una concepción heurística del descubrimiento sería un conjunto de reglas del tipo que usan los programas BACON, reglas procedimentales que a partir de cierta información cuantitativa o cualitativa producen como resultado otros valores u otras reglas.

El término “heurístico” es de amplia aplicación, y al igual que otros términos analizados con anterioridad puede tener distintas

consecuencias para el descubrimiento científico. Por ejemplo, se usa en relación a razonamientos. Un razonamiento heurístico es aquel que no es considerado como final y estricto, sino como provisional y plausible, cuyo propósito es descubrir la solución de un problema. Desde una perspectiva más general podemos decir que la palabra “heurística” hace referencia a procedimientos falibles, pero “suficientemente confiables” Esta forma de definir a los procedimientos heurísticos se diferencia de los algoritmos que son procedimientos infalibles.

Intuitivamente podemos decir que los métodos heurísticos son métodos prácticos, que sin ser exactos son útiles. Pero desde el punto de vista de la automatización computacional un mismo procedimiento puede ser considerado un algoritmo o una heurística, como bien lo señala Haugeland (1988)

Vamos a suponer que ideamos una fórmula precisa, estricta, para aplicar y combinar varios métodos prácticos bien definidos; la salida de esta fórmula es una estimación falible, pero bastante confiable, del mejor movimiento en una situación dada. La fórmula en sí es perfectamente explícita e inequívoca, de manera que nos podemos imaginar una rutina infalible, que calcule su valor (es decir, que dé la estimación exacta) en cualquier posición dada. ¿Es esa rutina un algoritmo? Depende del punto de vista.

Si el objetivo que nos hemos propuesto es hacer cuadrar la fórmula (calcular la estimación), entonces *es* un algoritmo (infalible). Pero, si el objetivo es encontrar un movimiento de ajedrez óptimo, entonces la rutina es sólo un estimador falible, y por lo tanto sólo un procedimiento heurístico. La gracia de todo esto está en que,

vista como algoritmo, la rutina puede ser automatizada como cualquier otra; pero vista como un estimador, la misma rutina (ahora automatizada) puede funcionar como un buen elector de movimiento. En otras palabras, después de todo, un elector de movimiento bueno aunque falible puede ser automatizado por un algoritmo. (Haugeland, 1988: 83-84)

En otras palabras, lo que nos dice Haugeland es que un algoritmo también puede funcionar como una heurística. Pero, esto como lo he señalado en trabajos anteriores (Ahumada, et al., 2000) (Velasco, García & Ahumada, 1999), no implica que toda heurística pueda verse siempre como un algoritmo. Como ha sido correctamente ejemplificado por Sergio Martínez en su trabajo *El concepto de Heurística* (2000: 38) el término heurística no necesariamente está subordinado a una concepción algorítmica de la ciencia, y podemos hablar de una concepción heurística de la ciencia no reductible a algoritmos. Martínez trata de contextualizar estas consideraciones, ejemplificando a través de Zahar y Lakatos que toda atribución heurística debe en última instancia formularse como un argumento deductivo.

Entender las heurísticas en este sentido implica aceptar que no son simplemente reglas que se necesiten en casos que por cuestiones de complejidad sea muy difícil o imposible usar procedimientos algorítmicos. No son algoritmos interpretados desde otra perspectiva que producen resultados correctos la mayoría de las veces aunque no siempre. Podríamos decir que una visión heurística de la ciencia no subordinada a una concepción algorítmica es aquella que le da a la heurística un significado que va más allá del uso que se ha hecho de esta noción en IA. Martínez da un paso en esta dirección, afirmando que las heurísticas pueden materializarse en instrumentos y que las ventajas que producen el uso de los mismos no pueden entenderse desde el punto de vista algorítmico.

Así pues, es claro que el procedimiento heurístico que implementa un instrumento no puede reducirse a decir que es un algoritmo implementado materialmente. La regla heurística implementada hace depender el resultado de la manera en que la implementación genera una distorsión sistemática que puede corregirse por lo menos parcialmente, si se sabe algo acerca del origen (causal) de la distorsión (Martínez, 2000: 42-3).

Martínez entiende también que la no subordinación del concepto de heurística al concepto de algoritmo puede encontrarse en el cuestionamiento de Roger Penrose de que la física sea en última instancia una búsqueda de algoritmos. Como es ampliamente conocido, este físico ha argumentado contra la idea de que la obtención de ciertas verdades matemáticas se realice por medios de procedimientos algorítmicos.

Martínez atribuye a Simon una concepción tradicional de heurística que retiene todavía demasiado de la vieja manera de entender la relación entre razonamientos concretos y los modelos abstractos que pueden servir de normas. El modelo de una racionalidad sustantiva construida a partir de procedimientos algorítmicos seguiría según Martínez desempeñando el papel de ideal normativo para Simon (Martínez, 2000: 53). Esto es consecuencia de la separación tajante que Simon realiza entre teorías de la acción y de percepción; y las teorías del conocimiento. Es precisamente esto último lo que ya en otro trabajo expusimos (Velasco, García & Ahumada, 1999) como una nueva forma de entender el concepto de heurísticas, y que presenté en los estudios psicológicos del problema del viajante. La idea es caracterizar una noción de heurística basada en algún tipo de información espacial o visual. Es a este nivel que cobra sentido la apelación a la percepción que Martínez señala en su artículo. En tanto que una heurística esté digitalmente basada, es difícil apartarse de una idea subordinada a la noción de algoritmo. Un instrumento podría ser entendido desde esta perspectiva, como sistemas no digitales que instancian heurísticas no reductibles a algoritmos. De ser esto así, constituirían argumentos a favor de una concepción heurística de la ciencia más general que la basada en los ejemplos concretos de uso de heurísticas no subordinados a la noción de algoritmo. Ahora, con estas consideraciones podemos tomar un nuevo eje respecto a la caracterización de la noción de heurística. En cierta manera, esta noción está vinculada a reglas y a los tipos de información sobre la cual se instancia. Es por esta razón que científicos cognitivos con Feigenbaum (Feigenbaum, 1989), hablan de heurística como información, o como manejo de información.

## 2. Heurística e información

En esta sección intentaré derivar las consecuencias que tendría sobre la noción de heurística el punto de vista de la información. Tomando como punto de partida el análisis de Judea Pearl (1984) sobre este tópico; me focalizaré fundamentalmente en los procesos de simplificación obtenidos al agregarle al modelo restricciones adicionales. Luego, estableciendo las distintas variantes de la misma, consideraré en qué medida casos extremos nos llevarían a una definición de heurística que vaya más allá de los usos que se hacen de esta noción en ciencias cognitivas, especialmente la parte de la misma involucrada en el análisis del descubrimiento científico. En otras palabras, se intentará explorar cómo interactúan en un concepto general de heurísticas la relación entre simplicidad, complejidad y cantidad de información bajo el supuesto general de que las heurísticas son descubiertas al utilizar modelos simplificados del dominio del problema. Vinculado a este origen de las heurísticas, se evaluarán también los efectos de la programación en la construcción de las heurísticas y su viabilidad como simulación humanamente adecuada de los modelos computacionales de descubrimiento científico, situación que ha sido puesta en tela de juicio en los modelos computacionales de descubrimiento AM y KEKADA (presento estos modelos computacionales con cierto detalle en el Apéndice 2).

A pesar del uso frecuente que se hace de la noción de heurística y la fecundidad que ha mostrado este concepto en filosofía de la ciencia y en ciencias cognitivas, sigue siendo un término cuyo significado está lejos de ser claro.

La cuestión no es trivial, al igual de lo que ocurre con el concepto de resolución de problemas. De acuerdo a la caracterización que hagamos de la misma, y más específicamente de acuerdo a lo que rotulemos como heurística, tendrá consecuencias diferentes sobre la adjudicación de carácter racional a la generación o a la justificación de nuevas teorías, leyes, conceptos, etc.

Por la influencia que ha tenido la inteligencia artificial, es común que se asocie la palabra heurística a reglas o técnicas de descubrimiento neutrales en cuestiones teóricas. Pero, ni siquiera dentro de la misma inteligencia artificial esta caracterización de heurística está unánimemente aceptada. Científicos cognitivos como Feigenbaum (1989) consideran que desde la irrupción de los sistemas expertos y su indudable éxito, se ha producido un cambio en lo que se entiende por heurística. En este sentido considera que ya podemos hablar de heurística como conocimiento, como atajos en la resolución de problemas por conocimiento indexado del dominio. El éxito con que un sistema experto resuelve problemas (químicos, médicos, geológicos, etc.) radica más en incorporar bases de conocimiento que mediante la implementación de estrategias de búsqueda generales y específicas. Para algunos problemas, el aumento del número de reglas a expensas del conocimiento no produce mejoras en la resolución del mismo. El lema de este nuevo período se describe con la frase “el conocimiento es poder”

En trabajos en colaboración (Ahumada, et al., 2000) (Velasco, García & Ahumada, 1999) mostramos que a partir de la existencia de redes neuronales, modelos mentales y representación mediante imágenes era posible hablar también de heurística como representación espacial o visual.

La pregunta que nos surgió en ese momento es, ¿hay una estructura común que pueda unificar o hacer entendible estas caracterizaciones aparentemente dispares? ¿qué efectos tendría esto sobre la racionalidad de la noción de heurística y de descubrimiento/justificación?

Antes de contestar estas preguntas presentaré las definiciones clásicas que se han dado de heurística.

a) Heurística es reducción de búsqueda (Feigenbaum, 1963)

b) “La heurística, para llamarla por su nombre, es un resumen, una doctrina especial para uso de aquellos que, tras haber estudiado los elementos ordinarios, desean dedicarse a la solución de problemas

matemáticos. No sirve más que para esto. (Traducción libre a Pappus de Polea en (Polya, 1945))

c) Heurística como proceso: Un proceso que podría solucionar un problema dado, pero que no ofrece garantías de hacerlo así, es llamado una heurística para aquel problema.

d) Heurística como sustantivo: su uso es raro y generalmente significa el arte del descubrimiento. El costo infligido por la falta de garantía depende del costo del proceso y de qué algoritmos están disponibles como alternativas. Por ejemplo, el problema de probar teoremas en lógica.

e) Heurística como técnicas de descubrimiento neutrales en cuestiones teóricas. (Interpretación de Hacking sobre heurística en Lakatos (Hacking, 1981)).

f) Heurísticas son criterios, métodos o principios para decidir cuál entre varios cursos alternativos de acción promete ser el más efectivo en orden a alcanzar un objetivo (Pearl, 1984: 3).

g) Heurísticas como la característica distintiva de los procedimientos heurísticos, la existencia de sesgos sistemáticos en la generación de error. (Martínez, 2000: 43)

A pesar de la amplitud de los conceptos asociados con el término “heurística”, esta lista no nos aclara el punto principal acerca del problema que estamos enfrentado en este apartado, qué rol juega la información en la heurística. Esto se hace evidente con las extensiones que se han realizado en ciencias cognitivas donde ya se habla de heurística como información específica sobre el problema. Así en este sentido, se ha afirmado que los sistemas expertos que poseen información indexada sobre el problema en cuestión facilitan la resolución de un problema y muestran que por más reglas que posea un sistema, no es suficiente para hacer más rápida la consecución del objetivo.

Por lo menos en inteligencia artificial podemos decir que hay un cambio entre el paradigma de reglas y el paradigma de conocimiento

como aquello que produce la resolución de ciertos problemas. Esto también puede ser entendido como un cambio de heurística como regla a heurística como información.

La irrupción del conocimiento en la definición de heurística, aunque podría no resultar intuitivo, como ya dijimos, para aquellos familiarizados con inteligencia artificial clásica, evidentemente satisface un componente innegable del concepto de heurística, controla la búsqueda en la resolución de problemas. Pero, ¿podemos decir, tal como lo manifiesta Polya que la heurística es un resumen?

El concepto moderno de heurística que introduce Polya es bastante poco aclarador. Es un concepto que supone como eje principal la noción de analogía, una noción que deja abierto un abanico de posibles aspectos para el concepto de heurística. La noción que siguió de heurística como regla, como estrategias procedimentales que actúan sobre un nivel simbólico, estuvo en principio bastante ligada a la resolución de acertijos, problemas cuya resolución en general se sabía previamente.

Esto ha dado un concepto de heurística que no sólo permitió establecer las condiciones suficientes para resolver acertijos, sino también avanzar hacia formas más sofisticadas de actividad inteligente, por ejemplo, descubrimiento científico. Pero, el éxito limitado de estos desarrollos, fundamentalmente en lo que se conoce como la generación de teorías científicas profundas (relatividad, cuántica, etc.) ha limitado su aplicabilidad a la filosofía de la ciencia, disciplina que por otra parte ha hecho suya la concepción heurística.

¿Podemos decir a pesar de esto que la noción de heurística en filosofía de la ciencia es la de heurística como regla? Antes de responder esta pregunta conviene hacer algunas aclaraciones. En lo que podemos denominar el paradigma clásico de heurística ya es posible hacer algunas distinciones que podrían servir para abordar otras versiones de heurísticas o una redefinición de la versión clásica que explique más adecuadamente el uso extendido a la filosofía de la ciencia. Voy a tomar para esto al

que considero el trabajo más completo sobre heurística el libro *Heuristics: Intelligent Search Strategies for Computer Problem Solving* (Pearl, 1984). Estas versiones se expondrán en los apartados siguientes.

### 3. El problema de los orígenes de las heurísticas.

En los comienzos de la inteligencia artificial se explicaba este origen apelando a la metáfora de la hormiga “una hormiga no es más compleja que el medio al cual trata de adaptarse” (Simon, 1981: 63). Por lo tanto, las heurísticas eran simplemente reflejos de la estructura del medio. Pero, esta forma de entender o producir heurísticas no parece ser adecuada para dar cuenta de los diversos significados que vimos que toma esta noción. Y esto no tan sólo por el problema del rol del conocimiento y la representación en la resolución de problemas, sino también por el carácter artificial que tienen muchas heurísticas de sistema de descubrimiento mecanizados. Por ejemplo, el programa AM s un programa que busca el descubrimiento de nuevos conceptos y conjeturas en matemáticas elemental y teoría de conjunto; posee heurísticas motivadas más por la sintaxis del lenguaje de programación que por cómo se comportan los matemáticos ante los problemas que el programa resuelve. (En Apéndice 2 presento con algo más de detalle este programa).

En virtud de todo esto, conviene hacer previamente una clasificación general en base a los mecanismos básicos o protoheurísticas que encontramos en la mayoría de los procesos heurísticos:

a) Generar y testear: es el mecanismo explícito de la teoría general de resolución de problemas, Newell (Newell, 1994) dijo que todas las heurísticas son un subderivado de esta heurística básica. La otra protoheurística es:

b) Dividir y podar. Este proceso supone que ya tenemos dados todos los posibles caminos hacia la solución y que el proceso heurístico consiste en eliminar lo superfluo dejando como resto la conclusión o los caminos. La inteligencia artificial rara vez menciona esta metáfora, prefiriendo describir la resolución de problemas como proceso de “generar y testear” (Newell & Simon, 1972), creando nuevos objetos más que eliminando objetos de conjuntos preexistentes que llevan hacia la misma. El paradigma dividir-y-podar (split-and-prune) enfatiza la popularidad de los métodos de resolución de problemas para muchos problemas, mientras el paradigma de creación de objetos se focaliza sobre la única estructura caracterizada por una representación simbólica de un problema dado

Se ha señalado correctamente que esta segunda clasificación no ha sido explícitamente reconocida dentro de la teoría de resolución de problemas aunque ha sido central en lo que se denomina investigación operativa (Pearl, 1984).

La diferencia no es trivial, en la medida en que el método de dividir y podar podría extenderse a sistemas computacionales paralelos o conexionistas dándole a los mismos el carácter de heurísticos.

#### **4. Heurística y búsqueda sistemática:**

No toda búsqueda sistemática es heurística, (aunque podríamos decir que tiene valor heurístico respecto a una búsqueda aleatoria). En este sentido, puede ser de utilidad la definición de Campbell (Campbell, 1974) que distingue claramente entre heurística y procesos de variación ciega. Los procedimientos de búsqueda sistemática en primera profundidad y primero por amplitud (*breadth-first*) no usan información sobre la naturaleza del problema para guiar el proceso de búsqueda.

En término de modelo de grafos usualmente decimos que una estrategia de búsqueda no es informada cuando la localización del nodo objetivo (o nodos) no altera el orden del nodo expansión, excepto por supuesto para las condiciones terminación.

## **5. Heurística e información por modelos simplificados**

La conexión entre heurísticas y modelos simplificados propuesta por Stan Rosenschein y desarrollada por Judea Pearl (1984) abre un nuevo escenario en la clasificación de las heurísticas y en la determinación del origen de las mismas. Esta aproximación permite entender que no toda heurística necesita ser un resumen o, utilizando una denominación más actual, un patrón que exprese de modo más económico un conjunto de datos.

La idea básica de esta propuesta es que las heurísticas son descubiertas o generadas consultando un modelo simplificado del dominio del problema. La novedad que para mí trae este punto de vista, está en que el modelo simplificado puede ser más complejo que el modelo del problema que intenta resolver.

Veamos algunos ejemplos: un modelo se puede simplificar por el uso de modelos relajados (eliminar restricciones del problema), agregar restricciones al modelo original, consideraciones probabilísticas o el uso de modelos analógicos o metafóricos.

El uso de modelos analógicos o metafóricos puede tener varias formas; el más común es el que usa un problema análogo ya resuelto. Pero, puede significar también algo diferente: los modelos analógicos pueden mejorar los procesos de quien resuelve el problema al ajustarse a ciertas estructuras poseídas por el mismo. En este caso, la información que toman las heurísticas no tienen que ver con la estructura del

problema en sí, sino con la estructura cognitiva del sujeto. Esta forma de entender algunos tipos de heurísticas es totalmente distinta a la metáfora de la hormiga, donde la heurística proviene fundamentalmente de la estructura del problema. Esto, por supuesto, permite también que la cantidad o complejidad de la información del modelo simplificado pueda superar a la del modelo del problema original.

### *Heurística como fuentes de información con ruido:*

Esta segunda aproximación considera a las heurísticas como fuentes de señales con ruido, y caracteriza la calidad de la información ofrecida por una heurística determinada, especificando la precisión de su estimación del costo (complejidad versus precisión).

¿Qué nos dice de nuevo esta nueva forma de aproximarnos al origen de las heurísticas? ¿Ofrece algunas ventajas para considerar la relación entre filosofía de la ciencia y heurística?

No parece haber una conexión directa con el uso que se hace en filosofía de la ciencia de la noción de heurística. Aunque, las distintas variantes que presenta esta clasificación, fundamentalmente por la admisión tanto de información como reglas, cubriría las distintas acepciones dadas. Por otra parte, la heurística mirada como producto de un modelo simplificado entre la estructura cognitiva del sujeto y el problema, y la heurística como estimación de costos, no son ajenas al uso de esta noción en la filosofía de la ciencia. Pero, no debemos olvidar que un análisis como el de Pearl esconde que estamos hablando no sólo de escalas diferentes, y con esto me refiero a la distancia que hay entre resolución de acertijos y resolución de problemas científicos, sino también al tipo de problemas al que está dirigido su análisis, fundamentalmente a problemas mal definidos.

Pero, por otra parte ofrece una explicación de por qué las heurísticas provenientes de metáforas o analogías son escasas o triviales en los modelos computacionales de descubrimiento científico. La

existencia de este tipo de heurística depende de la facilidad que ofrece a un sujeto cognitivo. En este sentido se entienden las objeciones que se les han hecho a estos modelos ¿cómo encajamos en una teoría del descubrimiento científico como resolución de problemas la analogía de Bohr entre sistema solar y su modelo atómico? Una respuesta posible sería decir que incorporamos información al modo de los sistemas de producción, tal como lo propone Feigenbaum. De acuerdo a la estructura que adoptamos, no nos salimos del concepto de heurística incorporando información clasificada en una estructura condición-acción propia de estos sistemas. Pero esto no es suficiente, faltaría algo más que a pesar de las diferencias asocie los dos tipos de informaciones. El análisis de Pearl da por sentado que esto puede hacerse y es entendible que para algunos problemas o situaciones esto es válido (por ejemplo, cuando basta una información proposicional para expresar la estructura de la información), pero no cuando tratamos con ejemplos como el anterior.

No obstante constituye un progreso en la comprensión de la noción de heurística, mostrando las distintas facetas que la misma puede presentar bajo una estructura común, esto es, la simplificación del modelo bajo distintas formas de manejos cuantitativos de la información.

## **6. Evolución, variación ciega y descubrimiento como heurística**

¿Se opone o contradice la concepción heurística del descubrimiento a la concepción campbelliana de la creatividad? Esta pregunta no es nueva, hace ya más de 40 años Campbell se la hacía en su célebre trabajo *Blind variation and Selective Retention in Creative Thought as in Other Knowledge Processes* (Campbell, 1987). ¿Por qué es importante volver sobre ella? Hay muchas razones que justificarían este regreso, a diferencia de lo que ocurría en esa época. La cuestión no se

soluciona contraponiendo las visiones gestálticas y computacional de la creatividad con la epistemología evolucionista. Han surgido en estos últimos años nuevos paradigmas computacionales que nos llevan nuevamente a preguntarnos sobre la adecuación de estas posturas, por ejemplo redes neuronales, algoritmos genéticos y computación con ADN. Por otra parte, los actuales defensores de la epistemología evolucionista, no parecen haber abandonado la idea de que los procesos de variación en la evolución, tanto orgánica como del conocimiento, sean totalmente ciegos. Ante todo esto, ¿Es posible todavía sostener una concepción heurística de los procesos de descubrimiento?

¿Cuál es el estado actual de esta discusión? Sin ánimo de ser exhaustivo, podemos decir, en líneas generales, que hay autores que sostienen que existe una clara incompatibilidad entre estas dos posiciones (por ejemplo, Simonton, y Kantorovich). Otros entienden que se trata de dos perspectivas compatibles pero con distinta generalidad; la concepción darwiniana puede dar cuenta de algunos tipos de descubrimientos (creativos) de los que no puede dar cuenta la otra concepción.

Si bien estas son discusiones que ya tienen algunos años, varios textos actuales sobre descubrimiento han avivado nuevamente estas oposiciones a partir de la importancia que en los últimos años ha adquirido el descubrimiento para la filosofía de la ciencia. Esto ha producido algunas variaciones en las concepciones de los epistemólogos evolucionistas que en líneas generales podemos decir que consisten en usar una mezcla entre el modelo de Campbell y el concepto de descubrimiento casual o por *serendipity*. Con esto se intenta destrabar una concepción de descubrimiento que quedó de algún modo relegada como teoría del descubrimiento, entre otras cosas, por la obvia observación de que gran parte de la empresa científica tiene un fuerte componente intencional. La noción de descubrimiento como *serendipity* nos permite ver al descubrimiento como un proceso tanto intencional como ciego.

En síntesis, lo que encontramos actualmente en la literatura filosófica evolucionista sobre descubrimiento es una concepción ligada al darwinismo más *serendipity* y una negación de que el descubrimiento mecanizado pueda dar cuenta de todo tipo de descubrimiento. En palabras de Kantorovich

El descubrimiento mecanizado es inapropiado para replicar procesos no intencionales, subconscientes e involuntarios que son parte de los procesos de descubrimiento científico. Estos incluyen descubrimiento por *serendipity*, subconsciente y procesos colectivos y descubrimientos generados por discernimiento y facultades tácitas (Kantorovich, 1993: 258)

Así, intentaré evaluar dos cuestiones centrales; por un lado, la relación que podemos establecer entre ceguera y heurística y, por otro lado, la relación mecanización del descubrimiento-darwinismo. Dos cuestiones que en los trabajos de Campbell estaban de algún modo unificadas y que ciertos desarrollos actuales en computación han cuestionado. Estas ideas son bastantes generales, pero mi interés en las mismas no está en tomar partido por una u otra, sino en ver los resultados colaterales que pueden generar sobre ciertos conceptos ligados al descubrimiento, por ejemplo el concepto de heurística, el concepto de resolución de problemas, etc.

### ***El modelo Campbelliano de creatividad***

Para Campbell la obtención de conocimiento completamente nuevo no puede lograrse sino a través de un proceso de variación ciega y retención selectiva. Su concepción depende en cierta medida de la aceptación de la validez como punto de partida de los informes autobiográficos de individuos creativos. El razonamiento opera del siguiente modo, los individuos creativos en sus informes autobiográficos nos dicen que sus productos creativos no son obtenidos siguiendo de modo consciente un conjunto de reglas o preceptos. Informan procesos

subconscientes, caóticos y obtenciones de logros fuera de sus objetivos iniciales.

Campbell está convencido que todas estas intuiciones pueden ser explicadas a partir del siguiente esquema:

a. Un proceso de variación ciega es fundamental para todos los logros inductivos, para todo genuino incremento del conocimiento, para todo incremento en ajuste del sistema al medio.

b. Los procesos que constituyen un atajo en un proceso de variación ciega y retención selectiva son ellos mismos logros inductivos, conteniendo conocimiento acerca del medio alcanzado originalmente por variación ciega y retención selectiva.

c. Además, tales procesos de atajo contienen en sus propias operaciones un proceso de variación ciega y retención selectiva en algún nivel, sustituyendo la exploración locomotora o el acecho de vida o muerte de la evolución orgánica. Desde el punto de vista de la teoría clásica de resolución de problemas, lo que Campbell plantea es que sólo un concepto de resolución de problemas no teleológico permite acceder a un contenido de conocimiento totalmente nuevo. Es decir, no se podría tener un objetivo claramente definido (el objeto buscado o generado) debido a que en tal caso es inevitable algún tipo de comparación entre el estado actual y el objetivo, lo cual llevaría directamente a un procedimiento de tipo heurístico. Por otra parte, el mecanismo generativo no debe privilegiar ningún curso de acción, es decir no debe ser una generación acotada en relación a todas las posibilidades combinatorias del mecanismo en cuestión.

Lo atractivo de esta aproximación es que soluciona una de las partes de la paradoja de Menón. Es compatible con la restricción de que no se conoce lo nuevo, por lo tanto tiene sentido buscarlo o generarlo. El problema, siguiendo con la paradoja, es cómo reconocemos lo nuevo si aceptamos que el objetivo (la solución del problema) no puede estar de algún modo pre-definido. En la evolución orgánica esto no sería un

problema, la selección es producida por la eliminación orgánica. Pero, ¿cuál es la contraparte de esto en la evolución cultural?

Campbell y más recientemente Simonton, citan a la selectividad estética de Poincaré como forma de finalizar un proceso variación subconsciente. El problema con esta salida es si esto realmente puede explicarse en términos darwinianos o dentro del esquema de Campbell o requiere apelar a otro tipo de esquema.

Una interpretación posible del esquema de Campbell en términos de resolución de problemas es definirlo como resolución de problemas por satisfacción de restricciones. Esta perspectiva sería claramente no heurística en el sentido tradicional del término porque es independiente la producción de la selección.

La diferencia entre la concepción evolucionista de problema y la concepción clásica de problema no pasa por el proceso de variación en sí mismo, sino más bien por la ceguera o no de este proceso. Esta comparación se complica aun más cuando consideramos que en el fondo toda heurística es en última instancia un subproducto del proceso generar-testear. ¿Cómo comparamos entonces estas dos aproximaciones que rivalizan en su preeminencia como esquema general para el descubrimiento y la creatividad científica?

Conviene en principio hacer una aclaración. Para Campbell no son incompatibles; existen heurísticas que acortan el camino y producen procesos de variación no ciega, pero la génesis de estas heurísticas proviene de un proceso de variación ciega y retención selectiva. Sin embargo, esto no resuelve el problema. La inexistencia de un conjunto cerrado de heurísticas que pueda dar cuenta de toda creatividad o descubrimiento hace que estas dos posturas sean incompatibles como una teoría general del descubrimiento y la creatividad. En este sentido, la artificialización completa del descubrimiento no podría lograrse usando solamente un esquema del tipo heurístico; se necesitaría un proceso de variación ciega que genere las heurísticas necesarias para resolver nuevos tipos de problemas. ¿Constituye esta limitación una limitación a todo

intento de hacer artificial, mecánico o computacional el descubrimiento? Tanto en los trabajos de Campbell, como en epistemólogos evolucionistas posteriores, la respuesta es afirmativa. El esquema básico sostiene que no podemos desterrar la intuición, inspiración e *insight* de los procesos de descubrimiento. De esto se sigue que no hay reglas de descubrimiento. Todo gran descubrimiento tiene algún componente irracional. No obstante podemos comprender este proceso usando el modelo de Campbell. Parece no haber otra teoría que dé cuenta mejor de cómo se produce el aumento de conocimiento. La aceptación de estos dos supuestos implica que la creatividad no puede simularse computacionalmente, ni siquiera en términos de entrada-salida.

El surgimiento de la computación evolutiva cambió la discusión sobre la relación epistemología evolucionista y computación. Entre los autores que recogieron esta nueva metáfora de creatividad está Simonton quien en su libro *Origins of genius. Darwinian perspectives on creativity* (1999) intenta, con algunas reservas, mostrarnos que la creatividad puede ser implementada computacionalmente por medio de algoritmos genéticos y programación genética. Es decir, a diferencia de Campbell y Kantorovich cree que no es incompatible con el modelo evolucionista del descubrimiento su implementación computacional.

Las ideas evolucionistas no sólo han sido llevadas a un plano computacional en los algoritmos genéticos y las redes neuronales, sino también en lo que se conoce como computación molecular o computación con ADN. Se considera a esta última como la que más fielmente instancia el modelo darwiniano de la creatividad. Pero el ejemplo más interesante de los logros en este sentido son los resultados obtenidos por Koza (Koza, 1992) (Koza, 1994) en lo que se conoce como programación evolutiva. Para Koza, las heurísticas (o programas) son generadas mediante un proceso de tipo darwiniano. Cabe aclarar que no se debe sacar una conclusión apresurada de esto. Sería prudente no extraer de todo esto que ya estamos sobre la senda de una teoría computacional de la creatividad. Pero, hay algunos pasos en este argumento que merecen una discusión más profunda. Los ejemplos

resueltos con estos nuevos paradigmas computacionales, o con estas nuevas máquinas, son problemas que tienen el objetivo bien determinado; son parte de lo que anteriormente hemos denominado problemas bien definidos.

Siguiendo con las concepciones evolucionistas actuales sobre el progreso científico, debemos hacer algunas precisiones, el concepto de *serendipity* que debe ser distinguido del descubrimiento casual por la naturaleza repetible del primero, presenta varias formas cuyo ajuste a los esquemas evolucionistas está lejos de ser claro. Veamos a modo de síntesis las categorías más comunes que nos ofrece la literatura:

- 1) Accidental pero inevitable.
- 2) Accidental no inevitable.
- 3) Buscar y encontrar más de lo que se buscaba.
- 4) Buscar A y obtener B.
- 5) No buscar y encontrar.

Las tres últimas parecen ajustarse más a la concepción campbelliana de la creatividad. Para Simonton, estas subespecies de *serendipity* se ajustan a las versiones que nos dan los científicos creativos sobre sus productos y a los resultados de experimentos sobre creatividad. En principio concedo que esto sea plausible, aunque como argumentaré más adelante, no es la única explicación posible. El problema de la imagería mental también surge de los reportes autobiográficos y experimentos, y como dijimos anteriormente, puede vincularse a la psicología de la gestalt. Como también ya dije, Campbell se refirió a ella en su trabajo de 1963 *Blind variation and selective retention in creative thought and other knowledge processes* (Campbell, 1987). Su opinión fue que no era incompatible la gestalt con la epistemología evolucionista. Pero, me pregunto, ¿alguna variante de la gestalt no es claramente incompatible con el modelo de variación ciega? Y la imagería mental ¿no es un claro ejemplo de variación no ciega descartando el ensayo y error como mecanismo básico de todo aprendizaje? ¿Cuál es la respuesta

actual de la epistemología evolucionista? Pocos epistemólogos evolucionistas abordan estos problemas. Una excepción es Simonton quien, de una forma a mi entender bastante *ad hoc*, trata de refutar esta crítica a la Gestalt. Sostiene que los experimentos gestálticos pueden ser reproducidos con una versión skinnereana del conductismo. Los ejemplos gestálticos de aprendizaje no son más que variaciones sobre condiciones operantes previamente aprendidas. Asumiendo que el conductismo de Skinner es darwiniano, esta crítica gestáltica se diluye.

Sin embargo, Simonton no ha tenido en cuenta al realizar estas observaciones, los nuevos paradigmas de computación que instancian ciertos principios gestálticos. Por ejemplo, la aproximación a través de patrones dinámicos de autoorganización atacaría directamente el concepto de variación ciega del modelo campbelliano. Pero, de ser esto cierto, el concepto de heurística caería fuera del cognitivismo clásico. Esta corriente volvería a su antiguo dueño, que según Kelso (1997) no pudo avanzar a pesar de sus correctas intuiciones porque no contaba con modelos teóricos específicos basados en los conceptos de sistemas dinámicos autoorganizados.

A mi modo de ver la única forma de defender la concepción heurística del descubrimiento y la creatividad frente al modelo de Campbell sería rescatando algunos principios de la psicología de la gestalt. Por supuesto que esto derribaría en parte el carácter normativo del contexto de descubrimiento o de invención. Pero no libraría totalmente a los detractores de este contexto de su preocupación por el mismo. Elegir cuál es la psicología del descubrimiento o invención puede llevar a contradicciones ontológicas y epistémicas respecto a lo sostenido en el contexto de justificación.

Sin embargo, éste no es mi principal objetivo, sino establecer la relación entre mecanización computacional del descubrimiento, la epistemología evolucionista de Campbell, y sus repercusiones en el concepto de heurística. En principio, a diferencia de lo que en su momento entendió Campbell, estamos en condiciones de afirmar que el

darwinismo puede ser producto de un sistema computacional artificial. La pregunta que queda flotando es; ¿lleva esto a una perspectiva no heurística sobre la resolución de problemas? La literatura al respecto es bastante ambigua. En principio podríamos afirmar que efectivamente el concepto de variación ciega nos lleva a una versión anti-heurística de la resolución de problemas. Pero, a esta altura no todos los que usan los modelos darwinianos en computación parecen acordar con esta posición. Trabajos como los de J. E. Beasley (1999), por ejemplo, nos hablan de los algoritmos genéticos como heurísticas poblacionales. Allí los mecanismos trabajan con una población de soluciones y las combinan de algún modo para generar la solución. Nos dice Beasley

“hay algo acerca de las heurísticas poblacionales que significa que a veces son capaces de producir mejores soluciones cualitativas que las heurísticas de una sola solución (heurísticas que tiene una única solución a un problema y continuamente buscan mejorarla)” (Beasley, 1999: 3).

La computación con ADN también podría ser considerada como una heurística de este tipo.

## 7. Conclusiones

a) El modelo computacional tradicional del descubrimiento y la creatividad no satisface la concepción de problema y su solución presentado por la Epistemología Evolucionista de Campbell.

b) Esto hace que no pueda explicar fenómenos como *insight*, inspiración e intuición.

c) Entender estos procesos desde una perspectiva darwiniana no implica negar la posibilidad de construir sistemas artificiales que simulen tales tipos de procesos.

d) Puede considerarse que los algoritmos genéticos y la computación con ADN operan dentro de la estructura de Campbell de

variación ciega y retención selectiva, pero deben hacerse más estudios al respecto. No es claro si el rol que juegan la variación y la mutación en estos sistemas replica el modelo evolucionista de Campbell.

e) El tipo de problemas que los algoritmos genéticos y la computación con ADN resuelven difiere sustancialmente de aquellos asociados a la creatividad científica, por lo que hablar de mecanización computacional de la creatividad vía estos modelos es todavía prematuro.

f) La concepción gestáltica sobre la creatividad es más adecuada que la campbelliana para explicar o dar cuenta de descubrimientos que involucran algún tipo de imagería mental, procesos que también parecen ser esenciales en los casos de *insight*, intuición e inspiración.

g) Los conceptos de las epistemologías evolucionistas actuales (variación ciega y retención selectiva más *serendipity*) tienen también la limitación de no dar cuenta del problema de la imagería mental.

h) Finalmente, dadas las limitaciones presentadas a la epistemología evolucionista, una concepción heurística del descubrimiento sólo podría rescatarse a través de una concepción de tipo gestáltica de los procesos creativos o que incluya otro tipo de representación ya sea visual o analógica.

## V

# DESCUBRIMIENTO

Responder qué significa el término “descubrimiento” y cómo se lo diferencia de “invención” y “creatividad” no es simple. La literatura da cuenta de esto proponiendo desde la eliminación de alguna de estas distinciones (Kantorovich, 1993) hasta la conveniencia de sólo presentarlas implícitamente a través de ejemplos (Gorman, 1998).

No obstante, al igual que hicimos con problema, resolución de problemas y heurística, es inevitable para esta tesis abordar los significados que giran alrededor de estas palabras. La relación entre descubrimiento y resolución de problemas no sólo depende de lo que entendamos por problema y su resolución sino también del significado que le atribuyamos a la palabra “descubrimiento”

En su uso primigenio, se entiende por “descubrimiento” encontrar, develar, poner al descubierto algo cuya existencia se presupone o es independiente de las acciones del descubridor. Ejemplos clásicos son el descubrimiento de América, el descubrimiento de los rayos X o el descubrimiento de Neptuno. Descubrir en este sentido, significa superar los obstáculos que ocultan un fenómeno u objeto en cuestión.

Pero con el transcurrir del tiempo tal significación también se usó para referirse a productos o procesos. Al admitir éstos una activa intervención humana en las condiciones iniciales, objetos o instrumentos comenzaban a tener características generativas que se solapaban con creatividad e invención.

Esto hace que actualmente no sea tan fácil distinguir entre estos conceptos que en algún momento eran claramente diferenciados. Por esta razón, predicar racionalidad, mecanización, simulación, comprensión, etc. sobre cualquiera de estos términos no dice nada hasta que no precisemos claramente en qué sentido se lo dice. Pero, ¿Cómo aclaramos usos tan diversos de este concepto con tanta carga histórica?. La salida de Gorman, con cierta desconfianza hacia las disquisiciones filosóficas, es ofrecer una lista de ejemplos paradigmáticos antes que una serie de definiciones. Sin embargo, su objetivo no es comparar descubrimiento con creatividad (más problemática) sino más bien con invención (menos problemática). Una alternativa distinta, seguida entre otros por Kantorovich (1993), consiste en desplegar estructuras, casos generales y particulares de cada uno de estos conceptos en el ámbito científico y a partir de allí, proponer una nueva taxonomía que se ajuste a los objetivos de una teoría general del descubrimiento y la creatividad.

Para realizar toda esta tarea hay que tener en cuenta que estos conceptos están relacionados a su vez con cuestiones epistemológicas, ontológicas y metodológicas. Esto hace que simplemente encontrar, generar, inventar un objeto o reconocer un fenómeno, no es suficiente para ser rotulado como descubrimiento. Es una condición ineludible el ser reconocido por la comunidad y producir un cambio importante en los sistemas de creencias. La dificultad para obtener un objeto puede ser un elemento importante para que se califique a un episodio como un descubrimiento, pero también se entiende que algo es un descubrimiento por la facilidad con que algunos logran obtener algo que para otros es sumamente complicado o improbable. Las creencias compartidas no sólo producen la admisión de un hallazgo o una invención sino que ofrecen los esquemas necesarios para identificarlo o producirlo. Todo esto hace

que un descubrimiento no sea algo muy objetivo, que dependa tanto del reconocimiento de procesos como del reconocimiento de los productos de estos procesos.

Si bien es cierto que en general el descubrimiento tiene un carácter subjetivo, también hay una dimensión ontológica que tampoco podemos excluir. Por ejemplo, en las ciencias experimentales, estos conceptos hacen referencia a la existencia de algo externo, con cierta independencia del sistema de creencias que permite su identificación. Desde un punto de vista metodológico, las formas o estructuras de los procedimientos juegan a veces un rol esencial, descubrimiento e invención se diferencian de la creatividad en que esta última no es intencional o que creatividad no es nunca un producto de reglas mientras descubrimiento sí lo es.

Después de esta breve introducción, se pueden adelantar algunas afirmaciones sobre los conceptos en cuestión. En primer lugar, es importante tener en cuenta la distinción entre proceso y producto. El descubrimiento, invención y creatividad pueden definirse en función de cómo instancian estos dos niveles. Pero, no siempre es posible encontrar tales diferencias. Como producto, la invención es algo artificial, diseñado ex-profeso mediante un proceso conciente, deliberado y planeado que muestra su utilidad en un campo determinado. Por ejemplo, la radiografía es algo útil, fue diseñada concientemente pero se basa en los rayos X que es un fenómeno natural. Por otro lado, la artificialidad es parte de experimentos que pueden dar lugar a productos creativos y a descubrimientos que para poder llegar a objetos o fenómenos naturales y develarlos se ven necesitados de recurrir a medios controlados artificiales o instrumentos inventados.

En síntesis, productos artificiales en algunas instancias de descubrimientos o de procesos creativos no son indicadores suficientes de que pertenezcan a algunas de las categorías en cuestión. Además de agotarse en una producción artificial, una invención tiene que ser un proceso que responde a un plan previo en vista a obtener una utilidad

determinada. Un descubrimiento, que en su significado ordinario no es generativo, debe en algunas circunstancias incorporar objetos, medios, datos, interferencias al objeto, etc. de corte artificial como paso previo a buscar algo que ya existe.

Se han propuesto distintas vías para resolver estos inconvenientes. Una que ya se mencionó en la sección de resolución de problemas, es la planteada por la IA clásica, que consiste en reducir creatividad a descubrimiento y entender que todo proceso que lleva a producir alguna novedad en nuestro sistema de creencias puede ser reducido a un conjunto de reglas generales y específicas más conocimiento sobre el tema indexado. No hay saltos creativos ni hay procesos repentinos que lleven a la producción de novedad. Otra salida, es la presentada por Kantorovich, desde una versión neo-evolucionista. Propone reivindicar procesos de tipo creativos a partir del análisis de estas nociones con la asignación de dos significados diferente a la palabra descubrimiento. Su idea es distinguir entre descubrimiento mediante exposición y descubrimiento generativo.

Los siguientes descubrimientos entran en la categoría “descubrimiento mediante exposición” (Kantorovich, 1993: 29-32):

1. Descubrimiento a través de observación.
2. Descubrimiento a través de búsqueda.
3. Descubrimiento a través de cálculo y cómputo.
4. Descubrimiento a través de inferencia.
5. Descubrimiento a través construcción dinámica de teoría.

Los siguientes perteneces a la categoría “descubrimiento generativo”:

1. Descubrimiento a través de experimentación.
2. Descubrimiento a través de construcción teórica.

Los descubrimientos mediante exposición son aquellos productos de la observación o las inferencias deductivas. Descubrimiento por generación, son aquellos logrados mediante experimentación activa y construcción de teorías. En la construcción dinámica de teorías los conceptos se obtienen mediante analogía dentro de la misma disciplina u otra disciplina. Mientras que en la construcción teórica se genera la novedad sin una analogía previa, la construcción teórica no opera por refinamiento de sus conceptos.

La idea de Kantorovich es que si uno distingue claramente entre estos dos tipos de descubrimiento, no hace falta usar la dicotomía descubrimiento-invencción. Podemos usar el rótulo de “descubrimiento”, como de hecho se hace en el ámbito científico, para caracterizar a procesos o productos que contienen invenciones.

Las inferencias deductivas son un claro ejemplo de descubrimiento por exposición porque no se aumenta el conocimiento que se halla en las premisas. Las inferencias inductivas también son descubrimiento por exposición porque a pesar de aumentar la información en la conclusión respecto a las premisas, no crean nuevos fenómenos u objetos y más general aún, no incluyen nuevos predicados a los ya contenidos en las premisas (Kantorovich, 1993: 31). Una segunda razón para considerar a las inferencias inductivas como descubrimiento por exposición es que presuponen el principio de uniformidad de la naturaleza.

Descubrimiento por generación son la experimentación y la construcción de teorías. Se crean nuevos conceptos o nuevos instrumentos experimentales, que pueden ser vistos como nuevos canales de comunicación con la naturaleza. Desde un punto de vista ontológico }  
suponen que existe una realidad más profunda que la observacional.

Con algunas reservas es una clasificación que no merece mayores objeciones, si se la usa como un panorama general para relacionar las distintas acepciones con que se usan descubrimiento, innovación y creatividad. La única duda importante que me surge con estas

definiciones y clasificaciones es si es posible entender todo descubrimiento inferencial como descubrimiento por exposición. Esto implica dos cosas. Primero, que la intervención o manipulación no es bajo ningún punto de vista una inferencia. Segundo, que la construcción de teoría para ser generativa no puede ser producto de una inferencia. Esto es, no es un conjunto de enunciados lo que se entiende por construcción de teoría como producto de un descubrimiento por generación.

### ***Inferencia, experimento y descubrimiento generativo:***

La discusión acerca de la relación entre descubrimiento e inferencia tiene una larga historia. La misma gira principalmente en torno a las inferencias abductivas o inferencias a la mejor explicación. No es mi propósito adentrarme en esta sección a este problema, pero no dejaría de señalar que existen trabajos sobre inferencias a la mejor manipulación, que conectarían inferencias con experimentación. (van den Bosch, 1999). De ser esta así, y suponiendo que podemos hablar de inferencias en ese sentido, esto pone en duda la afirmación de Kantorovich de que todo descubrimiento mediante inferencias es por exposición y por lo tanto no generativo. Además, lo que estos trabajos de algún modo avalan es que no sólo debemos considerar la experimentación por manipulación y la construcción de teorías como descubrimiento generativo, sino la interrelación entre ambos, donde las manipulaciones pueden inclusive ser realizadas sin la guía de teorías. También ocurre lo mismo con la afirmación de que el uso de cómputos en los procesos de descubrimiento queda encuadrado como descubrimiento mediante exposición. La posibilidad de simulaciones computacionales tiene un rol similar a los experimentos interventivos, inclusive en una disciplina tan atada a las demostraciones como las matemáticas. Gran parte los argumentos para sostener la existencia de una matemática experimental y de descubrimiento matemático mediante computadoras pasa por el uso de lo que Kantorovich denomina “descubrimiento por cómputo” La

complejidad de los descubrimientos matemáticos que se hacen a través de computadoras, ha producido no sólo un nuevo modo de entender el descubrimiento en estas disciplinas sino que también ha afectado el modo en que se justifican los resultados. En la mayoría de estos descubrimientos no se puede seguir humanamente todos los pasos que llevan obtención de un resultado matemático. Uno podría preguntarse si esto no es una dificultad que tiene que ver solamente con el esfuerzo en recorrer todos los pasos del proceso de descubrimiento y justificación realizado por la computadora. Lo que se está pensando ahora sobre esto, es que la fiabilidad de la computadora es mayor inclusive bajo el supuesto de que algún ser humano pudiera efectivamente hacerlo. El seguimiento humano tiene más probabilidad de error que los procedimientos por computadoras. Ergo, se aceptan resultados presuponiendo que los procedimientos de generación y de justificación del dispositivo son autónomos. (Bailey & Girgensohn, 2003)

En síntesis, la distinción entre descubrimiento, creatividad e invención que nos propone Kantorovich es un buen esquema para un comienzo; tiene el valor de sacarnos de un cuadro simplista, ligado al sentido común de estos términos. La clasificación que propone presenta en definitiva sólo dos categorías, descubrimientos generativos y mediante exposición. Sin embargo, todo el ámbito de la simulación computacional, tiene partes generativas e inferenciales, que hace muy forzada la inclusión en cualquiera de las dos categorías. La inferencia a la mejor manipulación o intervención, también nos cuestiona una clasificación como la propuesta. Lo mismo vale para los procesos y productos logrados por los algoritmos genéticos, programación genética y autómatas celulares. En defensa del autor, habría que aclarar que es un libro cuya publicación se dio cuando todavía todos estos sistemas computacionales no habían impactado.

Una duda, que ya fue en parte desarrollada en la sección sobre concepciones evolucionistas de descubrimiento, es si es posible sostener desde esta concepción, como lo hace Kantorovich, la construcción no enunciativa de teorías. Para que podamos hablar de generación en el

sentido que le quiere dar a este término Kantorovich ese proceso o producto no debería ser abordable mediante inferencias en el sentido clásico del término. Las teorías deberían ser modelos con representaciones no proposicionales. En otras palabras, la idea generacionista que está detrás de la clasificación que nos propone sería más compatible con una concepción de corte gestáltica del descubrimiento que con una concepción de tipo evolucionista.

## **1. Aproximaciones generales al descubrimiento científico**

Los estudios sobre descubrimiento científico abarcan ahora muchas disciplinas, inclusive existe una especialidad seguida por investigadores o grupos de investigadores. De ser un tema aislado, o más bien casualmente considerado de la filosofía, historia, sociología y psicología de la ciencia, ha pasado en estos últimos 20 años a cobrar una dimensión que hace insoslayable presentar a grandes rasgos los principales resultados y en qué medida apoyan o derriban la hipótesis de que el descubrimiento científico es un caso especial de resolución de problemas. En principio parecería que esto no es necesario, que cualquiera que trabaja sobre estos temas está más o menos al tanto de lo que ocurre en otra disciplina, y que se trata de estudios que ya están relacionados. Pero esto no es así, como bien lo señalan Klahr y Simon:

Esta convergencia es a menudo oscurecida por culturas, metodologías de investigación, y fundamentos teóricos dispares de varias disciplinas que estudian el descubrimiento científico, incluyendo historia y sociología, como aquellas dentro de las ciencias cognitivas (por ejemplo, psicología, filosofía e inteligencia artificial). (Klahr & Simon, 1999: 524)

Aún más, pareciera que los progresos sobre estos temas, muchas veces ocurren por un período de tiempo en una disciplina y no en otra.

En el trabajo antes citado, los autores no sólo presentan esquemáticamente los principales resultados sino que ofrecen un conjunto de criterios para comparar los avances logrados en todas las disciplinas sobre este tema.

Klahr y Simon consideran que hay 5 aproximaciones o concepciones generales, a las que he agregado dos más:

a) Histórica.

Estudios sobre descubrimientos que ya ocurrieron y que pueden reconstituirse por medio de publicaciones, notas de laboratorio, correspondencia, entrevista, memos, proyectos presentados, etc.

Un hecho destacable que señalan los autores es que en esta concepción hay trabajos no sólo de historiadores (como Krebs, Holmes, Galison, Gingerich) sino que también encontramos a filósofos (como Thagard y Nersessian).

b) Estudios de laboratorios.

Observación de los procesos de resolución de problemas en laboratorio donde se aíslan uno o más aspectos esenciales de la ciencia tal cual se da. Los estudios son llevados a cabo en laboratorios psicológicos bajo la rúbrica estándar de el diseño experimental, con condiciones control y experimentales y el uso de test de significancia estadística. (Klahr & Simon, 1999: 257)

Los sujetos experimentales usados van desde niños a científicos profesionales, pasando por personas legas y alumnos con poca formación. Entre los experimentos más interesantes encontramos los trabajos de Dunbar y Klahr sobre el descubrimiento del control genético que llevó a Jacob y Monod al premio Nobel.

c) Observaciones de descubrimientos “in vivo” o mientras transcurren.

En esta aproximación el observador registra día a día reuniones de laboratorio, presentaciones, discusiones, etc. En algunos experimentos se usan cámaras que filman todas las actividades de un laboratorio por un período determinado de tiempo.

d) Computacional o modelos de simulación

Replicación de los pasos fundamentales de un descubrimiento mediante computadoras. Desde un punto de vista matemático estos modelos son conjunto de ecuaciones de diferencia.

e) Estudios sociológicos: Explicación del descubrimiento como producto de fuerzas políticas, sociales o antropológicas. (Klahr & Simon, 1999: 260).

Los procesos cognitivos no tienen un rol preponderante, siendo las fuerzas antes mencionadas las motoras de las prácticas científicas que llevan a los descubrimientos. La tendencia a descubrimientos mediante grande equipos de trabajo hace también que este tipo de análisis sobre el descubrimiento tenga hoy una importancia mayor.

f) Aproximaciones filosóficas al descubrimiento científico: (agregada a la clasificación de Klahr & Simon)

En la filosofía también encontramos una dedicación al descubrimiento, siendo sus metodologías y propuestas de una variedad interna comparable a las anteriores. Encontramos estudios basados en la historia de la ciencia, y estudios basados en perspectivas computacionales. No obstante, filósofos como Laudan y Kelly han colocados criterios estrictos de lo que es una aproximación filosófica que invalidan y hacen muchas veces difícil de conciliar con las aproximaciones antes mencionada. Para estos filósofos, una aproximación al descubrimiento desde una perspectiva filosófica debe ser *a priori*, lo que no obsta, como sostiene Kelly, que pueda contribuir a generar nuevos caminos de descubrimientos. La actitud filosófica desde la perspectiva de Nelly (Kelly, 2000) debe llevar a ver no sólo cómo ocurrió un descubrimiento sino también a considerar descubrimientos posibles a partir de métodos y datos disponibles.

La evaluación comparativa de estas distintas aproximaciones no es sencilla. Klahr y Simon proponen una serie de criterios para evaluarlas. En forma sintética estos son los criterios propuestos:

1. Validez aparente: un estudio tiene validez aparente si mide lo que se propone medir. De todas las aproximaciones anteriores la aproximación histórica es la que más satisface este criterio porque se dirige a descubrimientos ya hechos.
2. Validez de constructos: evalúa cuán bien las medidas que están siendo usadas son buenas operacionalizaciones de los constructos teóricos subyacentes.
3. Resolución e intervalo temporal: evalúa en qué medida un método de investigación captura procesos importantes del episodio de descubrimiento estudiado, y la resolución de los datos que describen la conducta durante la extensión temporal del episodio.
4. Productividad para descubrir nuevos fenómenos: capacidad de una aproximación en develar nuevos fenómenos.
5. Rigor y precisión en los datos: tanto de datos cuantitativos como de datos cualitativos.
6. Control y factorización de variables: en qué medida los estudios de casos pueden ser sujetos al control de las variables por parte del investigador
7. Validez externa: en qué medida los resultados pueden ser generalizados.
8. Contexto social y motivacional: factores sociales que influyen en el descubrimiento de una nueva idea. Muchas veces pueden tener un carácter negativo, explicitando los factores que impiden o retrasan un determinado hallazgo. En este contexto, se valoran aproximaciones al descubrimiento que incluyan este factor en su análisis. Desde el punto de vista de la discusiones filosóficas actuales es una variable que ha sido sumamente jerarquizada en aquellos que proponen que la ciencia es una construcción social.

En base a estos criterios Klahr y Simon proponen la siguiente tabla que relaciona los criterios anteriores con las distintas aproximaciones señaladas más arriba:

	Tipos de aproximación				
	Estudios	Estudios de laboratorio		Observación	Modelos
Criterios Evaluativos	históricos	exploratorios	controlados	directa	computacionales
1. Validez aparente	***	*		***	*
2. Validez de constructos	*	*	**	**	**
3. resolución e intervalo temporal					
breve y precisa	*	***	***	**	***
extendida y imprecisa	***			*	**
4. Nuevos fenómenos	***	***	*	***	**
5. Rigor y precisión	*	**	***	**	***
6. Factorización y control		*	***	*	***
7. Validez externa	*	*	**	*	**
8. Factores motivacionales y sociales.	***			***	*

Nota: cada aproximación es evaluada en base a los criterios como: muy alta (\*\*\*), alta (\*\*), modesta (\*), o pobre (vacía). (Klahr & Simon 1999: 264)

Para Klahr *et. al.*, los estudios históricos, junto con la observación directa, son los que mejor responden al criterio de “validez aparente”: investigan el propio fenómeno que se está tratando de explicar. El problema con la observación directa es que, usando terminología kuhniana, en general dan cuenta de descubrimientos en ciencia normal, difícilmente puede coincidir con la observación de un descubrimiento que lleve a un cambio revolucionario. Por otra parte, los estudios históricos tienen dificultad con la resolución y los intervalos temporales, la dificultad de contar con datos sobre intervalos pequeños la hacen una buena aproximación para intervalos extendidos.

Con respecto a “nuevos fenómenos”, también están valuadas muy alto la aproximación histórica y la observación directa. En el caso de la primera, los particularismos de cualquier ejemplo histórico de un descubrimiento importante hacen probable que genere nuevos fenómenos de descubrimientos. La contracara de esto es comparativamente el mal desempeño en relación a la “validez externa”, cuestión que por otra parte podría contrarrestarse en la medida que se vayan acumulando casos individuales con estructuras comunes. En la aproximación histórica, no hay ninguna posibilidad de control, cuestión que explica el vacío en el criterio de “control y factorización”

Los estudios de laboratorio, tienen fuertes limitaciones en cuanto a la “validez aparente”, tanto en la modalidad exploratoria como en la controlada. La generación de nuevos fenómenos marca un fuerte contraste entre la modalidad exploratoria y controlada, obviamente producida por el diseño de la modalidad controlada.

La observación directa, como señalé más arriba, tiene bastantes similitudes con los estudios históricos en relación a la validez aparente. No obstante, se diferencia de los mismos en la posibilidad de analizar períodos de tiempo menores y con mayor precisión.

La modelización computacional, a diferencia de las anteriores, puede ser un medio para implementar los resultados obtenidos por otras aproximaciones. Es decir, puede obrar como complemento, aunque también puede poseer autonomía propia, como en aquellos casos de descubrimientos computacionales cuya construcción haya tenido poca influencia sobre las aproximaciones antes consideradas. Como puede apreciarse claramente en el cuadro, se comporta casi igualmente que los estudios de laboratorio controlados. Una de sus virtudes es que permite obtener los mecanismos y condiciones suficientes para producir un descubrimiento dado. En este sentido, habría un mayor control que en los experimentos de laboratorios controlados, al usarse una computadora y programas en lugar de humanos de distinta formación. Pero la tabla considerada no registra estas diferencias, dándole igual controlabilidad a

ambas aproximaciones. Esto último claramente lo diferencia de la observación directa, donde el control es muy escaso.

## **2. Distintas aproximaciones al descubrimiento y resolución de problemas.**

Además de incluir la sección anterior con el objetivo de dar un panorama general de hacia dónde avanzan las investigaciones sobre descubrimiento y un criterio más o menos general que permita de algún modo su comparación, el objetivo central es evaluar si el descubrimiento en todas estas aproximaciones también es visto como un caso especial de resolución de problemas.

El trabajo de Klahr y Simon sostiene que básicamente todas las aproximaciones antes mencionadas presuponen o están basadas en: 1) búsqueda heurística, 2) estructuras de control para la búsqueda y 3) procesos de reconocimiento, evocados por patrones familiares reconocidos en el fenómeno. (Klahr & Simon, 1999: 78). No niego los puntos 1) y 2); por el contrario, creo que dan cuenta de muchos procesos básicos que tienen lugar en cualquier tipo de descubrimiento. Mi duda está en el punto 3), los procesos de reconocimiento. Si bien no se extienden en el trabajo en cuestión respecto a qué consideran procesos de reconocimiento, en función de trabajos anteriores puede afirmarse que son procesos que tienen que ver con la indexación de la información en la memoria a largo plazo. No serían reconocimientos repentinos, al estilo gestáltico, basados en procesos no necesariamente sintácticos. Esto último, como ya lo expresé anteriormente, si bien no implicaría un abandono de la noción de resolución de problemas, le quitaría el sentido con que es usado este concepto dentro del paradigma de procesamiento de información. Como también ya lo expresé antes, llevaría a una idea de la creatividad no computacional, donde la misma no es un resultado de

información junto con reglas metodológicas. Los trabajos denominados “ciencia in vivo”, que pertenecen a la aproximación observacional, como *The invivo/invitro approach to cognition: the case of analogy* (Dunbar, 2001) y *How scientific really reason: Scientific reasoning in real-world laboratories* (Dunbar, 1995) muestran, entre otras cosas, el rol importante que tienen las analogías en estos contextos. Específicamente, Dunbar analiza 6 laboratorios que selecciona en base a 1) calidad de las publicaciones, 2) el tipo de investigación que estaban conduciendo, 3) el hecho que cada laboratorio había realizado con anterioridad descubrimientos que la comunidad científica consideró como significativo, 4) laboratorios de distintos tamaños y 5) los directores de los laboratorios tenían diferente cantidad de experiencia en la investigación. Las investigaciones que realizaban estos laboratorios versaba sobre biología celular y molecular - registrándose de los mismos audio, video, notas, borradores de trabajos, etc.

Los resultados dieron que había en todos los laboratorios una gran similitud de representaciones mentales, heurísticas experimentales y heurísticas de resolución de problemas. Los procedimientos son muy parecidos difiriendo en el modo en que se combinan los mismos. Dunbar infiere, además, que las regularidades encontradas son tales que permitirían extrapolar estos resultados al razonamiento científico en general. Los científicos hacen uso extensivo de evidencia negativa para descartar su hipótesis. Es un mecanismo común de cambio conceptual el uso de analogías locales donde el conocimiento es importado desde el mismo dominio científico. Analogías distantes fueron usadas para resaltar características sobresalientes e importantes del problema que estaban discutiendo. Es decir, estos resultados apoyan la hipótesis que si bien es posible considerar a gran parte de los procesos de descubrimiento como una forma compleja de resolución de problemas, el rol que tiene la analogía en estos contextos nos llama a ser más cauto. No es ampliamente admitido que se hayan logrado entender todas las variantes de razonamiento analógico dentro de la teoría de resolución de problemas en la versión de procesamiento de información.

### 3. Métodos y descubrimiento

#### *3.1. La relación entre método y novedad*

En la sección anterior consideré las distintas aproximaciones al descubrimiento, y la hipótesis de que todas ellas, a pesar de las diferencias de métodos, conceptos, interés, etc., podían entenderse desde la perspectiva de resolución de problemas. En esta sección me focalizaré sobre la relación entre método y descubrimiento, pero desde una perspectiva más general que las consideradas anteriormente. Básicamente lo que intentaré es volver a una de las fuentes de la negación del estudio filosófico del descubrimiento, la desconexión entre método y novedad científica. Tradicionalmente se ha afirmado que eran las limitaciones del método inductivo lo que hacía imposible generar descubrimientos y que si se podía obtener algo por esta vía, era imposible determinar la validez a la información generada. Lo primero, servía para mostrar que no hay una metodología del descubrimiento y lo segundo avalaba la exclusión del estudio filosófico del descubrimiento. A comienzo de los 60 aparecen dos versiones distintas sobre la relación método-novedad que llevarán estas discusiones tradicionales a otro plano. Una es la representada por Simon-Newell que irrumpe con programas que empiezan a emular la resolución humana de problemas, como en el caso de la demostración de teoremas lógicos, y que finalizará a fines de los 80 con programas computacionales que simulan “descubrimientos” históricos. Veremos más adelante las objeciones a estas pretensiones, pero por ahora supondremos que estos programas muestran que algunos descubrimientos pueden ser entendidos a partir de reglas heurísticas algorítmicamente implementables. Expresado esto de otro modo, podríamos sintetizar diciendo que ante la afirmación tradicional de que no hay ningún método posible de descubrimiento, Simon y seguidores afirman que por lo menos hay algunos. Además sostienen que la universalidad de su hipótesis, que para todo descubrimiento pueden encontrarse métodos, es una cuestión

empírica que no puede ser descartada *a priori*. La otra posición es la representada por Campbell, quien afirma que la generación de novedad en general, y específicamente en el caso del descubrimiento científico, es un producto de la variación ciega y retención selectiva, y que por ende a cierto nivel no hay métodos. Campbell no niega que haya métodos que produzcan descubrimientos, por el contrario lo admite, pero niega que todo descubrimiento pueda ser entendido con los métodos de Simon. Ciertos descubrimientos, aquellos que producen algo totalmente nuevo, sin precedentes, no esperable, etc. sólo pueden generarse con el mecanismo de variación ciega y retención selectiva. No es fácil determinar qué está precisamente diciendo con esto Campbell. Veremos más adelante las distintas alternativas que subyacen a su hipótesis. Pero por ahora, diremos que puede extraerse de sus trabajos que existe un tipo de información totalmente nueva a la que no podemos acceder o producir: a) combinando información preexistente con métodos conocidos o b) que debemos apartarnos de los métodos conocidos y confiar en la abundancia de ensayos y error ciegos.

El modelo de variación ciega y retención selectiva inequívocamente implica *ceteris paribus*, mientras más grande la heterogeneidad y volumen de ensayos más grande son las chances de una innovación productiva. Doblando el número de esfuerzos doblamos nuestras chances de acertar, particularmente cuando los ensayos son una pequeña parte del total del dominio y la repetición entre ensayos es baja (Campbell, 1987: 108)

Desde un punto de vista tradicional esto constituye la propia negación de lo que es un método. Nos dice que el único modo de acceder a algo verdaderamente creativo es por procesos que no poseen ningún tipo de información acerca de la estructura del espacio del problema al cual se está dirigiendo. Constituye uno de los desafíos más permanentes a la existencia de una lógica del descubrimiento, inclusive en la versión heurística de la misma.

Campbell no nos dice que la imposibilidad de una teoría del descubrimiento se debe a que no tenemos procedimientos que garanticen sin excepción la producción de descubrimientos. Acepta que la variación

ciega y retención selectiva no produzca siempre resultados catalogados como creativos. Su argumento pasa por mostrarnos que es irreconciliable la obtención de novedad con métodos en el sentido tradicional del término, como reglas generales o específicas que de algún modo captan la estructura del dominio hacia el cual se están dirigiendo. Pero, aceptando estas consecuencias que extrae Campbell, no queda claro si la variación ciega y retención selectiva es o no un método. ¿Podemos hablar de un método ciego? o ¿todo método presupone alguna forma de conocimiento?. Como dije más arriba, en un sentido tradicional, método presupone algoritmo o heurísticas, procedimientos que siempre o la mayoría de las veces permiten arribar al objetivo deseado. Son procedimientos segados, que conducirán en una dirección determinada. La dirección puede estar en relación al espacio del problema o puede haber un atajo a la solución al sistematizar la búsqueda, como ocurre con el método que nos dice que es conveniente marcar cada llave usada y no repetirla en los intentos de abrir una puerta a partir de un gran manojó de llaves. En este caso, el método nos asegura resolver el problema en menor tiempo y no perdernos en intentos inútiles. La variación ciega y retención selectiva es más ciega aún, puede estar totalmente desprovista inclusive de esta sistematicidad mínima. Esto obviamente ha sido uno de los rasgos sobre el que se han elaborado serias objeciones. La cantidad de producciones necesarias para resolver problemas de ese modo no es compatible con las capacidades computacionales naturales del ser humano en los tiempos requeridos para resolver problemas científicos.

Nickles en *Evolutionary Models of Innovation and the Meno Problem* (2003) hace una interpretación distinta del modelo de variación ciega y retención selectiva. A diferencia de Campbell, considera que estos procesos no son una antítesis del método. Adopta una concepción más amplia de método que la tradicional ligada al modelo de diseño inteligente. En otras palabras, para Nickles no debe interpretarse la tesis de Campbell como afirmando que no hay método científico o método de innovación. La clave para esta reinterpretación reside en distinguir entre métodos generales de innovación y reglas de aprendizaje débiles. Según

Nickles, Campbell niega que existan los métodos generales de innovación pero no reglas de aprendizaje, porque se puede hacer computacional y generalizar la tesis de Campbell a través de la computación evolutiva. En otras palabras, para Nickles variación ciega y retención selectiva es un método porque puede mecanizarse computacionalmente y resolver problemas creativos. Anteriormente ya mencioné las implicancias que tienen estos resultados sobre la discusión acerca del descubrimiento científico. Los epistemólogos evolucionistas, como Campbell y Kantorovich, señalaron diferencias entre mecanización y concepción evolucionista del descubrimiento, diferencias que ahora en principio parecen haberse diluido. En definitiva es una consecuencia de la afirmación de que si un proceso es computable posee reglas, entonces es un método de algún tipo.

### *3.2. El carácter propositivo de la investigación científica y sus consecuencias sobre el método.*

Otro aspecto a considerar es en qué medida afecta a la relación entre método y descubrimiento el hecho que gran parte de la actividad científica está motivada por objetivos seguidos racionalmente. Esto parece no encajar con el modelo evolucionista y ha merecido algunas reformulaciones a la versión de Campbell. Es decir, podemos considerar bajo ciertas suposiciones que el modelo de Campbell resuelve de un modo novedoso la paradoja de Menón, un proceso ciego no supone que ya se sabe lo que se busca y la selección, no reconoce la solución sino que elimina lo que no se ajusta a las restricciones. Pero, esta salida supone algo que en la práctica no se da; como dije más arriba, los científicos tienen o se proponen objetivos. La salida que encontraron a esto los epistemólogos evolucionistas fue considerar que toda investigación es propositiva, pero que la innovación proviene por *serendipity*, por procesos que buscan un objetivo y terminan obteniendo algo que no estaba en los objetivos o planes iniciales. La salida aunque

parece un poco rebuscada y *ad hoc*, es esencial para esta epistemología del descubrimiento porque si no la búsqueda conciente de objetivos hace inevitable el rol de la heurística medio-fin, transformando los procesos eliminativos de los que hablamos anteriormente en procesos de tipo correctivos. Para evitar esto, es que se reformula la concepción evolucionista y queda como aquella que logra obtener algo creativo porque busca un objetivo y obtiene algo distinto a lo buscado. Es la única forma de no caer en la trampa de la heurística medio-fin. Los procesos de resolución de problemas, inclusive aquellos en el que los individuos tienen mucha dificultad, no muestran que las resoluciones propuestas estén basadas en el ensayo y error ciego. Pero supongamos que esta salida, la de variación ciega y retención selectiva con el agregado de *serendipity*, salva a la metodología evolucionista de caer en una concepción metodológica tradicional; ¿podemos decir que estamos ante la única forma de acceder a lo que estos epistemólogos llaman innovación?

¿Debemos aceptar que en la propuesta de Simon existe una convergencia en los estudios sobre descubrimiento hacia una estructura basada en resolución de problemas por búsqueda heurística no ciega? o ¿es inevitable en algunos casos aceptar que la creatividad requiere métodos ciegos, sin conexión con la información contenida en el problema?. Una alternativa es recurrir a casos históricos importantes y evaluar en qué medida se ajustan cada una de estas dos concepciones sobre el método. Otra, es tratar de indagar qué pasa en ciencias de la computación donde como ya dijimos los problemas no son cajas negras y existe una abundante producción para resolver problemas de distintos niveles de complejidad. Nickles, en el trabajo antes citado entra en esta juego de apelar a las ciencias de la computación para derivar consecuencias metodológicas a través de un conjunto de teoremas denominados “No Free Lunch” de Wolpert, D. y Macready, W (1997) (1995)

Estos teoremas prueban que para problemas de optimización combinatoria no hay métodos o algoritmos generales que nos aconsejen

su aplicación ante la ignorancia de cuál es la estructura del problema. Si el rendimiento de un algoritmo sobre un problema o conjunto de problemas es alto o máximo, seguro que su rendimiento será peor para otros problemas. Promediando los rendimientos bajo todo tipo de problemas, todos los algoritmos tienen igual rendimiento general. Es decir, no podemos optar racionalmente en situaciones de ignorancia por algún algoritmo mientras no conozcamos las características del problema (su estructura) y que el algoritmo las incluya como parte de su estructura o sesgo. En otras palabras, no hay un algoritmo que sea más general que otro, que independientemente del problema tratado pueda asegurarnos una mejor rendimiento que los otros.

Antes de comenzar a desplegar las consecuencias de estos teoremas, quiero remarcar una vez más el cambio que se ha producido en estos filósofos tradicionales del descubrimiento, como Nickles, que en un principio negaban la importancia de cuestiones computacionales en el descubrimiento y que ahora las toman como parte esencial de su concepción de los procesos generativos. Esto muestra no sólo que no niegan una concepción post-computacional de problema y su resolución sino también la vinculación que hay entre ciertas ideas filosóficas y cuestiones tecnológicas. Como se dijo más arriba, es la posibilidad de computarizar la concepción de Campbell lo que le da una dimensión metodológica que anteriormente pasó desapercibida. A pesar de este giro, de aceptar lo que anteriormente denominé “hipótesis computacional”, regresa a posiciones aún más tradicionales, a la absoluta distinción de los contextos cuando se trata de la dar cuenta de la creatividad científica.

### ***3.3. Teoremas “No Free Lunch” (NFL), variación ciega y descubrimiento.***

Los pasos que sigue Nickles, basados en estos teoremas para formular su actual posición sobre el descubrimiento, son resumidamente las siguientes (Nickles, 2003):

1. No hay métodos generales.
2. No podemos determinar *a priori* el poder o la eficiencia de reglas de aprendizaje para cualquier dominio dado.
3. Procedimientos de aprendizaje efectivos son específicos del dominio y no generales, sin importar si alguien conoce qué son estas que reglas o algoritmos.
4. No hay un método científico completamente general (que cruce todos los mundos posibles) que sea más eficiente que otros métodos posibles o reglas de aprendizaje, sea un método que puede ser justificado *a priori* o por convención, como los metodólogos desde Descartes a Popper han supuesto. Específicamente, no hay método hipotético deductivo máximamente eficiente.
5. Puede usarse conocimiento del dominio para seleccionar procedimientos sesgados de búsquedas con eficiencia superior. No podemos saber en un dominio particular, dado el conocimiento del dominio relevante, que una regla es más o menos eficiente que las reglas promedio o que alguna regla específica. La elección de un procedimiento de aprendizaje eficiente está justificada sólo en tanto poseemos conocimiento del dominio relevante.
6. Conversamente, menos conocimiento del dominio poseemos, más ciego y más general, y por lo tanto débil y ineficiente, será nuestro procedimiento de búsqueda. Tan pronto como no tenemos conocimiento significativo del dominio, no tenemos modos de saber cuál de las reglas posibles es en efecto la más eficiente.
7. De este modo la tesis de Campbell de variación ciega más retención selectiva (VC+RS) es verdadera. Esto se sigue de los teoremas NFL cuando son aplicados a nuestras situaciones epistémicas, esto es, a conocimiento del dominio que poseemos, en lugar de considerarlos como afirmaciones acerca de la realidad objetiva. Dado un dominio no conocido, los teoremas NFL no implican que ninguna regla es mejor que otra, sino más bien que no podemos conocer cuál.
8. En un estado de ignorancia sólo podemos proceder ciegamente, tratando esta o aquella solución o regla. Una vez que hemos determinado que algunas reglas o técnicas obran mejor que otras, podemos luego tratar, *post hoc*, de explicar este hecho atribuyendo

una estructura particular al dominio. La confirmación de la atribución puede garantizar el uso de reglas sesgadas. Esta idea básica fue ya incorporada en el método tradicional de hipótesis.

9. De este modo, en la frontera del conocimiento, la investigación es consecuencialista más que generativa, en relación al dominio del conocimiento ya disponible.
10. Tomar conocimiento para alcanzar más conocimiento eficientemente, aunque contrario a la versión de Platón de la conservación del conocimiento, podemos todavía alcanzar más desde menos. Esta afirmación va más allá de los teoremas NFL al suponer que el dominio en cuestión tiene alguna estructura y que los procesos VC+RS puede encontrar parte de esta. Bajo estas condiciones, la creación *ex nihilo* es posible, no en el sentido de innovación a partir de absolutamente nada, sino en el sentido de emergencia de lo más a lo menos, de más diseño a partir de menos.
11. Sin embargo, más innovativo es el conocimiento (relativo a nuestra ignorancia del dominio), las búsquedas serán más débiles, más ineficiente nuestros procedimientos y más dificultad habrá en reconocer la solución al problema.
12. Por consiguiente, no hay métodos fuertes de descubrimiento en el sentido de métodos eficientes para producir innovaciones mayores. Sin embargo, son posibles procedimientos de descubrimientos débiles. Cuando son iterados, el último resultado puede ser fuertemente innovativo.
13. Ensayo y error no es el más débil de todos los métodos. Porque, promediado sobre todos los dominios posibles, es tan fuerte (o débil) como cualquier otro método.
14. Por otra parte, para cualquier dominio particular, existe algún número de métodos (reglas de aprendizaje) que son peores que el ensayo y error aleatorio.
15. Dado que puede haber distintas variedades de VC+RS, no toda regla VC+RS debe ser rotulada mero ensayo y error aleatorio.
16. Métodos específicos de VC+RS serán más o menos eficientes que otros en un dominio dado pero igualmente buenos (o malos) cuando son promediados en todos los dominios posibles de problemas.

Este encadenamiento a primera vista parece interesante y convincente. Pero estimo que un análisis más cuidadoso revela que de 1-6 se sigue tanto 7 como lo contrario. En situaciones de absoluta o parcial ignorancia da lo mismo elegir la tesis de Campbell o la de Simon. Es además, lo que está explícitamente expresado en el punto 13. A mi entender de 1-6 puede seguirse que ante la falta de información del dominio, da lo mismo cualquier método, sea o no ciego. Pero, no voy a tratar de seguir con esta objeción; soy consciente que hay muchos presupuestos que deberían analizarse antes de poder realmente aclarar estos puntos. Mi objeción se focalizará sobre el punto 9, que intenta extraer como consecuencia de estos teoremas que la investigación en las fronteras del conocimiento es más consecuencial que generativa. Hasta cierto punto admito que el algoritmo solo no es suficiente para determinar la validez de su aplicación a un caso determinado. Digo hasta cierto punto, porque siguiendo a K. Kelly, esto no constituye necesariamente una crítica insalvable a una lógica del descubrimiento científico, ya que podríamos tratar estos algoritmos a un nivel abstracto, independientemente de la aplicabilidad o confirmación a casos concretos (entendiéndolos como hipótesis o teorías). De hecho, creo que es esto lo que hacen los teoremas “no free lunch”, la demostración de los teoremas es ya una lógica del descubrimiento, y para realizarla no hizo falta ninguna confirmación o verificación en casos concretos. En otras palabras, considero que los teoremas “no free lunch” muestran lo contrario, que no necesitamos necesariamente poner en funcionamiento un algoritmo respecto a casos reales para determinar si funciona o no con respecto a un problema determinado. Si sabemos la estructura del algoritmo y la estructura del problema, podemos *a priori* elegir qué tipo de algoritmos abordará mejor el problema en mano. Inclusive ante la falta de información del dominio específico del problema, *a priori* podemos establecer que no existe prioridad en cuanto a un mejor rendimiento. ¿Podemos negar que esto último no constituye en otro nivel un resultado a favor de una lógica de descubrimiento científico en el

sentido de K. Kelly de una lógica de la indagación confiable?. Nickles no se ha dado cuenta que en sus propias afirmaciones ya esta adhiriendo a una nueva forma de entender la relación entre descubrimiento y método. Es en el comportamiento en abstracto de los métodos donde está la novedad del trabajo de Wolpert y Macready. La existencia o no de información sobre el dominio no cambia en absoluto esta interpretación que propongo, refuerza o debilita de igual modo a ambos tipos de métodos.

#### **4. Modelos computacionales de descubrimiento científico**

##### *Descubrimiento como cómputo*

Entre las razones más importantes para una reconsideración de la existencia de una lógica del descubrimiento, o de una teoría normativa del descubrimiento, se encuentra la irrupción sistemática de modelos computacionales de descubrimiento a finales de la década de 1970. Estos programas vinieron a coronar en el ámbito del descubrimiento de leyes empíricas las investigaciones sobre resolución de problemas en IA y ciencias cognitivas desde los 50. Gran parte de este cambio se debió como dije anteriormente al trabajo de Gerwin *Information processing, data inferences, and scientific generalization* (1974), quien logró identificar heurísticas de búsqueda en tareas de descubrimiento numérico, un área que por tratar de producir inducción de funciones de variables complejas en presencia de datos con ruido, se pensó que sólo podía aproximarse por métodos estándares estadísticos. Los experimentos llevados a cabo por Gerwin mostraron que los sujetos experimentales usan métodos heurísticos en la búsqueda de leyes numéricas. Este trabajo

logra con estos resultados imponer algunas ideas importantes que luego jugarán un papel fundamental en los desarrollos de modelos computacionales de descubrimiento empírico. En *Scientific discovery: computational explorations of the creative processes* (Langley et. al 1987) reconocen que la contribución de Gerwin permitió entre otras cosas definir claramente el descubrimiento numérico y comprender que los sujetos usan en estos casos métodos de tipo heurístico y no los métodos algorítmicos de la estadística.

El método consistía en un conjunto de reglas condición-acción para detectar regularidades en los datos. A cada regularidad se le asociaba una función que la producía. Se computaban los datos nuevamente con la función producida y se trataba de determinar si no existían patrones en esta producción, en caso de haberlo se buscaba nuevamente una función que la produjera y nuevamente se reiniciaba este proceso hasta que no pudieran detectarse más regularidades o que los reemplazos dieran valores constantes. En otras palabras, lo que el sistema hacía era detectar patrones y computar los residuos hasta que no se pudieran detectar más patrones en estos últimos. Langley et. al (1987: 289) resume esta contribución en tres partes:

1. Uso de heurísticas guiada por los datos para dirigir los procesos de descubrimiento.
2. Agregado de funciones componentes.
3. Aplicación de las heurísticas originales a los residuos.

El sistema propuesto por Gerwin tenía ciertas limitaciones, como trabajar con una única variable, que lo limitaba todavía como un sistema general de descubrimiento científico.

Esto es lo que logran Langley et al con los sistemas BACON, que tuvieron el valor de ser los primeros programas que reprodujeron casos históricos paradigmáticos. Pero no quiero dejar de mencionar que el descubrimiento computacional ya había producido resultados a mediados de la década de 1960 con el programa o sistema experto denominado

DENDRAL. Este programa que fue el precursor de los sistemas expertos actuales, permitió determinar estructuras complejas de las moléculas. DENDRAL explora las posibles configuraciones moleculares con la estructura adecuada. Pero no fue un programa que pudiera abordar casos históricos importantes y por esta razón, entre otras, no tuvo impacto en los estudios sobre descubrimiento, especialmente desde el punto de vista de la filosofía de la ciencia. También merece mencionarse como trabajo pionero el programa AM de Lenat (1977) sobre descubrimiento en matemática en 1977 que aparece junto con los programas BACON.

En esta Apéndice 2 he tratado de exponer sintéticamente los principales programas de descubrimiento automatizado. En algunos casos, cuando estaba disponible en la literatura, he tratado de mostrar las heurísticas del programa para que pueda apreciarse la simplicidad o complejidad del programa según el caso. No es fácil hacer una evaluación que no caiga en posiciones extremas, de aceptación o rechazo. Por un lado tenemos a los defensores de la IA fuerte que creen que estos programas constituyen una fuerte evidencia de que las computadoras pueden realizar descubrimientos y que con las mismas podrá también entenderse el descubrimiento científico humano. Por el otro, están los que limitan o trivializan estos sistemas considerando que, o bien sólo simulan una parte de los descubrimientos y no la más importante, o que simulan un tipo de descubrimiento (empírico) y que no puede extrapolarse a descubrimientos más complejos o profundos (teóricos). También están los que creen que las limitaciones de estos sistemas están en la imposibilidad práctica de proveerlos con la información necesaria para que produzcan descubrimientos importantes. Argumentan que hay algo así como un principio de cuello de botella de todo sistema experto de cierta complejidad que hace imposible que estos sistemas puedan tener toda la información necesaria para saber cuando se deberá hacer una inducción determinada o cuando ante la obtención de una debemos considerarla como relevante al problema en cuestión. Estas son más o menos las críticas más comunes a los programas inspirados en el paradigma de la IA. Se ha propuesto una salida intermedia, cambiando

los objetivos de hacer estos programas, orientándolos más que a una automatización sin la intervención humana a una automatización como ayuda al descubrimiento científico. Es llamativo que Langley, uno de los creadores de los sistemas BACON, esté actualmente sosteniendo una posición en este sentido.

Pero hay muchas defensas que se le pueden hacer a estos programas; la primera es que no debemos basar las críticas a los modelos computacionales en esos primeros programas. Modelos computacionales se siguen haciendo aunque no directamente a través de los científicos de la IA o con métodos de la IA. En muchas disciplinas se construyen y utilizan sistemas computacionales automáticos para el descubrimiento pero no reciben la denominación de descubrimiento científico computacional. Por ejemplo, Peter Karp (Karp, Ourzoumi & Paley, 1996) ha manifestado que el campo entero de la bioinformática consiste en hacer descubrimientos científicos computacionales. El problema con estos sistemas es que han quedado fuera del ámbito de estudio de filósofos y científicos cognitivos sobre descubrimiento. Y los realizadores, a diferencia de Simon, Langley, Thagard, no están formados filosóficamente para traducir sus resultados especializados a un nivel que permita su tratamiento filosófico. Por lo tanto, hablar del estado del arte del descubrimiento científico computacional en este momento significa rastrear una gran cantidad de investigaciones que usan sistemas computacionales, y revistas especializadas, como *Journal of Computational Physics*, *Journal of Computational Biology*, *Journal of Computational Chemistry*, *Journal of Computational Mathematics*, etc., libros como *Experimentation in Mathematics: Computational Paths to Discovery* de Jonathan Borwein, David Bailey, Roland Girgensohn (2003). No basta con analizar los programas de las décadas de 1980 y 90 para emitir un juicio sobre la relevancia o irrelevancia filosófica de los programas de descubrimientos ni para hacer una proyección a futuro sobre los mismos. Que los programas computacionales lleguen o no a automatizar los procesos de descubrimiento científicos es una cuestión empírica, que hasta ahora ni siquiera las consecuencias del teorema de

Gödel parecen limitar *a priori*. Pero sin ir a extremos semejantes que colocan al descubrimiento computacional en otro nivel de discusión, podemos ver también a partir de este breve resumen de los programas más citados que no es poco lo que se ha avanzado en simular inferencias, formación de conceptos, modelos de confirmación, analogías, experimentación, etc. Esto lleva a mi modo de ver, a uno de los aspectos más importantes de estos emprendimientos, la posibilidad de desarrollar una epistemología no sólo computacional sino una epistemología con fuerte conexión con una metodología. Es cierto que no hay que pecar de optimista, si se trata de ver al descubrimiento computacional desde una óptica ideal, exigiendo que logre estar a la altura de las grandes investigaciones actuales o que logre producir un gran descubrimiento. Para lograr esto hay que reconocer todavía un largo camino. Pero, si comparamos cualquiera de los tratamientos tradicionales de temas como inducción, abducción, etc. veremos que el avance ha sido muy importante. Como lo expresó Donald Gillies (1996) en *Artificial Intelligence and Scientific Method*, la IA y descubrimientos con computadora no sólo han cambiado el modo de entender el método científico proponiendo alternativas al falsacionismo vs inductivismo sino que inclusive han cambiado la lógica que ha pasado a ser inferencia más control.

## 5. Descubrimiento y creatividad

### *Creatividad y Conciencia: la creatividad en la psicología del descubrimiento*

Las concepciones sobre la creatividad científica, entendiendo por tal la producción de conocimiento totalmente nuevo, conocimiento que

no es la mera combinación de información ya existente, giraron en torno a la postulación de procesos no conscientes o en casos más extremos a procesos inconscientes.

Por ejemplo, en la teoría psicoanalítica, la creatividad es explicada en términos de sublimación de conflictos inconscientes. La producción de trabajos creativos es un modo de expresar deseos inconscientes en un modo públicamente aceptable. Casos como el de L. Da Vinci han sido usados para apoyar estas ideas

Para Kubie (1958) las ideas creativas son más bien productos de actividad preconscious, actividad que está entre lo consciente y lo inconsciente. A diferencia de Freud, para Kubie el inconsciente juega un rol negativo, puesto que puede producir fijaciones que entorpecen la labor creativa.

El inconsciente puede marcar el estilo del artista, pero la verdadera creatividad viene del libre juego de procesos simbólicos preconscious.

Koestler también sugiere que la creatividad es producto de conflictos inconscientes y esto ocurre cuando se mezclan ideas o patrones de pensamiento opuestos (1964).

Para Poincaré dos de las fases más importantes de la creatividad, incubación e iluminación son en gran parte procesos inconscientes.

Una posición a menudo relacionada con éstas es la sostenida por Popper-Campbell respecto a la existencia de aspectos aleatorios y cuasi aleatorios en la producción de ideas nuevas.

A partir de los trabajos de Searle y Penrose, se produce un cambio en los argumentos para fundamentar la irreductibilidad de la mente a una máquina. Hasta los trabajos de estos autores, los argumentos principales estuvieron basados en la flexibilidad de la mente humana respecto a la computadora. Argumentos como el de la necesidad de programación externa de la computadora, que la computadora no puede por sí misma generar las reglas para su funcionamiento, que una computadora puede

hacer sólo lo que se le ha programado que haga, etc, eran típicos de este período. Pero, con el resurgimiento de nuevos paradigmas de computación, como el conexionismo, los algoritmos genéticos, etc. a mediados de la década de 1980, estos argumentos quedan seriamente debilitados. Una computadora puede tener un comportamiento flexible, enfrentar casos que no fueron específicamente programados, dar cuenta de datos que no estuvieron en el entrenamiento de la red neuronal, autoprogramarse, etc.. Es en este contexto en el que las observaciones de Penrose y Searle sobre la relación mente-máquina toman otra dimensión, la conciencia es el último reducto que queda para establecer la no equivalencia de esta relación. Pero, uno podría preguntarse, ¿Por qué no la inconsciencia o subconsciencia o preconsciencia? Una respuesta plausible que presenté en la historia del concepto de resolución de problemas, sería que estas nociones son compatibles con los dos grandes paradigmas de la ciencia cognitiva, la IA clásica y el conexionismo. Por ejemplo, podríamos pensar a un proceso inconsciente como un proceso no reglado en un esquema de tipo conexionista.

En síntesis, la conciencia queda como lo único que puede establecer una diferencia entre la mente humana y la computadora. El argumento de la habitación china de Searle muestra persuasivamente que a pesar de que fabriquemos o programemos una computadora que logre hacer todo lo que hace un humano en términos de entrada-salida no podemos afirmar que dicha computadora ha comprendido una actividad realizada, por ejemplo responder en un idioma determinado.

El experimento mental de la habitación china no excluye que una computadora pueda pasar el test de Turing, es decir que pueda realizar todo lo que un humano puede realizar en términos por supuesto de entrada-salida. Como bien lo aclara Searle, este argumento sólo muestra la irreductibilidad de la semántica a la sintaxis. Pero no que mediante la sintaxis no se pueda pasar el test de Turing.

En *The Rediscovery of Mind* (Searle, 1994), al tratar el problema de la realizabilidad múltiple y sostener la irreductibilidad de la sintaxis a

la física nos dice, por lo menos como entiendo este texto, que sin conciencia no hay computadoras.

Por lo tanto, la creatividad que pueda tener una computadora es producto de nuestra conciencia, sin ella la computadora no puede ser creativa.

Es importante destacar que este argumento socavaría una de las hipótesis centrales de la IA clásica, como lo es la hipótesis de símbolos físicos. Un patrón es un símbolo sólo para una mente consciente.

Pero la relación entre conciencia y creatividad no sólo está implícita en *The rediscovery of Mind*; explícitamente la considera en la interpretación que hace de los trabajos de Penfield sobre la epilepsia. En síntesis, la posición de Searle respecto a estos casos es que si falta la conciencia, también falta flexibilidad, sensibilidad y creatividad.

Es decir que un signo indicativo de conciencia es la creatividad de la conducta, o colocado de otro modo, que la inconsciencia excluye la creatividad.

Pero, se trata de un ejemplo donde la creatividad está asociada al control de la conducta; no hace referencia a funciones cognitivas superiores. En este sentido, no es un ejemplo que pueda contraponerse directamente con las concepciones de creatividad como subconciente/inconciente de Koestler, Freud, Poincaré, etc.

Pero, ¿hay ejemplos que muestren que la conciencia otorga ciertas ventajas, en el sentido de que quien la posee puede alcanzar conocimientos que no pueden obtenerse por otra vía?

Penrose en *The Emperor's New Mind* (1989) y *Shadow of the Mind* (1996) ha tratado de responder específicamente esta pregunta. Usando el teorema de incompletitud de Gödel argumenta que las habilidades del matemático humano para descubrir nuevas verdades matemáticas no pueden ser explicadas en base a lo que una máquina puede hacer. Ciertos procesos mentales de un matemático quedan fuera de toda acción algorítmica. Por lo tanto, el matemático humano no usa

algoritmos para descubrir ciertas verdades matemáticas y esto es una evidencia de que el pensamiento humano es en algunos casos sólido (sound) pero no algorítmico. La conciencia humana puede tomar ventajas de procesos no algorítmicos escapando de este modo a las limitaciones del teorema de Gödel. Este escape a las limitaciones del teorema de Gödel puede hacerse porque el matemático humano es consciente del contenido de estos pensamientos.

A este argumento, la producción no algorítmica de verdades matemáticas, Penrose lo refuerza con la presentación de algunas evidencias que mostrarían que existen procesos físicos no algorítmicos (y no aleatorios) como los cuasi-cristales y la existencia de procesos no algorítmicos en el cerebro generadores de conciencia tal como los microtúbulos.

Pero a los fines de nuestra discusión, es importante recalcar que Penrose no excluye que en un futuro se puedan construir computadoras conscientes, computadoras que por supuesto van a estar basadas en otra física.

Sintetizando a Penrose, independientemente de la plausibilidad de su aproximación a la conciencia, podemos decir que es uno de los únicos que claramente intenta mostrar las ventajas que tiene un humano consciente por sobre otras funciones cognitivas o cerebrales. Searle, si bien usa su argumento de la realizabilidad múltiple para excluir los intentos de hacer artificial la conciencia humana, respecto a la relación creatividad-conciencia sólo usa casos donde se producen deficiencias conscientes, como la epilepsia. No hay un tratamiento de casos que demuestren las ventajas de la conciencia en cuanto a funciones cognitivas superiores.

Hasta aquí, he tratado de mostrar la relaciones más importantes entre creatividad ligada a la ciencia y trabajos actuales sobre conciencia. Pero, ¿Qué otros trabajos sobre conciencia pueden contribuir a esclarecer esta relación entre conciencia y creatividad?

Salvo algunas excepciones que a continuación analizaré, hay muy pocos trabajos que puedan contribuir. La mayoría están enfocados hacia explicar o definir en términos de clase de conciencias casos como blindsight, prosopagnosia, alexia, etc.

Una excepción, aunque también están principalmente dirigidos a los casos antes citados, son los trabajos de Crick y Koch. Estos autores no tratan la conciencia ligada a funciones superiores, aun más, expresamente consideran que en el estado actual de los conocimientos es imposible abordarla. Pero señalan un aspecto que hace que la aproximación computacional actual no sea apropiada: el tipo de procesamiento de información que se da en los casos más simples de conciencia tiene ciertas características que ninguna computadora actual puede emular.

Específicamente señalan que una característica llamativa del sistema visual (y de la conciencia en general) es que es muy rica en información, aún si mucho de lo que es retenido lo es por un breve período de tiempo. No sólo el sistema puede cambiar rápidamente de un objeto a otro, sino que además puede mantener una gran cantidad de información en un modo coherente en un único momento. Creemos que son principalmente estas dos habilidades, combinadas con los sistemas de memoria percedera, lo que hace que esto parezca tan extraño. No tenemos experiencia (aparte del punto de vista muy limitado de nuestra propia introspección) de máquinas tan complejas, que cambien tan rápidamente y que tengan alta actividad de procesamiento paralelo. Cuando construyamos tales máquinas y comprendamos su conducta en forma detallada, gran parte del misterio de la conciencia desaparecerá.

Otra excepción, que al igual que el trabajo de Crick y Koch (1990) no está dirigido a funciones de alto nivel, es el trabajo de Lewicki, P., et al (1987) *Nonconscious acquisition of information*. Este trabajo, aunque con muchas limitaciones puede hacernos repensar las ventajas que Searle y Penrose le dan al pensamiento consciente. Sostiene que

una considerable cantidad de datos indican que comparado a la cognición controlada conscientemente, los

procesos de adquisición de la información noconscientes no sólo son mucho más rápidos sino también estructuralmente más sofisticados en el sentido de que son capaces de procesamiento eficiente de variables multidimensionales y de procesar relaciones entre las variables. (Lewicki & Hill, 1987: 359)

Por ejemplo, el simple acto de reconocer la forma y el tamaño de un objeto y su localización en el espacio tridimensional requiere un conjunto sofisticado de transformaciones geométricas y cálculos que van más allá de lo que muchos pueden articular o comprender.

Pero, a partir de esto, ¿podemos decir que el procesamiento de información no consciente es inteligente?

Para estos autores la respuesta depende de la definición que adoptemos de inteligencia: si inteligencia significa tener objetivos propios o motivaciones específicas y poder seguir estos objetivos y motivaciones produciendo acciones particulares, entonces el proceso de información no consciente no es inteligente. En cambio si se entiende por “inteligencia” estar “equipado para procesar información compleja”, el proceso de información no consciente es inteligente. Entienden además, que bajo esta última definición de inteligencia el sistema de procesamiento no-consciente es mucho más poderoso.

Este trabajo, aunque de modo limitado y muy aislado, vuelve a rescatar la posibilidad de que en la creatividad científica entren procesos de tipos no conscientes. Que se necesite en los procesos creativos fases no conscientes como un modo de procesar información más compleja, tanto por la calidad de la información como por estructura de la misma.

Tratando de sacar algunas otras consecuencias de esta postura, a los fines de la creatividad científica no basta con considerar como lo hace Searle que lo no-consciente conceptualmente depende de lo consciente. El carácter no atencional del procesamiento de información no consciente puede tener ventajas en cuanto a la cantidad y complejidad de la información que puede procesar. Aunque por su puesto, para poder afirmar esto se necesitaría algún tipo de evidencia empírica, tal como por

ejemplo, la diferencia en el consumo de energía en ambos tipos de procesamiento de información.

A modo de síntesis podemos decir:

Primero, tal como aparece en la literatura, parece haber un cambio en la concepción de la creatividad. Se ha pasado de ver a la creatividad como actividad fundamentalmente no consciente (o inconsciente, o preconscious) a la creatividad como actividad fundamentalmente consciente. Esto por supuesto más como un resultado del debate mente-máquina que por investigaciones sobre la propia creatividad que son abundantes pero en los que no se puede vislumbrar todavía un gran progreso respecto a los trabajos de Koestler, Wertheimer, Poincaré, Hadamard, etc. También por la influencia que tuvieron las redes neuronales, las que en principio parecerían absorber lo que podemos considerar como procesamiento no consciente. No es extraño que algunos consideren que la habilidad de los sistemas cognitivos de adquirir información no conscientemente es una suposición metateórica de casi toda la psicología cognitiva contemporánea.

Segundo, son llamativas las dificultades materiales y conceptuales que se generan cuando pretendemos abordar la creatividad desde un esquema computacional: ¿podemos caracterizar a un sistema como computacional si no tenemos conciencia? (Searle), ¿las bases físicas de la computadoras actuales son suficientes para producir todo lo que el ser humano produce? (Penrose) o ¿necesitamos simplemente una computadora que tenga las características de la conciencia en cuanto a cantidad, flexibilidad en procesar puntual y cambiantemente mucha información? (Crick, Koch.)

Tercero, a pesar de los pocos resultados sólidos en las investigaciones sobre conciencia, lo que se ha producido ya lo hace un concepto ineludible en cualquier intento de abordar la creatividad científica.

## **VI**

### **Objeciones al descubrimiento como resolución de problemas como búsqueda guiada en espacios de problemas**

#### **1. Límites al descubrimiento como resolución de problemas**

En esta parte intentaré evaluar en qué medida todo descubrimiento científico puede ser considerado desde la óptica de la resolución de problemas.

Como dije anteriormente, la noción actual de resolución de problemas como búsqueda heurística tiene su origen en los trabajos de Polya en el campo matemático. Simon, que fue su alumno junto con Newell, encontró en estas ideas una conceptualización para conclusiones similares a las que ya había arribado en sus investigaciones en el campo administrativo. Posteriormente con el advenimiento de la computadora

digital, descubren una nueva forma de representar los procesos de resolución de problemas que les permite hacer una teoría dinámica de los mismos. Este contacto con la computación producirá con el tiempo cambios en la noción de resolución de problemas que hacen sumamente difícil compararlo con la versión de Polya, fundamentalmente por el sesgo sintáctico que exige la programación computacional. A partir de esta noción de resolución de problemas, que es una mezcla de generalizaciones sobre experimentos psicológicos y de nuevas estrategias que ofrece la computadora digital, se empieza a desarrollar una teoría computacional del descubrimiento científico. Lo que por muchos años fue considerado algo misterioso, mágico y para unos pocos elegidos, dejó de serlo en lo que se refiere a las estrategias empleadas, no hay diferencia entre las estrategias que emplea el hombre común y las que emplea el científico exitoso. La única diferencia está en la cantidad de conocimiento organizado que tiene el científico, que le permite darse cuenta rápidamente de situaciones que para otros pasarían inadvertidas o les llevaría gran cantidad de tiempo de búsqueda.

### ***1.1. La noción de descubrimiento científico como búsqueda heurística.***

En sus aspectos esenciales, decir que el descubrimiento científico es búsqueda heurística implica reconocer que todo o casi todo descubrimiento puede ser derivarse a partir de los siguientes principios:

- 1) El descubrimiento científico tiene como método básico la búsqueda selectiva
- 2) Usa heurística tanto general como particular al dominio,
- 3) El análisis medio-fin juega un rol importante en el análisis y el razonamiento

4) La efectividad en el descubrimiento depende de la capacidad de reconocimiento que tiene el experto (familiarización y olvido selectivo) (Simon, 1992b).

La generalidad de estos principios hace difícil una contrastación directa, además, gran parte de las críticas que se le han realizado caen en generalidades parecidas (fundamentalmente la que provienen de la psicología de la Gestalt) que impiden una evaluación constructiva. Para evitar esto, propongo conceder que hay un conjunto de resultados que han sido exitosos, como ocurre con aquellos programas que hacen inducciones empíricas de leyes a partir de datos cuantitativos y cualitativos (programas BACON, KEKADA, GLAUBER, DALTON) pero reconociendo la observación de Laudan que por simular descubrimientos que pertenecen a los primeros estadios de la ciencia su normatividad o valor epistemológico no puede ser extrapolado a períodos cuya actividad científica no es completamente reducible a una metodología de tipo inductiva. En otras palabras, los programas de simulación de Simon no van más allá de esta primera etapa que Laudan caracteriza en *Progress and its Problems* (1977) como garantizante *a priori* de la validez de resultados. Los BACON, GLAUBER y DALTON, por ser programas fundamentalmente guiados por los datos no parecen ir más allá del período que indica Laudan. En el caso del Kekada, a pesar de ser un ejemplo del siglo XX y contar con un gran número de heurísticas, no usa conocimiento de base con términos teóricos complejos o profundos.

La concesión que anteriormente mencioné supone que los datos están ya representados y por lo tanto no constituyen una teoría completa que va de los *inputs* (sensores) a *outputs*: las leyes. No simulan la creatividad pero si muestran cómo casos históricos diferentes pueden verse en algunas etapas como subproductos de estrategias comunes. Una alternativa fuerte sería mostrar un caso histórico o experimento que involucre tareas científicas que no puedan ser concebidas como resolución de problemas. En esta dirección podemos citar el trabajo *Feeling on knowing in memory and problem solving* (Metcalf, 1986),

que considera como un supuesto fundamental de la teoría de resolución de problemas la dependencia de la experiencia pasada. Si la teoría de resolución de problemas depende de experiencias pasadas debería en todos los casos poder predecir su rendimiento, pero como esto no siempre ocurre, debemos abandonar la pretensión de resolver con reglas e información cualquier problema que se nos presente. Un inconveniente que presenta esta crítica es que supone que los datos iniciales del problema no tienen la información estructural suficiente como para hacer predecible su resolución.

### ***1.2. La inexistencia de un conjunto general de reglas que pueda dar cuenta de todos los descubrimientos posibles.***

No hay en principio evidencias que excluyan la necesidad de ampliar el número de reglas heurísticas para realizar nuevos descubrimientos. A la larga, esto puede llevar a que la cantidad de reglas heurísticas no converja a un número estable como para pensar en una teoría general. Una salida sería suplementarle aprendizaje de modo tal que se puedan modificar no sólo el espacio del problema sino también las reglas heurísticas que trabajan sobre este espacio, pero, para lograrse esto, debería abandonarse la hipótesis de símbolos físicos sobre la cual se construyó la teoría de resolución de problemas de Simon-Newell. La necesidad de incorporar el aprendizaje no altera los principios de la teoría de resolución de problemas sino que exige un cambio de la arquitectura sobre la cual está montada.

### ***1.3. Inducción y descubrimiento***

Una de las objeciones que más ha influenciado dentro de la filosofía de la ciencia es la que sostiene que hasta que no se solucione el problema clásico de la inducción no tiene sentido tratar de construir una lógica o teoría normativa del descubrimiento. Una versión más

contemporánea y que tuvo mucha influencia en el positivismo lógico fue pensar que los fracasos en la construcción de una lógica inductiva hacen totalmente superfluas las aspiraciones de construir una lógica del descubrimiento. La teoría de resolución de problemas ha evadido estas limitaciones confiando en que una gradual simulación computacional de descubrimientos aumentaría (bayesianamente) la probabilidad de éxitos para casos nuevos. Al optar Simon por esta salida, abandona toda pretensión de construir una epistemología *a priori* del descubrimiento científico, línea de investigación que por otro lado, ha sido seguida por Glymour-Kelly (Kelly, 1987). Estas consideraciones, si bien no invalidan el aspecto metodológico del programa de Simon, ponen en duda el valor epistemológico de las mismas. La construcción de una teoría normativa del descubrimiento científico puede no ser epistemológica bajo algunas concepciones epistemológicas que no son estrictamente ni positivistas, ni popperianas.

#### **1.4. Reglas heurísticas.**

¿Son las búsquedas heurísticas, el fundamento del descubrimiento científico o se necesita otro tipo de suposiciones? En este sentido Simon expresa lo siguiente: El procedimiento completo de búsqueda heurística descansa sobre una suposición (usualmente no expresada) de la simplicidad de la naturaleza: una suposición de que el fenómeno bajo estudio posee alguna estructura o legalidad. En este contexto las heurísticas son estructuras que captan otras estructuras que están en la naturaleza. Si esta interpretación es válida, la suposición de simplicidad nos lleva directamente a considerar seriamente la posibilidad de incorporar la noción de *patterns* como fundamento de las reglas heurísticas. Estas consideraciones podrían tener efectos importantes en el debate sobre la existencia o no de una lógica del descubrimiento, puesto que dejaría abierto el camino a interpretaciones tipo Gestálticas, usualmente consideradas como factores psicológicos que apartan al descubrimiento del ámbito de la filosofía de la ciencia.

A. Milosavljevic (1995/1996) propone reemplazar el principio de simplicidad por la codificación más concisa de los datos observados, pero creo, que su propuesta si bien no supone un agente gestáltico también se apoya en alguna noción de *patterns*.

### ***1.5. El problema de la representación***

La representación y cambios de representación ha sido una de las tareas más difíciles de derivar a partir de una teoría de resolución de problemas. En la década del 70 Simon advierte que va a ser una de las áreas de mayor trabajo en los años venideros; veinte años después en el artículo *Machine Discovery* (Simon, 1995/1996), dice exactamente lo mismo, no habiendo durante todos estos años ningún progreso significativo. El cambio de representación, por ser un proceso que ocurre por lo general repentinamente, puede constituir un obstáculo serio al carácter incremental del descubrimiento científico y con ello a la teoría de resolución de problemas. Los conceptos de inspiración, intuición e *insight* que se han reportado en casi todas las biografías de científicos famosos y que se han usado en contra de una reconstrucción racional de descubrimiento científico, podrían ser traducidos a problemas de representación y sus cambios.

Para resolver un problema primero hay que representarlo, como no existe una representación general para todos los problemas posibles surge la necesidad de que los programas que intentan simular la actividad científica cuenten con mecanismos para brindar una representación adecuada. Este problema, como ya lo expresé anteriormente, ha tomado una nueva dimensión después de la aparición de sistemas conexionistas que, a diferencia de los sistemas simbólicos de procesamiento de información no necesitarían ser reprogramados para representar una situación no contemplada al momento de diseñarse el sistema. Si bien esta arquitectura no está lo suficientemente desarrollada como para ser aplicada en la modelización del descubrimiento científico, ofrece alguna

evidencia de que es posible incorporar aprendizaje o flexibilidad a un sistema computacional. Visto desde la perspectiva de los sistemas conexionistas o de sistemas sub-simbólicos o desde casi todos los sistemas que han tenido en cuenta la percepción, los programas antes citados son demasiado elevados y aunque tengan éxito, no nos permiten comprender los verdaderos procesos a los que la simulación está dirigida. Tanto Marr (1977), como Hodsftater (1995) sostienen estos puntos de vista y proponen que se trabaje sobre cuestiones más básicas (visión, serie de números, reconocimiento de letras, etc), nociones que por estar presupuestas (puesta por el programador) en las simulaciones, le confieren a las mismas una inmerecida autonomía.

La generación de representaciones adecuadas a distintos contextos no puede derivarse completamente de los cuatro principios que caracterizan a la noción de resolución de problemas, en primer lugar, por la inflexibilidad de la arquitectura sobre la cual están construidos y en segundo lugar porque requeriría como principio extra, la detección autónoma de *patterns*.

### ***1.6. El insight en la teoría de resolución de problemas:***

Para la teoría de resolución de problemas la familiarización y el olvido selectivo son mecanismos suficientes para dar cuenta del *insight* científico. Esta noción cuya traducción no es directa, puede ser caracterizada como la comprensión repentina o instantánea que los expertos tienen en situaciones que a otras personas no entrenadas le demandarían mucho tiempo o inclusive le sería imposible lograrla. En casos como el diagnóstico médico o el de los grandes maestros de ajedrez, esta interpretación parecería en principio válida pero, en casos de *insight* por cambios de representación, no parecería que el conocimiento del dominio sea siempre relevante, más bien en algunos casos puede ser perjudicial. En el caso del descubrimiento de Kreb del ciclo de la Urea, el hecho de ser un principiante en el campo, le permitió usar técnicas no

estándar, que a su vez le posibilitaron ver el objeto de estudio desde una perspectiva completamente diferente. Podríamos considerar este caso, como un contraejemplo a los mecanismos y la arquitectura de reconocimiento que propone Simon para comprender la resolución repentina de problemas.

## **2. Objeciones al descubrimiento como resolución de problema como búsqueda**

### *2.1. Argumentos sobre límites al descubrimiento científico como resolución de problemas*

Hasta aquí hemos analizado los distintos supuestos de esta aproximación al descubrimiento científico. Hemos visto que enunciada sin otras aclaraciones podría recibir muchas interpretaciones con distintas consecuencias filosóficas. Podemos pensar por ejemplo que Popper desde su perspectiva evolucionista también afirma que el descubrimiento científico es resolución de problemas, que los psicólogos de la Gestalt apoyándose en una concepción no digital, también apoyan una perspectiva de resolución de problemas, etc. En esta parte, aceptando provisoriamente la validez en algún nivel de cada uno de estas versiones, mi objetivo será tratar de ver las objeciones que se han presentado a la concepción de Newell y Simon y a partir de estas, intentar ver en qué medida las otras versiones logran salvarlas.

Sintetizaré nuevamente esta teoría a los fines de que haya una mejor comprensión de las críticas que posteriormente presentaré. Para Simon, su teoría de descubrimiento científico como resolución de problemas se basa en las siguientes suposiciones:

1) Es una teoría porque “postula una organización de procesos suficientes para dar cuenta de los descubrimientos y los fenómenos conductuales observables que la acompañan” (Simon, 1992a: 5).

2) Los científicos no piensan de un modo cualitativamente diferente. Implícitamente a través de sus modelos computacionales, afirma que los procesos de pensamiento son básicamente los mismos que “los procesos de pensamiento humano que han sido modelados en escenarios más mundanos” (Simon, 1992a: 5).

3) Tampoco hay diferencias en las formas de resolver problemas en las distintas actividades, lo que distingue a un dominio de otro es el conocimiento sustantivo específico y no los procesos usados para aplicar este conocimiento.

4) Todos los modelos de descubrimientos están fundados en la hipótesis de los sistemas de símbolos físicos. (Newell & Simon, 1976)

5) La resolución de problemas comporta una búsqueda selectiva a través de grandes espacios de posibilidades. La selectividad está basada en reglas heurísticas que le permite que tales búsquedas frecuentemente logren el éxito en tiempos razonables, donde una búsqueda no dirigida por ensayo y error requeriría una enorme cantidad de tiempo, y a menudo no sería completada en una vida humana.

6) Algunas de las heurísticas que guían la búsqueda en la resolución de problemas son específicas al dominio de la tarea, pero otras son completamente generales, se aplican a un amplio rango de dominios. La generalidad conlleva la imposibilidad de usar información específica.

7) La heurística más importante y más ampliamente usada es el análisis medio-fin.

8) El conocimiento específico del dominio es lo que en gran parte distingue al experto del novato y consiste en información almacenada en la memoria en forma de producciones. Un experto posee en promedio unas 50.000, lo que hace que no haya un límite preciso entre *insight* o intuición y análisis.

9) Intuición y análisis son simples actos de reconocimiento basado sobre el conocimiento del dominio.

10) Su método básico es la búsqueda selectiva (heurística).

11) Usa heurísticas generales y específicas del dominio.

12) El análisis medio-fín, una heurística de amplia aplicación, juega un rol importante en el análisis y en el razonamiento.

13) La efectividad del descubrimiento depende de procesos de reconocimiento.

14) Todas las actividades científicas, como descubrir y definir problemas, encontrar apropiadas representaciones para problemas, diseñar estrategias y procedimientos experimentales, planear y ejecutar experimentos, obtener datos mediante observación, formular leyes y teorías que den cuenta de los datos, usar matemática y otras formas de razonamiento, deducir consecuencias para sus teorías, inventar instrumentos para hacer observaciones, diseñar teorías explicativas que den una concepción más profunda de las leyes descriptivas, son resolución de problemas y hacen uso de los principios de resolución de problemas.

El argumento más usado, a menudo llamado el argumento de las tres “i”, contra el descubrimiento como resolución de problemas se basa en la caracterización del descubrimiento como *insight*, intuición e inspiración. La principal evidencia que apoya estas afirmaciones es el carácter repentino con el que se realiza un descubrimiento (frecuentemente precedido por un período de interrupción grande o pequeño) y que el camino que llevó al descubrimiento normalmente no puede ser explicado por el sujeto que realiza el descubrimiento. (Simon, 1992a: 12)

Es una cuestión empírica si la creatividad en ciencia puede o no ser explicada por referencia a una teoría del descubrimiento.

## ***2.2. El problema de la inducción no es superado por la teoría del descubrimiento de Simon.***

Como es ampliamente conocido, una de las dificultades principales que tuvo que enfrentar el tratamiento filosófico del descubrimiento científico ha sido la íntima relación que se consideró que había entre este tópico y el problema de la inducción. Se sospechó que la posibilidad de una teoría normativa del descubrimiento dependía de la solución del problema de la inducción.

Simon en *Does Scientific Discovery have a Logic?* (1973) ofrece una salida a esta dificultad proponiendo una definición de descubrimiento que no necesita de la justificación de inducciones:

Un proceso de descubrimiento de leyes es un proceso para registrar, en modo económico, un conjunto de datos empíricos. (Simon, 1973: 475)

Esta definición puede verse también a través de la teoría algorítmica de la información, descubrir sería comprimir la información disponible, expresar con menor cantidad de información un conjunto de datos iniciales. Lo que ocurre con datos que no están dentro del conjunto de partida estará vinculado al proceso de justificación de las leyes generadas pero no al proceso de descubrimiento de las mismas. En otras palabras, si detectamos un patrón en una serie que permite una descripción más económica de la misma, la validez de la predicción obtenida por extrapolar la fórmula es parte del proceso de justificación y no del proceso de descubrimiento.

El descubrimiento de leyes consiste sólo en buscar patrones en los datos que han sido observados. Si los patrones siguen valiendo para nuevos datos observados se decidirá en el curso del testeo de la ley, no en su descubrimiento (Simon, 1973: 475)

Angelo Petroni (1992) cuestiona que Simon sea consecuente con esta definición y afirma que en sus programas computacionales de descubrimiento se emplean inferencias estrictamente inductivas.

Específicamente considera que el programa KEKADA tiene tres generadores de hipótesis (Cf. Apéndice 2):

HG1: si un resultado sorprendente ocurre involucrando a A como uno de sus reactantes, entonces cree la hipótesis de que hay una clase de sustancia conteniendo A o sus derivados que producirá el mismo resultado”

HG2: si hay un resultado sorprendentemente bajo de una sustancia A bajo algunas condiciones experimentales pero no en otras, y si es posible que otra sustancia S esté presente en las últimas condiciones pero no en las primeras, cree la hipótesis de que la ausencia de S está causando el resultado bajo.

HG7: Si el resultado a partir de A y el resultado a partir de B es diferente a la suma de los resultados de A y B entonces cree la hipótesis de que hay una acción mezclada a partir de A y B. De otro modo crear la hipótesis que el efecto es aditivo.

Ellos son claramente inductivos y no pueden evadir el problema de la inducción. La pregunta obvia es por qué esto es tan importante. Porque Simon no admite el problema de la inducción como parte de una lógica del descubrimiento. La definición de descubrimiento como patrón económico, no sólo permite evadir el problema de la inducción sino que ofrece la posibilidad de una teoría normativa, se puede elegir entre distintos patrones de acuerdo a su simplicidad o descripción más compacta de los datos. Si para descubrimientos como el ciclo de ornithina uno tiene que ampliar la noción de descubrimiento admitiendo reglas como HG1, HG2 y HG7, ya no es posible fundar el carácter normativo apelando a una relación entre ley y datos iniciales. En otras palabras, la admisión del problema de la inducción socava la objetividad del conjunto de criterios para evaluar los procesos de descubrimiento de leyes.

Las heurísticas del KEKADA no son descripciones económicas de datos y es por esta razón que escapa a la idea de descubrimiento dada anteriormente.

Pero, si la definición de descubrimiento no nos asegura relevancia normativa en todos los casos considerados (sí en programas tipo BACON, pero no en KEKADA) qué alternativas quedan para una lógica del descubrimiento. Para Petroni, la versión Simon, incluyendo heurísticas como las del KEKADA, no tiene otra salida que una epistemología naturalizada, no prescriptiva. La respuesta que da Simon a esta última objeción de Petroni en *Scientific discovery as problem solving: reply to critics* (Simon, 1992b: 84) es que esto no impide que haya prescripciones como en cualquier otra actividad. La dificultad de esta réplica es que la normatividad pierde dimensión epistemológica, queda demasiado “post-hoc”, justificando la relevancia metodológica del descubrimiento pero no su relevancia epistemológica.

Pasar de la simulación de descubrimiento como los BACON, que buscan una fórmula que ajuste a un conjunto de datos, a programas que intentan simular descubrimiento producidos por experimentación nos obliga a reemplantearnos cómo consideramos la relación entre descubrimiento e inducción o para ser más precisos, la relación entre descubrimiento y experimentación nos lleva a reconsiderar la definición de descubrimiento como un simple patrón que da cuenta de los datos.

### ***2.3. Descubrimiento es estructuración de la pregunta correcta y no sólo resolución de problemas:***

Filósofos y científicos cognitivos han cuestionado la exclusividad y primacía de la noción de resolución de problemas en la caracterización del descubrimiento científico (Shank & Hughes, 1992) (Marconi, 1992) (Petroni, 1992). Tanto la estructuración de preguntas relevantes, como la generación de problemas, han sido señaladas como una parte fundamental de los pasos de descubrimientos importantes. Atrás de esta idea está también la opinión que la dificultad no está dada por la identificación o generación de respuestas correctas sino en la generación del problema.

Esta crítica adquiere una dimensión mayor cuando, como en el caso de Simon, asociamos el concepto de resolución de problemas a resolución por computadoras. Implícitamente lo que se afirma es la imposibilidad de diseñar computadoras o programas de computación que puedan generar las preguntas que han impactado en el desarrollo de la ciencia. Pero, cabe preguntarse, ¿es posible dar una definición de problemas que impida su generación mediante computadoras?

#### ***2.4. Descubrimiento es también explicación y comprensión no sólo ajuste de una fórmula a datos.***

Esta crítica está dirigida principalmente a los programas tipo BACON, donde a partir de un conjunto de datos cuantitativos se intenta producir una fórmula que de cuenta de los mismos. En otras palabras, los descubrimientos científicos computacionales están limitados a simples fórmulas descriptivas que dan cuenta de los datos. No ofrecen explicaciones de los fenómenos. En *Scientific discovery as problem solving: reply to critics* (1992b), lleva esta discusión al plano de los programas. Su argumento es, nuevamente, que si existen programas que producen explicaciones entonces tales críticas quedan desvirtuadas. Veamos sintéticamente los tipos de programas computacionales propuestos.

Las explicaciones de la combustión del programa STAHL primero en términos de teoría del flogisto y luego en términos de la teoría del oxígeno (Simon, 1992b: 82-3)

...el programa DALTON construye modelos atómicos para los datos de Dalton sobre reacciones químicas y modelos genéticos de datos de los guisantes de Mendel (Simon, 1992b: 83)

El programa KEKADA, no sólo descubre el rol de la ornithina en la síntesis *in vivo* de la urea, sino que elucida los caminos de reacción junto con los procedimientos de reacción que en el lenguaje de los químicos, explica la reacción. (Simon, 1992b: 83)

Los programas BACON, a pesar de lo simples que son,

ofrecen contenidos para algunas de las leyes que redescubren, introduciendo (sin indicación del programador) términos teóricos tales como masa inercial, calor específico e índices de refracción. (Simon, 1992b: 83)

Para Simon, estos ejemplos muestran que se puede dar cuenta de los distintos procesos que usualmente se denominan “explicación” y que no ha encontrado por ahora en las críticas relacionadas con este tópico, categorías de explicación que los programas no hayan implementado. En un trabajo más reciente *Discovering explanations* (Simon, 1998) hace una defensa un poco más elaborada basada sobre las siguientes suposiciones:

- a) Hay tanto acuerdo que una de las actividades científicas más importante es la explicación de fenómenos como desacuerdos acerca de su definición o caracterización
- b) Desde un punto de vista fenomenológico no hay diferencias entre teorías descriptivas y las correspondientes teorías explicativas. En muchos casos son funciones que conectan las variables dependientes e independientes. (Simon, 1998: 9-10).
- c) La línea entre teorías descriptivas y explicativas no es precisa, encontramos muchas clases de casos intermedios-especialmente explicaciones cualitativas. (Simon, 1998: 10).
- d) Explicación como relaciones entre niveles no simétricos de sistemas casi descomponibles.
- e) Las explicaciones son descubiertas con la ayuda de los mismos procesos que son usados para resolver otras clases de problemas, y describen algunas de las características de la resolución de problemas que tiene lugar en la ciencia. (Simon, 1998: 35).

Hacer una evaluación exhaustiva de las críticas y defensas, dada la complejidad del concepto de explicación y más las posibilidades de ser o no simuladas en una estructura de resolución de problemas, excede a este trabajo. Pero me gustaría señalar dos aspectos que en principio serían problemáticos para una teoría del descubrimiento científico como resolución de problemas en la versión Simon. El primero tiene que ver con la cuestión del rol de las relaciones causales en las explicaciones científicas y en la distinción entre descripción y explicación. Es un tema que ya tiene cierta historia en la IA, y que ha merecido algunas observaciones por parte de algunos filósofos de la ciencia. ¿Es posible que un programa pueda determinar relaciones causales? Volvamos al KEKADA, programa que, como señalé más arriba, implementa alguna

forma de experimentación y que Simon considera que materializa explicaciones de tipo causal.

La literatura sobre el tema nos llama a ser cautos,

Aunque casi cualquier aproximación a “*machine discovery*” se apoya al menos implícitamente sobre una concepción de la causalidad, estas cuestiones fundamentales son rara vez consideradas. Muchas de estas aproximaciones toman su concepción de la causalidad de la física cualitativa. Pero el rol de la causalidad en la física cualitativa está lejos de ser clara, en realidad es uno de los tópicos más controvertidos del campo... y algunos dudan que exista un concepto independiente del dominio aplicable a todos. (GraBhoff & May, 1995: 47)

### ***2.5. Carece de dimensión normativa.***

La atribución de dimensión normativa al contexto de descubrimiento fue una de las razones principales que relegó a este contexto del tratamiento filosófico. Con la resurgencia de los estudios sobre descubrimiento científico a fines de los 70 y principios de los 80, se empieza a reconsiderar esta posibilidad tan negada por el positivismo lógico y sus críticos. Inclusive filósofos como Laudan, que tanto esfuerzo han realizado para apartarse del positivismo, comparten con esta posición la negación de una dimensión normativa al descubrimiento científico. Pero, cualquier respuesta a esta cuestión depende del punto de vista que, tomemos respecto a la epistemología, principalmente si consideramos a ésta empírica o abstracta, *a priori* o *a posteriori*. El trabajo de Laudan *Why Was the Logic of Discovery Abandoned?* (Laudan, 1978) puede ser leído como desafío en este sentido a una teoría normativa o una lógica del descubrimiento. Es un desafío que a diferencia del popperiano no ataca que los estudios o teorías del descubrimiento científico puedan encontrar reglas que expliquen o produzcan descubrimiento científico. Esta nueva crítica se basa en mostrar que los métodos actuales de descubrimiento no ofrecen justificación y que si no hay justificación en

los procesos de descubrimientos no tienen ningún sentido hablar de una lógica del descubrimiento.

Simon, vio claramente que responder a este interrogante era crucial para poder no sólo hablar de una psicología del descubrimiento científico sino también de una epistemología del descubrimiento científico. Su respuesta fue doble. Por un lado, se montó en la ola postkuhniana de no exigir reglas justificadas *a priori* ni siquiera para el contexto de justificación. Por el otro, abogó a favor de una epistemología empírica, donde el concepto de normatividad quede ligado a la existencia de reglas de descubrimiento, y que puede evaluarse comparativamente la eficacia de las mismas. La pregunta obvia, para un lector con una mínima de cultura filosófica es cómo lograrlo sin caer en la circularidad de justificar empíricamente métodos empíricos. Es aquí que a pesar de las afirmaciones vertidas por Laudan en *Why Was the Logic of Discovery Abandoned?*, ambas aproximaciones caen en un problema común, el problema de cómo construir una epistemología usando como base el concepto de resolución de problemas.

Para mostrar esto, mi estrategia consistirá en usar el análisis de K.Kelly del naturalismo normativo de Laudan y mostrar que la aproximación de Simon sigue la misma dirección a pesar de que su análisis no es historicista. Sintéticamente lo que trataré de mostrar usando la denominación de Oliver Schulte (1999) es que ambos en última instancia presuponen una epistemología medio-fin.

Simon, con señalé más arriba al proponer como tercer principio de su teoría del descubrimiento como resolución de problemas que el análisis medio-fin es una de las principales heurísticas y de más amplia aplicación, estaría en esta dirección aunque no le serían aplicables las críticas de Kelly a Laudan de que sus métodos son cajas negras, sin estructura formal validados sólo por la historia. La defensa que hace Kelly de un normativismo naturalizado computacionalmente informado, se basa en reemplazar las evidencias históricas por modelos lógico-computacionales. La pregunta obvia es si un naturalismo normativo

atribuido al Laudan de *Beyond positivism and relativism theory, method, and evidence* (1996) se aplica directamente a la aproximación de Simon, siendo que identificamos en general a Laudan con cierta refracción a consideraciones epistemológicas sobre el contexto de descubrimiento científico. Hay dos alternativas que zanjarían esta cuestión; la primera es considerar ciertos cambios en sus consideraciones hacia una lógica del descubrimiento o teoría normativa del descubrimiento científico entre las dos obras consideradas. Esto haría afín ambas posiciones y redundaría en una coincidencia acerca de los objetos de un naturalismo normativo o epistemología medio-fin. La segunda, es considerar en qué medida el naturalismo normativo, independientemente de la posición de Laudan respecto al descubrimiento, admite una interpretación generacionista. Una evidencia a favor de esto último es que el propio Kelly defiende una lógica del descubrimiento y que la misma está dentro del naturalismo normativo. Pero la lógica del descubrimiento de Kelly que intenta ser una lógica en sentido estricto, difiere de la lógica del descubrimiento de Simon que es una lógica en el sentido más laxo del término. Kelly, hace suyos los requisitos ineludibles de un lógica del descubrimiento que señala Laudan en *Why Was the Logic of Discovery Abandoned?* e intenta ofrecer la confiabilidad *a priori* que este exige. En este sentido, en el trabajo de Simon, a pesar de que al igual que Kelly se apoya en la teoría de la computación para plantear nuevas direcciones al estudio del descubrimiento, no pretende establecer la confiabilidad *a priori*, y en este sentido se acerca más al tipo de normatividad sostenida a la posición de Laudan. Pero volviendo a marcar las diferencias con Laudan, no podemos endilgarle a Simon que trata los problemas como cajas negras, sin estructura. Muy por el contrario, las heurísticas y las leyes de descubrimiento de Simon, son un reflejo de la estructura del medio. Pero admitiendo que la teoría del descubrimiento de Simon es sensible a la estructura de los problemas, de las resoluciones y de los métodos de resolución, nos queda abierta la siguiente pregunta: ¿Podemos decir que para Simon la historia o la de psicología de la ciencia tiene la última palabra en cuanto a la validez o racionalidad de los métodos? En otras

palabras, ¿es una epistemología irremediablemente empírica o la parte computacional de la misma la hace empírica pero no *post hoc*? Por otra parte, al intentar los programas de Simon, simular descubrimientos históricos, ¿se hace pasible del historicismo que Kelly le atribuye a Laudan? En cierto sentido podemos decir que al igual que Laudan, habría en la simulación de algunos casos históricos la obtención de imperativos hipotéticos usando correlaciones, pero en muchos casos se aborda estos casos a partir de correlaciones obtenidas en experimentos psicológicos. Pero, como lo han señalado algunos autores, también las simulaciones son producto de los mismos lenguajes de programación y de métodos que se ajustan a las posibilidades de las computadoras digitales. En el caso del naturalismo normativo de Kelly, el uso de análisis computacionales *a priori* de las condiciones bajo las cuales un método tiene éxito, presenta un perfil menos contaminado de cuestiones históricas y psicológicas pero no explica de donde provienen dichos métodos. Por otra parte, es indudable que Simon al sostener implícitamente que es posible construir una teoría general del descubrimiento científico, queda más debilitado frente a la críticas de Feyerabend que de Laudan.

### ***2.6. No da cuenta de las dificultades que presentan los descubrimientos científicos en la historia de la ciencia.***

Esta observación está relacionada con resultados obtenidos en experimentos con sujetos que no son científicos profesionales (estudiantes) que en la literatura sobre psicología del descubrimiento se denominan “descubrimiento *in vitro*” Por ejemplo, se le dieron a un grupo de estudiantes los datos que tenía Kepler antes de descubrir su tercera ley, y lograron obtenerla en menos de una hora, un descubrimiento que a Kepler le llevó casi 10 años. Suponiendo que este contraste sea efectivamente así (la comparación es válida si suponemos que los sujetos que realizan el experimento no poseen ya ciertas heurísticas internalizadas que eran infrecuentes en la época de Kepler), se

pueden señalar sobre esto algunas lecturas diferentes. Al igual que en las simulaciones computacionales del programa BACON, a los sujetos experimentales se le dan los datos ya seleccionados y representados, siendo estas tareas la que hacen dificultosos o muy extendidos en el tiempo los descubrimientos importantes. Desde otra perspectiva de cuño gestáltico, se podría objetar la supuesta facilidad basándose en la dificultad de reestructurar un problema de un modo radicalmente nuevo. El acostumbramiento, peso, etc. de una tradición hace que la transición a una nueva exija un esfuerzo considerable, una velocidad de escape para no ser atrapado nuevamente por las fuerzas conservadoras que lo retienen en el viejo esquema.

Si bien es claro que no constituye como crítica ninguna amenaza seria para la hipótesis que estamos considerando, hay un aspecto que merece destacarse. Esta dificultad para descubrimiento pone en duda una de los principios centrales de la teoría del descubrimiento científico como resolución de problemas, lo hace algo especial e improbable atentando contra la idea de que el descubrimiento es desde el punto de vista de las estrategias similar a cualquier actividad resolutora de problemas del hombre común. Shanker ve en esta tendencia una obsesión persistente y consecuente de la IA en no dejar ninguna grieta por la que se pudieran filtrar formas de *insight* no mecánicas.

### ***2.7. Los programas no pueden crear nuevas heurísticas.***

La idea que está por detrás de esta observación es que las computadoras tienen reglas fijas, que se las colocó el programador y que sólo se pueden agregar reglas nuevas siempre que el mismo modifique el programa. También, presupone que no hay un conjunto más o menos manejable de heurísticas a partir de las cuales se puedan generar todos los descubrimientos posibles. Presupondría una actitud tipo Feyerabend, de que no hay un método, sino una pluralidad sin límite de los mismos que obligaría a cualquier sistema que pretenda simular la forma de hacer

descubrimientos humanos a generar continuamente nuevas reglas metodológicas. Todo esto nos lleva obviamente a preguntarnos por el origen de las heurísticas, si estos procedimientos pueden ser entendidos a partir de la teoría de resolución de problemas y si independientemente de la vinculación de la teoría de resolución de problemas es posible simularlos mediante computadoras.

La concepción evolucionista del descubrimiento, especialmente en la versión de Campbell, usó este desafío para marcar diferencias con la versión de Simon. Para Campbell, la producción de algún tipo de conocimiento totalmente nuevo depende de la producción de nuevos métodos que sólo pueden ser generados mediante mecanismos de variación ciega y retención selectiva. Todo avance más allá de la frontera de lo conocido sólo puede realizarse mediante procesos de variación ciega.

...una computadora que generara sus propias heurísticas tendría que hacerlo por medio de un ensayo y error ciego de principios heurísticos, cuya selección representaría el conocimiento general logrado. (Campbell, 1974)

Pero esto no impide que una computadora pueda generar sus heurísticas, como lo han demostrado los algoritmos genéticos y la programación evolutiva. Pero la crítica puede apuntar a algo más fuerte que simplemente decir que bajo una perspectiva heurística de la resolución de problemas no es posible generar conceptos teóricos nuevos. Puede significar que es imposible mediante computadoras, cualquiera sea su tipo de programación, producir conceptos teóricos. No se han ofrecido argumentos precisos que avalen explícitamente esta posición, aunque se podrían citar los argumentos de incomputabilidad de Penrose y la subdeterminación de la teoría por los datos. Pero los argumentos más específicos provienen de cómo se generan estos conceptos en la historia de la ciencia, donde se considera poco probable que la generación de conceptos sea inductivamente derivada de los datos, principalmente en los períodos maduros una disciplina.

## ***2.8. Los procesos de reconocimiento no agotan el insight.***

Tal como ya lo expresara en la historia del concepto de resolución de problema y en la versión que ofrece Shanker, gran parte de la agenda de la IA puede entenderse como estrategias para sobreponerse a la visión romántica de la creatividad centrada en el concepto de *insight*. La reducción que se intentó fue considerar que el *insight* o la comprensión repentina no implicaba un salto creativo no racional sino que por el contrario podía explicarse como producto del reconocimiento en base al conocimiento indexado que los expertos o mentes preparadas poseen. El argumento es un poco más complejo que esto, porque en principio lo que trató de hacerse es reducir a estos procesos a una forma que pudiera integrarse a resolución de problemas por computadoras. Esto implicaba dos cosas, primero que en general no existen procesos repentinos, que todos los casos de creativos, a pesar de los relatos biográficos, son procesos continuos e incrementales. La imposibilidad de seguir los procesos creativos en toda su extensión, fundamentalmente por las limitaciones de la introspección, deja abierto este problema para más de una interpretación. La ventaja de la interpretación computacional es que ofrece un modo de llenar los procesos que caen bajo el umbral conciente y ofrece una definición operativa que hace posible experimentar con los mismos. Pero a pesar de estos logros de la IA, que pueden verse como una superación de corrientes rivales de la psicología de resolución de problemas, la simulación de descubrimientos científicos mediante computadoras no ha producido ejemplos que nos indiquen que los relatos que nos ofrece la historia de la ciencia puedan ser dejados totalmente de lado. Y esto como ya vimos, no tiene que ver solamente con que no han podido ofrecer simulaciones de casos complejos, ni que hayan producido por sí mismos descubrimientos importantes. Tomando sus propios resultados, no es claro que podamos atribuirle los logros que pretenden: haber ofrecido una simulación completa de los aspectos esenciales de los descubrimientos a los cuales están dirigidos. Volveré más adelante sobre este aspecto, la relación entre programas de simulación de

descubrimiento e historia de la ciencia, para ver en qué medida a pesar de su falta de correspondencia exacta, constituyen aproximaciones convergentes. Pero ahora intentaré presentar otra perspectiva sobre cómo considerar el *insight* fuera del corsé computacional de Simon. Para esto volveré sobre el modelo Gestáltico de resolución de problemas, un modelo que también ofreció explicaciones del fenómeno de *insight*. Son muchos los aspectos de esta psicología que tienen relación con el descubrimiento, el holismo, la autoorganización, etc., algunos de ellos rescatados recientemente bajo el título “la hipótesis dinámica en IA” Comenzaré por lo que considero la presentación más simple, la que vincula los procesos creativos a procesos perceptivos. Recordemos para ubicarnos en este contexto, que para la IA clásica la resolución de problemas y en especial el fenómeno de *insight* se da entre los procesos concientes y los procesos perceptivos. Es decir, que no se le otorga ninguna relevancia cognitiva a los procesos ubicados bajo determinado umbral. Esto lleva a preguntarnos si el *insight* en alguna de sus acepciones no puede estar vinculado a cambios de representación producto de procesos perceptivos. No hay muchas evidencias que puedan llevarnos a afirmar tajantemente la viabilidad de tales heterodoxias y con esto me estoy refiriendo a casos de resolución de problemas que nos muestran la insuficiencia de una perspectiva basada en reglas e información indexada. Aunque es una tendencia que ha crecido fundamentalmente con la proliferación de investigaciones sobre razonamientos diagramáticos o por imágenes, existen pocas evidencias aunque con un peso que creo que merecen ser tenidas en cuenta. La alternativa que propondré no deja ser un poco forzada y tal vez demasiado incipiente como para pretender erigirse en un límite a la hipótesis objeto de este trabajo. Comenzaré por volver al concepto de problema en Simon, agregando a lo dicho hasta aquí que su modelo presupone básicamente la gradualidad en los procesos resolutivos de problema, que la complejidad del problema está dada por el tamaño de sus espacios medidos no por la distancia sino por la cantidad de estadios. La distribución espacial de los mismos no es un factor que pueda influir

causalmente, salvo en los casos extremos que escapan al campo visual del sujeto resolutor del problema o que no sean visibles por tamaño.

Como fue expuesto anteriormente Ormerod et al. (Ormerod & Chronicle, 1999) encontraron evidencias de que en la resolución del problema del viajante, los resolutores humanos lograban establecer mejores y más rápidas soluciones para cierto ordenamiento espacial de los puntos en el plano. En menos de 2 segundos podían reconocer formas óptimas, lo que no podía realizarse usando computadoras con heurísticas basadas en el vecino más próximo, entendiéndose esto último como reglas cuya decisión está condicionada solamente por los puntos cercanos o próximos. La reacción natural es preguntarnos ¿Qué importancia tiene esto para abordar las dimensiones del concepto de *insight*? Es obvio que lo espacial cumple alguna función en los procesos de resolución de problemas, pero en qué medida esto desafía la concepción de Simon y la IA clásica en general sobre el *insight*. El argumento que presentaré se parece al usado por Chomsky contra la concepción conductista de adquisición del lenguaje; muestra que la realización en determinados períodos de tiempo hace imposible pensar que pueda realizarse mediante la concepción rival. En este caso se sigue una línea argumental parecida, para ciertos problemas el ser humano muestra cierta velocidad de resolución que es imposible pensar que puede haber sido realizada usando mecanismos paso a paso. La dificultad que se nos presenta es determinar qué tipo de procesos o mecanismos son aquellos que no son paso a paso. Se han propuesto como alternativas las redes neuronales y los sistemas dinámicos que aparentemente desafían los presupuestos de Simon sobre resolución de problemas, pero opaca un poco el contraste el hecho que esto no signifique todavía un desafío serio a la hipótesis computacional, a la hipótesis que podemos simular mediante una computadora digital los procesos de descubrimiento científicos.

### ***2.9. Los procesos de incubación no son compatibles con la concepción de Simon.***

Contraria a la crítica anterior que se apoya en la dificultad del modelo de Simon en enfrentar procesos repentinos de resolución de problemas, se sigue aquí una dirección opuesta.

Cómo podemos explicar los largos períodos de gestación de una idea, sus laberínticos caminos, cuando desde esta teoría parece todo tan simple. Los psicólogos de la gestalt vieron en la fijación el mecanismo responsable de este factor retardante de los procesos de resolución de problemas. En los casos de descubrimientos, la incubación toma una dimensión más compleja, puesto que muchas veces se genera la respuesta pero se demora mucho tiempo en reconocerla como tal. La aceptación o rechazo a la resolución de un problema queda supeditada a muchos factores que exceden al problema mismo.

### ***2.10. Los programas BACON hacen una suposición no realista de las condiciones iniciales.***

Los programas comienzan en general con un conjunto de datos dados, generalmente se trata de los mismos datos que se dieron en el caso histórico. No obstante, muchos atribuyen la dificultad en la producción de descubrimientos a que una de las etapas más complicada en el proceso es precisamente la selección de datos relevantes. La defensa que dan Simon et al. no es generalizable pero merece considerarse. Toma como ejemplo el descubrimiento de la tercera ley de Kepler y contesta a los críticos que en este caso si bien es probable que la selección sea algo difícil, Kepler tenía estos datos de Tycho Brahe. En otras palabras, que no se le puede exigir a un sistema computacional de descubrimiento científico más de lo que se le pide a los grandes científicos creativos que heredaron representaciones, enseñanzas, técnicas e instrumentos de sus predecesores.

### ***2.11. Irreductibilidad de los procesos humanos de descubrimientos a determinados sistemas físicos.***

El supuesto de que podemos simular mediante computadora los procesos de descubrimiento científico no es ajeno a problemas filosóficos ligados a la mente humana. No es una cuestión resuelta si los procesos de la mente humana pueden ser simulados en otros sistemas distintos a los sistemas humanos. Los trabajos de Gödel y Turing a principios de los 30 desencadenaron una serie de problemas filosóficos que atraviesan todo el SXX. La magnitud de los mismos hace adecuada la frase de Shanker al decir que respecto a la resolución de problemas y a la creatividad científica es conveniente distinguir entre período pre y post computacional. A diferencia de las concepciones mecanicistas anteriores, aparece una nueva versión centrada en la noción de cómputo, una noción cuyo estatus ontológico no es claro debido a que se sospecha que es producto de atribución intencional y no tiene existencia física independiente. O por el contrario, que se dé por admitida la naturaleza física del cómputo, pero se asocien los procesos creativos a procesos no computacionales que requieren de una física que todavía no tenemos. No escapa a este conjunto, una caracterización de los procesos mentales como algo que solamente puede tener una base biológica y que descarta toda simulación en un medio puramente físico. Es difícil comprimir en pocas palabras toda esta discusión, pero me gustaría contextualizarla respecto a los alcances y límites del tema de este trabajo. En pocas palabras podríamos decir que si la hipótesis de la computabilidad es viable tanto en principio como prácticamente, entonces el estudio del descubrimiento científico por simulación computacional o por la teoría de la computación es plausible. Si esta hipótesis es limitada o no válida, como afirma Penrose, entonces no es factible producir una teoría general del descubrimiento científico bajo tales suposiciones de fondo. Lo que dije más arriba lo vuelvo a remarcar, los procesos de *insight* siguen siendo el punto donde se dirimen posiciones sobre la mente humana en general y sobre el descubrimiento en particular, si hay procesos de

*insight* que no son computables, y si estos procesos forman parte del razonamiento científico se necesita trascender los límites de la IA y el computacionalismo en general para obtener una teoría general del descubrimiento científico. Decirlo parece de algún modo fácil; el problema es cómo realmente llevar a cabo esto. Me parecen atinentes los comentarios de Dennett (1989) en su reseña de *The Emperor's New Mind*, para hacer esto se necesita tirar abajo los pilares de la ciencia actual. Es algo que muchas veces no siguen los enemigos del descubrimiento; para postular que en principio no se pueden computar los procesos de generación de teorías hay que tirar por la borda muchas cosas que tal vez no estemos dispuestos a tirar. Pero ¿a qué viene esto respecto a Simon?, ¿qué relación o peso tiene el computacionalismo con su teoría del descubrimiento científico como resolución de problemas? Algo ya fui insinuando anteriormente, sin embargo me gustaría remarcarlo nuevamente en el contexto de esta crítica. El gran logro de Newell y Simon fue encontrar una salida interesante a los resultados que se obtuvieron a principios de los 30 en el nacimiento de la teoría de la computación, ver que ciertos problemas que no tenían una resolución formal podían ser abordados a través de algoritmos heurísticos computacionales. En otras palabras, vislumbró la interesante relación entre lógica y computabilidad; una relación que al positivismo lógico, de haberla seguido, le hubiera facilitado sus lazos con el descubrimiento científico. Ahora, el computacionalismo no es equivalente al programa de Simon, podemos pensar en un computacionalismo no heurístico donde haya un predominio del generar y testear sobre el análisis medio fin. Como evidencia de esto último, podemos señalar la computación evolutiva y el conexionismo. En síntesis, es posible que el cerebro humano sea un sistema no computable, o un sistema biológico sui generis que a determinado nivel torne inviable cualquier aproximación computacional. Si esto es válido, tanto al computacionalismo como a la versión de resolución de problema montado sobre el mismo, les será imposible dar cuenta de algunas de las producciones que dependen de estos procesos. No obstante, parece inevitable postular una concepción

del *insight* cuando analizamos la producción científica creativa; una que reclame una estructura que vaya más allá de lo computacional, aunque eso que parece tan sutil, particular, repentino, etc. pueda ser un producto de reglas subyacentes. Tal vez la alternativa más realista, si no queremos llegar a cuestionar más de lo que por otra parte aceptamos o caer en el cada vez más anticuado dualismo cartesiano, sea buscar una alternativa entre estos dos extremos: la incomputabilidad de Penrose y el computacionalismo racionalista de Simon. Apostar a que las diferencias cualitativas que notamos en nuestras descripciones de los actos creativos es una diferencia que tiene que ver con grados diferentes de complejidad. Donde es posible pensar que una mayor complejidad no es el producto de algo necesariamente complejo, puede serlo de reglas subyacentes muy simples. Una perspectiva interesante que recientemente ha sido propuesta como una gran revolución científica que puede cambiarnos la forma de hacer ciencia. Pero así como manifesté los riesgos de aceptar procesos físicos no computables, no quiero dejar pasar los supuestos que esta propuesta necesita para erigirse con estas pretensiones. La validez depende de que el universo sea en última instancia discreto.

***2.12. Ofrece una perspectiva donde la generación de teoría surge principalmente a partir de los datos, negando casos donde la teoría está subdeterminada por los datos.***

No es obvio que la subdeterminación pueda ser reducida a una teoría única por métodos simples de resolución de problemas. Ejemplos serían la fuerte dependencia sobre restricciones en cosmología moderna, y muchas teorías en ciencias humanas (Hesse, 1992: 34).

Pero esto no necesariamente contradice la concepción de Simon, sólo obligaría a incorporar en la simulación una gran cantidad de información, mucho más que reglas heurísticas y datos.

Una variante de esta crítica es la de Putnam a la IA, en *Mucho ruido por muy poco* (1993). Después de aclarar que la IA “no es teoría de recursión, no es teoría de las máquinas de Turing, no es la filosofía de Alan Turing” (Putnam, 1993: 307) y presentar las objeciones filosóficas más comunes a las inferencias inductivas, inevitablemente se debería incluir en la máquina el conocimiento de base, toda la información que posee un humano inductivo sofisticado (incluyendo información implícita) lo que la hace una empresa casi imposible. (Putnam, 1993: 315).

### ***2.13. El rol de las analogías no puede ser representado a través de producciones.***

Esta crítica está dirigida a poner en duda o limitar la hipótesis que el *insight* científico sea simplemente un proceso de reconocimiento a través de una base indexada de conocimiento que dispara reglas de condición-acción. Si bien es cierto que muchos descubrimientos repentinos pueden entenderse desde esta perspectiva, no parece muy plausible que esto pueda mantenerse en muchos casos. Básicamente, cómo puede usarse un reconocimiento pasado para producir o disparar otra producción que puede inclusive pertenecer a otro campo de estudio. Desde una perspectiva simbólica, lo que está contenido en una producción, es algo bastante rígido, y para cualquier agregado, combinación, o es necesaria la manipulación externa o requeriría de otros procesos que lo harían inviable con el carácter repentino de la comprensión repentina que se quiere dar cuenta.

***2.14. El rol de las imágenes en algunos descubrimientos hace limitada la idea de producciones.***

Esta crítica que ha realizado entre otros Johnson-Laird y Legrenzi (1992: 39) cuestiona la posibilidad de que los sistemas computacionales de descubrimiento puedan realizar analogías mediante arquitecturas basadas en producciones con reglas condición-acción. Estas reglas son textuales desde el punto de vista representacional y dejan de lado representaciones visuales, un elemento que puede ser clave para entender algunos tipos de *insight* creativos, como la analogía entre sistema planetario y átomos.

***2.15. Concepción de descubrimiento es válida para ciencia normal pero no para cambios revolucionarios.***

Este cuestionamiento es un derivado de la distinción entre problemas bien y mal estructurados o definidos. Como dije anteriormente, la psicología de resolución de problemas está basada casi exclusivamente sobre problemas bien definidos. Con esto quiero significar que las heurísticas son productos de experimentos sobre cómo los sujetos resuelven este tipo de problema. Dentro de los problemas bien definidos, existen algunos como el caso del ajedrez que poseen todas o la mayoría de las características para ser considerados de tal tipo y sin embargo dada la magnitud de su espacio de problema obliga a una complejidad de las estrategias resolutivas que llevaron a los pensadores de la IA a extrapolar sus resultados a áreas donde los problemas no son bien definidos. Simon se defiende de esta crítica, apelando al carácter difuso de la distinción entre bien y mal definido y sugiriendo implícitamente que si las reglas y estructura para problemas bien estructurados funciona adecuadamente a medida que los problemas van perdiendo esta característica, es posible pensar que valdrán también para todo tipo de problemas no definidos. La duda respecto a esto en todo

caso debe ser resuelta empíricamente en tanto no haya algún tipo de imposibilidad conceptual que justifique una diferencia cualitativa entre los dos tipos de problemas. Esta estrategia ya fue presentada anteriormente a propósito de la evolución histórica del concepto de resolución de problemas, la idea que se pueden abordar problemas que inclusive no merezcan un tratamiento formal mediante reglas que mostraron ser exitosas en la resolución de problemas simples. En otras palabras, que se pueden abordar problemas complejos mediante reglas derivadas de problemas simples.

Cabe aclarar que la distinción entre problemas bien y mal definidos no es la única vertiente que pone en duda la aplicabilidad de la concepción de Simon a la ciencia revolucionaria. Como expresé anteriormente, las implicancias y generación de cambios taxonómicos no pueden ser abordadas desde una perspectiva computacional basada en procesamiento de información.

Otro factor a destacar en este punto es la dificultad de reconstruir descubrimientos que presupongan que los procesos de descubrimientos claves se produjeron a un nivel teórico inaccesible externamente. En otras palabras, que el modelo Simon sólo sirve para explicar o reproducir descubrimientos científicos en los comienzos de una disciplina, cuando los datos juegan un papel central. La casi inexistencia de modelos computacionales, o de análisis desde la teoría de resolución de problemas de este tipo de descubrimiento es una evidencia de la dificultad planteada.

### ***2.16. Diluye más que fundamenta una lógica del descubrimiento***

Tomando palabras de Putnam, hablar de una lógica del descubrimiento en el contexto de los propósitos de la IA es presentar un “programa maestro” como el que brindó la lógica deductiva, donde se ha

descubierto un conjunto de reglas que formalizan satisfactoriamente la inferencia válida. (Putnam, 1993: 310). Esto no pasó en la lógica inductiva y por ende tampoco pasará en la lógica del descubrimiento. Veamos algunas de las dificultades,

1. Qué cantidad de predicciones confirman una teoría
2. Cómo se incorporan a programas restricciones estéticas o la noción de simplicidad.
3. La relación entre confirmación y conocimiento de base en cuanto a qué debe modificarse en caso de desajuste.
4. Como hacemos para justificar dentro de estos contexto el diferente peso que le damos a inferencias estadísticas en diferentes contextos.
5. Existencia de inducciones conflictivas tales como el ejemplo de Nelson Goodman: en la medida que yo sé, nadie que haya ingresado al Emerson May en la Universidad de Harvard ha sido capaz de hablar lengua inuit. La no aceptación de inducciones como ésta hace que debamos incorporar nuevamente el conocimiento de base.

Pero, supongamos que en un futuro todo esto puede hacerse, es decir, incorporar conocimiento de base interrogando a expertos, leyendo sus notas de laboratorio, trabajos, etc. estaríamos entonces ante un programa maestro o volveríamos a estudios psicológicos-históricos del descubrimiento que deberíamos continuamente revisar a medida que pretendamos incorporar nuevos descubrimiento o nuevas áreas.

En otras palabras, a medida que Simon va respondiendo a las objeciones ¿no se ve obligado a caer inevitablemente en una psicología del descubrimiento? Es cierto que lo mismo podríamos decir de la relación entre historia de la ciencia y filosofía, a medida que vamos respondiendo a las críticas del positivismo lógico y sus derivados no abandonamos la filosofía de la ciencia propiamente dicha y hacemos a esta actividad filosófica parasitaria de la ciencia y de su historia.

## VII.

### **Consideraciones finales y conclusiones**

A lo largo de este trabajo intenté presentar qué significa sostener que el descubrimiento científico es resolución de problemas en el programa de Simon y otros programas que comparten esta estructura común. Muchos filósofos (Popper, Laudan, Nickles, Hattiangadi) han sostenido que la actividad científica es resolución de problema aunque con una definición de lo que es un problema y su resolución que tiene distintos significados para una evaluación filosófica y metodológica del descubrimiento en todas sus variantes. Como queda manifiesto en la estructura de la tesis, elegí como paso previo a cualquier otra consideración, definir los conceptos más importantes que componen las diferentes versiones de que la actividad científica en general, y el descubrimiento en particular, es resolución de problema. Con estas definiciones, y sometiendo a cada modelo a las consecuencias de sus supuestos, intenté establecer un marco general para que cuestiones nuevas y tradicionales sobre el descubrimiento puedan debatirse fructíferamente. Es así, que la tradicional discusión de la racionalidad o irracionalidad del descubrimiento fue redefinida en términos de

computabilidad-incomputabilidad, complejidad-simplicidad y algorítmico-no algorítmico. También se sigue, que en los distintos modelos estos conceptos pueden usarse tanto a nivel abstracto como a nivel práctico, generando epistemologías del descubrimiento empírica o abstractas. Desde el lado de la filosofía general de la ciencia mostré la vacuidad de sostener una perspectiva de la ciencia basada en problemas que no considere que unas de las ventajas de tal noción es su poder de unificar descubrimiento con justificación. No debemos solamente aceptar como básica la noción de problema por su conexión con el sentido común, sino por su poder unificante de todo lo que ocurre en la actividad científica. Sin negar que la historia de la ciencia es una fuente ineludible para estudiar problemas y resoluciones de problemas, he argumentado a través de ejemplos cómo la ciencia de la computación, la psicología cognitiva experimental, la inteligencia artificial son fuentes importantes para estudiar estas nociones, con ventajas que no brinda la historia de la ciencia. Las consecuencias del teorema “No Free Lunch” que presenté son un ejemplo concreto de lo que puede hacerse en esta dirección.

Otro aspecto que no quiero dejar de destacar en estas consideraciones finales, es que la que denominé hipótesis computacional ha cambiado el modo de considerar muchas de las inferencias asociadas a al descubrimiento o a fases indiscernibles de descubrimiento-justificación. Esto ha afectado no sólo al descubrimiento, sino también como sugerí con las referencias a los experimentos de Bailey, a la justificación. La justificación mediante datos simulados es otra categoría que bien podría usarse como defensa de las críticas que sostienen que los programas computacionales no dicen nada nuevo respecto a temas tradicionales como el problema de la inducción. Pero a estas ideas no hay que pensarlas en términos instrumentales, también mostré que esto se puede dar a un nivel abstracto como en el caso del teorema “No free Lunch”, donde se evaluó la confiabilidad *a priori* de todos los métodos cuando no se tiene información sobre la estructura del problema.

Luego de estas conclusiones generales que enmarcan lo que considero debe tenerse en cuenta cuando tratamos de evaluar modelos de descubrimiento científico, paso a enunciar las principales conclusiones sobre lo que fue el tema central: las limitaciones del programa de descubrimiento científico como resolución de problemas:

En primer lugar, el concepto de problema de Simon presenta algunas ventajas sobre modelos alternativos, como por ejemplo sobre el modelo de inclusión-restricción de Nickles. Sin embargo, la caracterización de Simon parece muy general y falta de especificaciones para abordar problemas científicos complejos. Es un concepto de problema que no tiene en cuenta la existencia de problemas conceptuales, quedando muy ligado a simple ajuste entre fórmula y datos.

El de Simon tampoco es un concepto de problema cuyas especificaciones habiliten mecanismo de evaluación o comparación de grupos, tradiciones o programas de investigación. No da cuenta de este aspecto esencial de la dinámica de la ciencia. En este sentido, el modelo contextual de problema de Meheus y Battens parece un buen candidato para mejorar estas falencias porque, a diferencia del modelo de inclusión-restricción de Nickles, está orientado a dar cuenta de la racionalidad de todo el contexto de descubrimiento. Su único inconveniente es que al igual que el modelo de Nickles incluye el nivel heurístico-metodológico en la propia definición de problema.

A lo largo de las exposiciones sobre el concepto de problema quedó como una preocupación filosófica lograr un concepto que fuera objetivo y no tan contaminado psicológicamente. La importancia de esta exigencia vale también para modelos de resolución de problema que intentan servir tanto a sistemas orgánicos (humano y no humanos) como no orgánicos (computadoras). Si bien el concepto de problema de Newell y Simon va en esta dirección, al ser definido en términos de conocimiento sobre operadores para pasar de una información inicial a una información objetivo, sigue contaminado por la idea de problema como obstáculo a superar. Las propuestas filosóficas de problemas como

inconsistencias son una salida válida a cierto nivel, pero no para una teoría general de resolución de problema.

Respecto a la noción de resolución de problemas, mostré que el programa de Simon exhibe limitaciones para dar cuenta de algunas resoluciones humanas de problema que pueden ejemplificarse a través del problema del viajante de comercio. Su idea de que toda resolución es producto de procesos seriales guiados por operadores cuya decisión se nutre de información próxima ha sido cuestionada por estudios que muestran procesamientos espaciales globales sobre dichos problemas. Catalogamos a estas formas de resolución como gestáltica para identificarla con modelos clásicos de resolución de problema aunque se reconoce que podrían ser compatibles con otros modelos.

La existencia de modos globales e instantáneos de resolución de problemas tiene consecuencias importantes sobre la teoría o programa de Simon. Cuestiona unos de los pilares de su programa, aquel que sostiene que el *insight*, y por ende la creatividad, es producto de reconocimiento a través de información indexada. También cuestiona la concepción que se tenía de que la complejidad del problema está sólo en función del tamaño del espacio del problema y no en la distribución espacial del mismo. Muestra que en muchos casos la dificultad en la resolución de un problema puede deberse a aspectos cualitativos de la representación del problema, cuestión que ha sido por otra parte considerada central en la caracterización de problemas mal definidos y mal estructurados.

La idea de espacio es tal vez uno de los aspectos más interesantes de este modelo de resolución de problemas. Lamentablemente los trabajos sobre estos espacios son más psicológicos que históricos. La idea de un espacio externo merece más tratamiento porque jerarquiza los instrumentos como posibles productores de descubrimientos, dado que cada vez se reconoce más que éstos tienen una influencia que va más allá de la producción de datos. Advertí también que la extensión de los espacios a espacio de experimentos y espacio instrumentos puede llegar a

cuestionar algunos de los principios de la teoría de Simon de descubrimiento científico como resolución de problemas.

La distinción entre problemas mal estructurados o mal definidos y problemas bien estructurados es un inconveniente serio para la teoría de Simon. Su salida consiste en usar los métodos de los bien estructurados para los mal estructurados. Sin embargo, al ser su diferencia sólo un problema de complejidad, no parece haber superado las críticas tanto en relación al descubrimiento científico como a la enseñanza. La hipótesis que ciertos problemas mal estructurados pueden ser abordados como diseño más que como búsqueda parece más plausible, máxime cuando ampliamos el espacio de problema a experimentos e instrumentos.

El problema de representación y sus cambios sigue siendo el talón de Aquiles del modelo de resolución de problemas de Newell y Simon. Ellos no han mostrado a lo largo de su obra que los cambios de representación puedan entenderse desde su teoría de resolución de problemas. La generación de representaciones adecuadas a distintos contextos no puede derivarse completamente de los cuatro principios que caracterizan a la noción de problemas (búsqueda selectiva, heurísticas generales y específicas, heurística medio-fin, y efectividad de la resolución a través de procesos de reconocimiento). En primer lugar, por la inflexibilidad de la arquitectura sobre la cual están contruidos y, en segundo lugar, porque requeriría como principio extra la detección autónoma de patrones.

El concepto de heurística presenta también las dificultades planteadas al concepto de resolución de problemas; pero sobre esta noción se puede ver más claramente como colisionan las categorías de algorítmico y no algorítmico. El análisis de heurísticas no algorítmicas o heurística en instrumentos, es una confirmación de los dos conceptos

antagónicos de resolución de problemas que se fueron desarrollando a través de todas las temáticas tratadas. Pero sin negar que una independencia del concepto de heurística del concepto de algoritmo pueda encontrarse en el cuestionamiento de Roger Penrose, aquel que sostiene que la física es no algorítmica. Argumenté a favor de una alternativa menos radical aunque muy ligada a estos estudios, como la idea de heurísticas como información espacial o con base visual. La apuesta en este sentido pasará por considerar que las heurísticas en instrumentos tienen más base analógica que digital.

El problema de la inducción no parece perjudicar el programa que nos ocupa, aunque son válidas las objeciones que se le han hecho de que su definición de descubrimiento, acotada a descripción económica, entra en contradicción con la idea de descubrimiento que tienen los programas computacionales más recientes que hacen inducciones. No afecta a la tesis del descubrimiento científico como resolución de problemas abandonar esa noción de descubrimiento; sólo afecta su relevancia filosófica sobre filosofías que no tienen en cuenta nuevas formas de entender la relación entre computación e inducción.

Las observaciones de Petroni (1992) de la inevitabilidad de las inducciones en el programa KEKADA no parecen afectar la hipótesis de Simon. Es cierto que hay una contradicción entre el tipo de descubrimiento que hace el KEKADA y su defensa de que descubrir no significa predecir que lo obtenido seguirá valiendo más allá de los datos que se usaron para generar dicho descubrimiento. Esta defensa estuvo motivada en dar una versión del descubrimiento que no fuera rechazada filosóficamente. No afecta la tesis del descubrimiento científico como resolución de problemas abandonar la noción de descubrimiento como codificación económica de una serie de datos. Tampoco necesita caer en una epistemología naturalizada puramente descriptiva. Podemos derivar su normatividad dentro del naturalismo logizado de Kelly, argumentando que esas objeciones siguen atadas a una concepción empirista de los

problemas y su resolución donde el dato simulado o abstracto no tiene un rol importante.

Descubrimiento es también formular problemas y esto no surge de la teoría considerada en la versión de Simon. Su respuesta que no hay ningún premio Nobel al que se le haya dado el premio por formular problemas no constituye una respuesta adecuada.

El rol de las analogías en muchos descubrimientos y su irreductibilidad en muchos casos a una formulación de tipo simbólica es otra de las limitaciones importantes. Como dicen los críticos, no es claro cómo los sistemas de producciones que estructuran sus programas pueden dispararse ante información análoga. Esta limitación depende en gran medida de problema de la representación o más precisamente de la representación de tipo visual.

La ciencia de la complejidad puede aportar elementos importantes a la teoría de Simon, a través de programas que profundicen la generación de complejidades con reglas simples, como autómatas celulares, algoritmos genéticos, programación genética y computación por ADN. En este sentido, he ofrecido argumentos que muestran la compatibilidad de estos programas con el núcleo de la teoría de Simon, su hipótesis que por sobre todas las cosas el descubrimiento es cómputo de algún tipo. La aproximación histórica al concepto de resolución de problema que presenté estuvo orientada a mostrar en el fondo esa es su respuesta original, haber enfrentado a la complejidad con reglas simples. Mi interpretación es que la insistencia en la resolución de problemas por búsqueda heurística es lo que lo expone a las críticas presentadas. Esta insistencia tiene un trasfondo ideológico, no abandonar la idea de que no hay diferencias entre el hombre común y el genio al nivel de las estrategias resolutivas.

Los teoremas “no free lunch” no constituyen una limitación a la teoría en relación a teorías rivales. Las objeciones que realicé a la interpretación de Nickles, que privilegia una concepción evolucionista del descubrimiento, van en esta dirección. No obstante, creo que es un tópico que merece más tratamiento, principalmente mi argumento de que en sí mismos estos teoremas constituyen una lógica del descubrimiento en sentido fuerte, una lógica del descubrimiento *a priori*.

Respecto a los programas computacionales, centro de las principales críticas a la hipótesis considerada, argumenté que no brindaron todo lo que se esperaba. Sin embargo, brindaron más de lo que le conceden sus críticos. Afirmé también que la construcción de dichos programas ha excedido a la IA clásica y hace difícil tener un panorama de lo que verdaderamente se está haciendo en este momento. Rescato como paradigmático de esta tendencia los resultados logrados en *Experimentation in Mathematics: Computational Paths to Discovery* (Bailey & Girgensohn, 2003); *A New Kind of Science* (Wolfram, 2002)

La noción de descubrimiento como exposición y generación que presenté a través de Kantorovich mostró tener la virtud de ofrecer una estructura para vincular a esta noción con la de creatividad e innovación; pero mostró serias limitaciones para captar la dimensión expositiva y generativa de los productos de las simulaciones y prácticas experimentales.

No hay una convergencia de las distintas aproximaciones al descubrimiento como pretende Simon y los colegas que comparten su teoría. Mostré que en los mismos ejemplos que Simon y Klahr presentan, hay evidencias en este sentido. Principalmente por el problema de representación y sus cambios, y por el rol de las analogías. La

convergencia puede verse, sin embargo, en la noción de espacio de problema y en las extensiones que el concepto de espacio puede tener.

El punto central de las limitaciones de la perspectiva que ve al descubrimiento como resolución de problemas en su dimensión filosófica está en el capítulo sobre heurísticas. Es sobre este concepto que se marcan las deficiencias más importantes por la importancia que ha ido tomando esta noción en la filosofía actual de la ciencia. Mi argumentación a favor de heurísticas no algorítmicas intentó mostrar que esas deficiencias se dan hasta para abordar cuestiones muy básicas de las prácticas científicas.

En relación a problemas bien o mal definidos dentro de problemas resolubles simbólicamente, no parece haber limitaciones para pensar que las heurísticas y los algoritmos para resolver problemas bien definidos puedan llegar a resolver problemas mal definidos, dado probables mejoramientos en su formulación, contextualización e implementación en nuevos *hardware*.

Los sistemas automatizados no apoyan una única forma tradicional de inferencias, más bien son programas donde confluyen una variedad de inferencias, tales como inferencias deductivas, inductivas, bootstrap, abductivas. Como dije más arriba el aporte al problema de la inducción está a otro nivel.

Las limitaciones presentadas para el programa de Simon no deben llevarle al lector a una valoración negativa de este programa. Muy por el contrario, es un programa que con una idea muy simple logró dar cuenta de muchos aspectos de la cognición humana, desde la toma de decisiones administrativa, la enseñanza de la ciencia, el diseño, hasta el tema que nos ocupa: descubrimiento científico. La idea de que el

descubrimiento científico es resolución de problema por búsqueda heurística en un espacio simbólicamente representado tiene como lo he señalado precedentemente numerosas limitaciones, pero no tenemos todavía una teoría del descubrimiento que tenga la generalidad y la fertilidad que tiene esta.

# Apéndice 1:

## Los experimentos sobre el problema del viajante

### 1. Los experimentos de Ormerod - MacGregor

MacGregor y Ormerod (1996) (Ormerod & Chronicle, 1999) realizaron estudios psicológicos sobre el rendimiento humano en la solución del problema del viajante y ofrecieron evidencias de que la complejidad del problema no surge únicamente de la cantidad de nodos sino de la cantidad de puntos interiores.

Los experimentos que se hicieron tuvieron como objetivo de medir la calidad de las soluciones humanas frente a las computacionales, además de determinar que el rendimiento humano no depende tanto de la cantidad de puntos sino de la cantidad de puntos no interiores. Esto último se hizo comparando los resultados de los sujetos experimentales con tres procedimientos heurísticos: algoritmo del vecino más cercano, algoritmo de ángulo interior más grande y una variación de la heurística “convex hull” usando un criterio de heurística de inserción más económico o barato. La gente usa una envoltura convexa como parte de la estrategia para resolver el problema del viajante, la envoltura convexa de un conjunto de puntos en el plano es el polígono convexo más

pequeño que cierra todos los puntos en el conjunto. Estas tres reglas fueron elegidas porque podían ser usadas también por humanos (MacGregor & Ormerod, 1996).

### Experimento 1

Sujetos: Se seleccionaron 58 sujetos que eran estudiantes de la “Louoghborough University of Technology”

Materiales: se generaron 6 problemas del viajante con 10 puntos, con la cantidad de número interiores variando de 1 a 6.

Resultados: 10 sujetos dejaron uno o más problemas incompletos fracasando en la incorporación de 1 o más puntos y estos casos fueron excluidos del análisis. 3 protocolos completados fueron excluidos del análisis. Los tiempos necesarios para que los sujetos completaran el problema variaron de 6 a 25 minutos, con un promedio de 13 minutos.

Números de puntos interiores	Óptimo	Mínimo sujeto	Vecino más próximo mínimo	Angulo más amplio	Criterio de inserción más económico	Media sujeto	Vecino más próximo media
1	530.89	0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0
2	566.22	0	0.0	0.0	0.0	3.5	0.0
3	559.55	0	0.0	5.3	2.1	2.8	6.6
4	558.15	0	0.0	11.5	2.4	3.8	10.0
5	528.15	0	4.0	6.1	1.0	3.0	9.1
6	528.51	0	5.9	2.9	0.0	3.8	10.0
Dantzig	758.66	0	0.6	3.0	2.7	3.8	10.4

Mínimo sujeto representa el mejor rendimiento humano medido como el porcentaje mínimo sobre el óptimo. La media sujeto representa la media de todos los sujetos en relación al óptimo. Dantzig es un algoritmo que soluciona el problema.

### Experimento 2

El segundo experimento contó con 29 sujetos y los problemas tenían 20 nodos.

Resultados: longitud mínima de caminos observados y porcentaje sobre el mínimo para resolución humana y heurística.

Números de puntos interiores	Óptimo	Mínimo sujeto	Vecino más próximo mínimo	Angulo más amplio	Criterio de inserción más económico	Media sujeto	Vecino más próximo media
4	703.81	3.0	4.1	3.1	2.5	5.4	8.4
6	703.89	1.2	1.2	20.1	5.3	7.3	8.8
8	725.31	1.7	3.3	13.7	5.8	5.2	9.4
10	698.83	1.4	0	6.0	4.8	3.3	9.5
12	688.33	0.6	0	23.4	3.6	4.6	7.1
14	663.61	1.9	1.5	10.0	4.4	9.6	15.4
16	593.81	1.0	15.0	0.8	0.05	8.5	21.7

Como puede apreciarse en una comparación entre las dos tablas, el rendimiento de los sujetos experimentales y su comparación con los métodos heurísticos difieren entre los dos experimentos. Se puede observar que a pesar de ser positiva la relación entre puntos interiores y complejidad del problema, las correlaciones del experimento 2 son más débiles que la del experimento 1. Para los autores, esta diferencia no disminuye la corroboración del experimento 2 respecto al 1.

El modo espacial de presentar el problema del viajante a los sujetos humanos parece crítico respecto al rendimiento logrado y las formas no espaciales de presentación probablemente no produzcan el misma calidad de las soluciones (MacGregor & Ormerod, 1996: 536).

El rol que tiene la información espacialmente representada podría sugerir que estamos ante casos de resolución de problema por visualización directa.

En síntesis, a partir de estos experimentos llegan a la conclusión de que los sujetos logran las soluciones por la percepción de propiedades globales y espaciales del problema. Experimentos realizados con anterioridad que muestran que los sujetos distinguen entre el 90 y 100% de las soluciones óptimas para problemas de 10 nodos en lapsos temporales menor a 2 segundos. (MacGregor & Ormerod, 1996: 536).

Estos resultados siguen siendo significativos para problemas con más nodos. Como referencia citan al trabajo de Lee (1985) que sostiene

que la correlación se sigue manteniendo para problemas con 60 nodos o ciudades.

Dos años después de los trabajos antes citados, publican dos trabajos sobre el mismo tema donde siguen verificando los resultados obtenidos en los dos primeros experimentos (Ormerod & Chronicle, 1999) (MacGregor, Ormerod & Chronicle, 1999). No obstante como dato curioso, no van a proponer un experimento que sobrepase en cantidad de nodos a los experimentos de Lee. El número máximo que consideran en sus experimentos es 48 nodos o ciudades.

En *Global Perceptual Processing in Problem Solving* (Ormerod & Chronicle, 1999) el experimento 1 mostró una clara relación entre la optimización de la solución del problema del viajante y juicios de buena figura: se percibieron como mejores figuras las rutas más óptimas.

En los experimento 2 y 3, los participantes rápida y confiablemente identificaron soluciones óptimas y rechazaron las de baja optimización, juicios con soluciones óptimas intermedias tomaron mayor cantidad de tiempo y fueron menos precisos. El experimento 3 demostró también que la habilidad de los participantes para hacer estos juicios dentro de los dos segundos y que la habilidad de diferenciar confiablemente entre niveles de optimización en tan breve fracción de tiempo es sugerencia de procesamiento global-perceptual (Ormerod & Chronicle, 1999: 1236).

En síntesis, lo que estas series de experimentos muestran es que para el problema del viajante y a cierto nivel de instancias del mismo, es posible que el ser humano use estrategias distintas a las sugeridas por la teoría clásica de resolución de problemas basadas en reglas heurísticas locales. Apoyarían una psicología de la resolución de problemas y del descubrimiento al estilo gestáltico, basada en reconocimiento no gradual de patrones. Contradicen también la salida que Simon y Newell encontraron al problema del *insight* en la creatividad científica. De acuerdo a estos resultados, no pueden reducirse estos casos a gran

cantidad de conocimientos indexados, constituyendo evidencias que estamos ante una cognición perceptual-espacial.

## 2. Los experimentos de Simon

Simon responde a los desafíos planteados por Ormerod, Chronicle y Mc Gregor en *Simulating human performance on the traveling salesman problem* (Best & Simon, 2000). En este trabajo, hacen una serie de experimentos donde muestran que combinando estrategias globales que ofrecen un plan general junto con estrategias locales en resolución mediante computadoras puede lograrse un rendimiento igual al de los seres humanos. Además afirman que la admisión de estrategias locales es inevitable si se quieren explicar las demoras como función lineal del tamaño del problema. Los resultados coinciden además con los resultados de Graham, Joshi y Pizlo (Graham, Joshi & Pizlo, 2000). Ellos mostraron que el tiempo requerido por los humanos para resolver el problema del viajante es una función lineal del tamaño del problema.

Al respecto realizan tres experimentos. Con el primer experimento, determinaron que uniendo los nodos con *mouse* en una pantalla y sin la posibilidad de regresar una vez realizado uno de los caminos, los resultados no varían notablemente a los experimentos realizados por MacGregor y Ormerod. En el segundo experimento, clasifican a 9 sujetos por su rendimiento en buenos (menos del 3% desviación promedio de la longitud del camino óptimo), sujetos correctos (más del 3% y menos del 10%) y pobres (menos del 1%). Estos últimos (1 caso) son excluidos para el experimento posterior. El experimento 2 da los siguientes resultados: los sujetos experimentales buenos y correctos tienen distribución de latencia solapada. Los sujetos buenos tienen como promedio 23.8 segundos mientras que los correctos les tomaron 22.8 segundos (Best & Simon, 2000: 44)

Este experimento se realiza en dos condiciones diferentes, con la alternativa de que los sujetos experimentales elijan el punto de comienzo o con el punto de comienzo ya dado. Esta diferencia hace que para el primer caso, el primer movimiento tome 2306 ms y los otros entre 797 a 997 ms. Con el punto de comienzo preasignado los sujetos demoraron 1892ms para hacer su primer movimiento, demorando 1554ms para realizar el segundo movimiento. Los restantes demoraron entre 964ms y 705ms (Best & Simon, 2000: 45). La demora en los dos primeros movimientos bajo ambas condiciones indica que los sujetos podrían planificar estrategias de solución global.

Resultados de los experimentos de Best et al.: Las heurísticas locales como Vecino más próximo implementadas en computadoras predicen el 80% de los movimientos de los sujetos, pero son más pobres en rendimiento que el obtenido por los sujetos humanos. Cuando se le agrega estrategias globales (identificar el centro de masa de todos los puntos del problema) se llega a predecir un 93% de los movimientos de los sujetos y su rendimiento es muy cercano al de los humanos.

Una vez que se han hecho los dos primeros movimientos, el resto es una función lineal del número de puntos en el problema.

## Apéndice 2:

### Sistemas computacionales de descubrimiento

#### *1. Los Sistemas de Descubrimiento BACON*

Los sistemas BACON (Langley, et al., 1987), (Langley, Bradshaw & Simon, 1981), (Langley, 1979 1), (Langley & Zytkow, 1989) ,(Bradshaw, Langley & Simon, 1980) son una serie de programas de descubrimiento que, como ya dije, continuaron y mejoraron la estructura del sistema de Gerwin. Los mejoramientos redundaron en la posibilidad de incluir más variables y de poder ser aplicados a un rango mayor de descubrimientos numéricos. Se han transformado en una referencia ineludible como ejemplos de descubrimiento automatizado y como emblemáticos de lo que se considera la IA fuerte. El impacto de sus resultados tiene que ver con haber mostrado que las reglas para producir descubrimientos históricos importantes como, por ejemplo, la tercera ley de Kepler, son sumamente simples. Es decir, que la complejidad de algunos descubrimientos es producto de reglas muy simples, reglas que inclusive usan personas no creativas ante las mismas circunstancias. Como era de esperar, tal desafío a lo que podemos considerar la concepción heredada o precomputacional de la creatividad no tardó en producir un sinnúmero de críticas. Es una referencia casi obligada en cualquier texto de creatividad o estudio filosófico general

sobre el descubrimiento. Es importante señalar también que la mayoría de las veces las referencias son críticas, señalando que la significatividad que le dan sus autores no es tal, que sólo simulan una parte, y no la más importante, de los descubrimientos que simulan. Comenzaré haciendo una breve descripción de estos programas, señalando algunas implicancias posibles sobre cuestiones filosóficas y metodológicas.

*a) BACON.1*

Constaba de tres heurísticas:

**CRECIENTE**

SI los valores de X incrementan como los valores de Y incrementan, ENTONCES defina la razón  $X/Y$  y examine sus valores.

**DECRECIENTE**

SI los valores de X incrementan como los valores de Y decrecen, ENTONCES defina el producto  $XY$  y examine los valores.

**CONSTANTE**

SI los valores de X están próximos a ser constantes para un número de valores, ENTONCES hipotetice que X tiene siempre este valor.

Con estas tres heurísticas el programa puede producir, a partir de los datos relevantes, el descubrimiento de la tercera ley de Kepler. Para esto, el programa toma dos columnas de datos que contienen la distancia del planeta al sol (D) y la otra que contiene los períodos de revolución alrededor del sol (P).

Planeta	D	P
Mercurio	0.387	87.97
Venus	0.723	224.7
Marte	1.524	686.98

**Tabla 1**

A partir de los mismos, como puede apreciarse comparando las dos columnas de la Tabla 1, D crece y P crece con lo cual se aplica la heurística CRECIENTE que indica la producción de un nuevo término  $D/P$ . Asignando a D y P los valores de la tabla de arriba y haciendo la operación indicada se obtienen los valores de la tercer columna de la tabla 2. Estos nuevos valores obtenidos son decrecientes mientras que D y P son crecientes. En principio caen tanto la relación D y  $D/P$  como P y  $D/P$  con la heurística DECRECIENTE. Pero, de aplicarse esta heurística a P y  $D/P$  se llegaría nuevamente a D por estar P tanto en el numerador como en el denominador. Por lo tanto, sólo quedaría en este ciclo aplicarse a D y  $D/P$  que implicaría tomar el producto  $D \cdot D/P$  y producir finalmente el término  $D^2/P$ . Calculando los valores de este nuevo término para cada planeta, los valores obtenidos son crecientes, cuestión que dispara la heurística DECRECIENTE con los valores obtenidos con el término anteriormente generados  $D/P$ . Esto lleva a que se tome la razón entre los mismos, quedando como tercer término generado,  $D^3/P^2$ . Al calcular estos valores, da para los tres planetas valores casi constantes con lo cual el programa para y establece que el último término generado es una ley.

Planeta	D	P	D/P	D2/P	D3/P2
Mercurio	0.387	87.97	0.004399	0.001702	7.48969 E-06
Venus	0.723	224.7	0.003217	0.002326	7.48529 E-06
Marte	1.524	686.98	0.002218	0.003380	7.50009 E-06

Tabla 2

- o Input : acepta un conjunto de términos independientes y requiere los valores correspondientes a término dependiente
  - λ e.g. P, T, N (términos independientes) - V(términos dependientes)
- o Output : genera 3 estructuras interrelacionadas.
  - λ Un conjunto de leyes numéricas – constantes simples o relación lineal, e.g.  $X = 8.32$ ,  $U = 1.57V + 4.6$
  - λ Un conjunto de definiciones que relaciones los términos teóricos con las variables directamente observables.
  - λ Un conjunto de propiedades intrínsecas (e.g. masa, calor) específico que toma valores numéricos.

### b) BACON.2

Agrega a las heurísticas del BACON.1, reglas que permiten trabajar sobre secuencias de letras. Para esto necesita no sólo generar términos como el BACON.1, sino también determinar en los sucesivos pasos que la descripción lograda predice la posición exacta de la letra en la secuencia extrapolada.

### c) BACON.3

Entre los logros más importante de este sistema está que puede obtener la ley del gas ideal. Esta ley no es posible obtenerla con las

heurísticas del BACON.1, a pesar de que las heurísticas del BACON.1 forman también parte del BACON.3. La ley puede ser presentada como

$PV/nT=R$  ( $P$ =presión,  $V$ =volumen,  $T$ =temperatura y  $n$ =cantidad de gas,  $R$ =constante). Esta ley se puede generar con el BACON.3 a partir de los datos y reglas que se dan a continuación.

Los términos independientes usados son  $P$  la presión,  $T$  la temperatura del gas en grados Celsius y  $N$  la cantidad de gas. El término dependiente es  $V$ , el volumen del gas.

A diferencia del BACON.1 el sistema busca leyes en cada nivel de su búsqueda. Por ejemplo para los valores ( $N=1, T=10, P=1,000$ ), ( $N=1, T=10, P=2,000$ ) y ( $N=1, T=10, P=3,000$ ) registra los valores de  $V$ . Una vez que los valores de  $V$  han sido ingresados, BACON.3 busca leyes entre los valores registrados. Notar que mientras que  $P$  crece  $V$  crece también. Esto dispara la heurística CRECER y define un nuevo término  $a$  que es producto de  $PV$ . Una vez que se asignan esos valores del término  $a$ , como da valores constantes el sistema registra esto para futuros usos, almacena el valor de  $a$  para  $N=1$  y  $T=10$ . Hace lo mismo con  $T=20$  y  $T=30$  detectando las respectivas leyes relacionadas a  $a$ . Al igual que con la ley anterior se registran estos valores asociados a los de  $N$  y de  $T$ .

Moles ( $N$ )	Temperatura ( $T$ )	Presión ( $P$ )	Volumen ( $V$ )	$a=PV$
1	10	1,000	2.354	2,354
1	10	2,000	1.177	2,354
1	10	3,000	0.785	2,354
1	20	1,000	2.438	2,348
1	20	2,000	1.218	2,348
1	20	3,000	0.813	2,348
1	30	1,000	2.521	2,521
1	30	2,000	1.265	2,521
1	30	3,000	0.840	2,521

**Tabla 3**

Esto queda reflejado en la Tabla 4 donde se transcriben los valores obtenidos para  $a=PV$ , para  $N=1$  y las tres temperaturas consideradas (las tres primeras filas). El sistema detecta con la heurística LINEAL una relación lineal entre  $a$  y  $T$  con  $b=8.32$  y  $c=2,271.4$ .

Se recaban más datos para  $N=2$  y se realiza el mismo procedimiento que para  $N=1$ . En este ejemplo se sigue hasta  $N=3$  con los valores registrados en la Tabla 3.

Moles (N)	Temperatura (T)	a=PV	b	c
1	10	2,354	8.32	2,271.4
1	10	2,354	8.32	2,271.4
1	10	2,354	8.32	2,271.4
2	20	2,348	16.64	4,542.7
2	20	2,348	16.64	4,542.7
2	20	2,348	16.64	4,542.7
3	30	2,521	24.96	6,814.1
3	30	2,521	24.96	6,814.1
3	30	2,521	24.96	6,814.1

**Tabla 4**

El sistema cuenta en este estado con tres valores para N y tres valores asociados de b y de c como puede verse en la Tabla 5. Tomando los valores constantes para cada valor de n se puede simplificar del siguiente modo:

Moles (N)	b	c	d=b/N	E=c/N
1	8.32	2,271.4	8.32	2,271.4
2	16.64	4,542.7	8.32	2,271.4
3	24.96	6,814.1	8.32	2,271.4

**Tabla 5**

Para cada término independiente busca una ley obteniendo:  $b=dN$  y  $c=eN$ , en el que  $d=8.32$  y  $e=2,271.4$ . Estos dos valores parámetros, que son almacenados en el estadio inicial, representan parámetros invariantes que no dependen de algún término independiente.

Sustituyendo los valores por la fórmula encontrada en cada nivel, se obtiene

$PV=8.32+2,27.4N$  o  $PV=8.32N(T+273)$ , que es la ley del gas ideal.

La diferencia con el BACON.1 es que permite varios niveles de descripción. Las regularidades en un nivel de descripción llevan a la creación de regularidades en un nivel más alto (Langley, 1979 1: 505). En otras palabras, admiten la aplicación repetida y parcial de la regla CONSTANTE. En el BACON.1 sólo una vez es usada esta heurística cuya satisfacción hace parar el programa y sugerir que el término que la produjo es una ley. Langley considera que esto permitiría afirmar que hay una relación diferente entre datos e hipótesis en ambos sistemas. Mientras que el BACON.1 marca muy claramente la diferencia entre las dos, en el BACON.3 tal distinción queda diluida. Otra diferencia son las heurísticas que permiten al BACON.3 variar distintos términos independientes secuencialmente.

Leyes descubiertas por el BACON.3

Ley del Gas ideal:  $PV/nT=k_1$

Ley de Coulomb:  $Fd^2/q_1q_2=k_4$

Ley de Galileo:  $dP^2/Lt^2=k_5$

Ley de Ohm:  $Td^2/(lc-k_6c)=k_7$

#### ***d) BACON.4***

Mientras que BACON.3 puede incluir variables que toman valores simbólicos en leyes, estas variables sólo pueden ser usadas en aquel sistema como condiciones que restringen el ámbito de las leyes numéricas. BACON.4 puede moverse más allá haciendo hipótesis sobre una propiedad numérica de una variable simbólica o nominal al asociar una constante numérica apropiada con cada valor nominal y usando estas constantes numéricas para descubrir una ley más general que incluya esta propiedad. (Bradshaw, Langley & Simon, 1980: 19). En otras palabras,

las heurísticas de BACON.1-BACON.3 pueden descubrir leyes que relacionen términos numéricos, pero no pueden dar cuenta de casos donde hay atributos que no son numéricos, es decir, que son simbólicos o nominales. En la ley de Black se puede combinar agua con agua, agua con mercurio, y así sucesivamente. La variación de sustancias produce cambios en los valores de parámetros en distintas leyes. Tales cambios de valores simbólicos (distintas sustancias) no pueden ser ingresados directamente en un sistema como los BACON.1-BACON.3; es precisamente esto lo que permite hacer el BACON.4.

A este programa se le agregan tres producciones más que al BACON.3, siendo la más importante la siguiente:

Si  $v_2$  es una variable nominal independiente y si los valores de la variable dependiente numérica  $v_1$  cambian como cambian los valores de  $v_2$ ,

Entonces proponga una propiedad intrínseca asociada con  $v_2$  y con las variables cuyos valores puede ser intercambiado con  $v_2$ .

Esta heurística es la que le permite al programa postular propiedades intrínsecas y hace posible incorporar los efectos de cambios de valores nominales en la detección de leyes cuantitativas.

Por ejemplo, en la ley de Black, una propiedad intrínseca es el calor específico asociado a distintas sustancias.

Otro ejemplo de las posibilidades de BACON.4 lo constituye la ley de Snell que relaciona los ángulos de incidencia  $i$  y el ángulo de refracción  $r$  de un rayo de luz cuando atraviesa una interfase transparente entre dos medios. La ley tiene la siguiente forma:

$$\text{sen}(i)/\text{sen}(r) = n_1/n_2$$

$n_1, n_2$  = índice de refracción de cada medio a un medio de referencia común (normalmente el vacío)

Esta ley se puede obtener mediante el BACON.4 a partir de los siguientes datos, variables y pasos:

Segundo medio	Primer medio	Sen(i)	Sen(r)	Sen(i)/Sen(r)
vacío	agua	.5000	.3759	1.33
vacío	agua	.7071	.6317	1.33
vacío	agua	.8660	.6511	1.33
vacío	aceite	.5000	.3401	1.47
vacío	aceite	.7071	.4810	1.47
vacío	aceite	.8660	.5819	1.47
vacío	cuarzo	.5000	.3247	1.54
vacío	cuarzo	.7071	.4592	1.54
vacío	cuarzo	.8660	.5623	1.54
vacío	vidrio	.5000	.3012	1.66
vacío	vidrio	.7071	.4250	1.66
vacío	vidrio	.8660	.5217	1.66

**Tabla 6**

En la Tabla 6 tenemos dos variables (segundo medio, primer medio) cuyos valores son nominales y a los que se les asocia una variable independiente, la variación del ángulo de incidencia expresada a través del  $\text{sen}(i)$ . La otra variable,  $r$ , es dependiente y varía tanto de acuerdo al ángulo de incidencia como al tipo de medio elegido. Los valores de  $\text{sen}(i)$  crecen conjuntamente con los valores de  $\text{sen}(r)$  para cada ángulo de incidencia y tipo de material. Esto lleva a la aplicación de la heurística CRECER de los BACON anteriores y la ejecución de la condición de crear un nuevo término, que es la razón de los términos considerados. De ahí que la última columna se tome  $\text{sen}(i)/\text{sen}(r)$ . La asignación de los valores correspondientes a este último término muestra constancias para cada sustancia involucrada independientemente de los ángulos de

incidencia y refracción. Es en este punto donde se ponen en evidencia las limitaciones de los BACON anteriores; no hay posibilidad con sus heurísticas de lograr una mayor comprensión de la información. Es aquí donde entra la heurística POSTULAR PROPIEDADES INTRINSECAS del BACON.4.

Debido a que la naturaleza del primer medio afecta los valores de  $\text{sen}(i)/\text{sen}(r)$  y debido a que los valores del primer medio son intercambiables con valores del segundo medio, BACON.4 supone que existe alguna propiedad de los dos medios (a la que llamamos índice de refracción) que afecta al resultado experimental. Debido a que los valores de  $\text{sen}(i)/\text{sen}(r)$  dependen únicamente de los valores del primer y segundo medio, BACON.4 supone que los valores de la razón reflejan los diferentes valores de la propiedad. Podemos asignarle a cada valor del segundo medio el valor de la razón  $\text{sen}(i)/\text{sen}(r)$ . De este modo el índice de refracción del agua es 1.33, aceite 1.47 y así sucesivamente. (Bradshaw, Langley & Simon, 1980: 20)

La siguiente Tabla 7 recoge los datos, luego de suponer que se han determinado los índices de refracción para cada sustancia individualmente. Se excluye el vacío y se cruza cada sustancia con el agua como segundo medio. Los valores del ángulo de incidencia para cada sustancia que obra como primer medio se conocen de la Tabla 6. Lo que se hace es determinar los valores del ángulo de refracción en la segunda sustancia. Como ambos aumentan concomitantemente, se toma la razón ( $\text{sen}(i)/\text{sen}(r)$ ) entre ambos y se calculan los valores. Nuevamente da valores constantes para cada sustancia que es primer medio en relación al agua.

Segundo medio	Primer medio	sen(i)	sen(r)	sen(i)/sen(r)
agua	aceite	.5000	.4523	1.11
agua	aceite	.7071	.6395	1.11
agua	aceite	.8660	.7835	1.11
agua	cuarzo	.5000	.4318	1.16
agua	cuarzo	.7071	.6107	1.16
agua	cuarzo	.8660	.7479	1.16
agua	vidrio	.5000	.4006	1.25
agua	vidrio	.7071	.5565	1.25
agua	vidrio	.8660	.8938	1.25

**Tabla 7**

En la Tabla 8 se combinan todos los medios (primeras dos columnas), en la tercer columna se colocan los índices de refracción para cada sustancia que actúa como primer medio. En la cuarta columna se colocan los valores obtenidos anteriormente para la combinación de todas las sustancias y de otras no obtenidas anteriormente. La comparación entre la tercera y cuarta columna, muestra que crecen monótonamente. Esto lleva a que en la última columna tomemos la razón entre ambos ( $n_1$  es el índice de refracción del primer medio). Cuando se calculan los valores del término así obtenido, nuevamente pueden apreciarse las constancias parciales que existen entre las combinaciones que tienen el mismo segundo medio.

Segundo medio	Primer medio	Índice de refracción	$\text{sen}(i)/\text{sen}(r)$	$\text{sen}(i)/n_1 \text{sen}(r)$
agua	aceite	1.47	1.11	.752
agua	cuarzo	1.54	1.16	.752
agua	vidrio	1.66	1.25	.752
aceite	agua	1.33	0.90	.680
aceite	cuarzo	1.54	1.05	.680
aceite	vidrio	1.66	1.13	.680
cuarzo	agua	1.33	0.86	.649
cuarzo	aceite	1.47	0.95	.649
cuarzo	vidrio	1.66	1.13	.649
vidrio	agua	1.33	0.80	.602
vidrio	aceite	1.47	0.89	.602
vidrio	cuarzo	1.54	0.93	.602

**Tabla 8**

En la Tabla 8, en su primer columna están los segundos medios de la tabla anterior con los índices de refracción correspondientes en la segunda y los valores obtenidos en la columna anterior (se hallan resumidos porque se eliminaron términos constantes repetidos para cada segundo medio). Como el índice de refracción crece mientras los valores asociados a cada segundo medio decrecen, se aplica la heurística DECRECER y se obtiene la expresión,  $n_2\text{sen}(i)/n_1\text{sen}(r)$ , que una vez computada muestra para todos los casos valores constante, lo que determina que estamos ante una ley.

Segundo medio	Índice de refracción	$\text{Sen}(i)/n_1 \text{ sen}(r)$	$n_2 \text{ sen}(i)/n_1 \text{ sen}(r)$
agua	1.33	.752	1.00
aceite	1.47	.680	1.00
cuarzo	1.54	.649	1.00
vidrio	1.66	.802	1.00

**Tabla 9**

La habilidad de introducir propiedades intrínsecas ofrece un poder de un tipo totalmente diferente, permitiendo al BACON efectivamente transformar variables nominales en numéricas, lo que puede ser incorporado a su vez en leyes numéricas. (Langley & Zytkow, 1989: 283-312)

BACON.4 fue aplicado satisfactoriamente a:

Ley de Ohm de circuitos eléctricos

Ley de Arquímedes del desplazamiento.

Ley de refracción de Snell

Ley del calor específico de Black

Ley de conservación del momento.

Ley de gravitación.

Los descubrimientos de Dalton (ley de las proporciones múltiples), Gay-Lussac (ley de proporciones definidas para volúmenes de gases) y Canizzaro (pesos atómicos relativos) involucran más que postular propiedades intrínsecas y detectar valores recurrentes. Además, estos científicos encontraron que en un número de casos un conjunto de valores podrían ser expresados como pequeños múltiplos enteros de otros. BACON.4 no tiene heurísticas para descubrir tales relaciones. Se agregaron nuevas heurísticas que buscan divisores comunes en valores intrínsecos propuestos. Un *divisor común* para un conjunto de valores es

un número que, cuando dividido por aquellos valores, genera un conjunto de enteros.

*e) BACON.5*

La novedad del BACON.5 está en agregarle al BACON.4 una forma de razonamiento por analogía.

Cuando a BACON.5 se le da una variable, pide el nombre del objeto con el cual el término está asociado. El programa genera un único nombre para esta combinación variable-objeto, y pasa a recoger más información. Sin embargo, antes de planear un experimento, el sistema reorganiza las variables conocidas, agrupando las variables que tienen asociado el mismo objeto. En algunas circunstancias dos objetos tienen exactamente los mismos términos asociados. En este caso el programa BACON.5 supone que ley final será simétrica, aunque no puede predecir la forma real. El programa ordena los términos de modo que aquellos ligados a un objeto sean variados primero. Una vez que encuentra un término teórico constante incorporando estas variables, el programa supone que debe usarse un término análogo para el otro objeto. De este modo BACON.5 debe variar sistemáticamente sólo uno del segundo conjunto de términos. Cuando se hace esto, los dos términos de más alto nivel toman diferentes valores, y pueden ser relacionados con otras heurísticas. (Langley, Bradshaw & Simon, 1981: 123)

## *2. El sistema GLAUBER*

GLAUBER es un sistema que opera sobre datos totalmente simbólicos o cualitativos. A diferencia de los BACON, que representan los datos como conjunciones de pares atributo-valor (los cuales pueden ser simbólicos no cuantitativos), GLAUBER representa los datos usando una notación predicado argumento. Por ejemplo, a la reacción del cloruro

de hidrógeno (HCl) con amoníaco (NH<sub>3</sub>) para formar cloruro de amonio (NH<sub>4</sub>), GLAUBER la representaría como

(reacts inputs [HCl NH<sub>3</sub>] outputs [NH<sub>4</sub>Cl])

(Langley, et al., 1987: 197)

La diferencia más importante de este tipo de representación cuando se la compara con los programas BACON es que el mismo símbolo puede ocurrir en el argumento de distintas proposiciones.

Por ejemplo una expresión como la siguiente:

(react inputs [HCl NH<sub>3</sub>] outputs [NH<sub>4</sub>Cl]) y (reacts inputs [HCl KOH] outputs [KCl]) están conectadas en GLAUBER porque HCl tiene lugar en ambas expresiones; una posibilidad que no se da en los programas BACON a pesar de que permite trabajar con valores nominales.

El objetivo del programa GLAUBER es, dado un conjunto de hechos, encontrar un conjunto de leyes que resuman los datos observados. Estas leyes deben tener la misma forma que los hechos originales, pero se reemplazan las sustancias específicas por nombres comunes que denoten clases de sustancias y ofrezcan generalidad. Por ejemplo, la ley cualitativa

(reacts inputs [acid alkali] outputs [salt])

tiene la misma forma que

(react inputs [HCl NaOH] output [NaCl])

pero HCl ha sido reemplazada por el nombre común *ácido*, NaOH por *alcalino* y NaCl por *sal* (Langley, et al., 1987: 198).

El programa tiene heurísticas para formar clases, por ejemplo de (reacts inputs [HCl NaOH] outputs [NaCl]) y de (reacts inputs [KCl KOH] outputs [KCl]), forma la clase A=[NaOH],KOH] y B=[NaCl, KCl].

Cuando se le da a GLAUBER un conjunto de observaciones, su primera acción es formar clases tentativas basadas sobre todos los triplos

observados. La mayor cobertura de una clase hace que sea elegida por el programa para pasos posteriores.

Glauber determina la clase de sustancias a definir, considerando todas las sustancias conocidas y clases, seleccionado posteriormente el tripo que dé cuenta del mayor número de hechos o leyes. Puede determinar el lugar de cuantificadores universales y existenciales, examinando hechos o leyes de más bajo nivel, en los que se basa la ley.

Heurísticas del GLAUBER:

FORM-CLASS (formar clases), DETERMINE-QUANTIFIER (determinar cuantificadores)
-------------------------------------------------------------------------------

GLAUBER puede redescubrir los conceptos “ácido” y “alcalino”

### 3. *El sistema STAHL*

Acepta como *input* una lista ordenada de sustancias químicas y genera como salida una lista de elementos químicos y los compuestos de los cuales son componentes. (Langley, et al., 1987: 227)

A diferencia de GLAUBER, que resume los datos dados como input, las conclusiones de STAHL son explicaciones de las estructuras de las sustancias individuales, y son completamente distintas de los resúmenes descriptivos (generalizaciones) producidos por GLAUBER.

Heurísticas de STAHL

<b>INFIERA-COMPONENTES</b>
----------------------------

Si A y B reaccionan para formar C, o si C se descompone en A y B, entonces infiera que C es compuesta de A y B.
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<b>REDUZCA</b>
----------------

Si A tiene lugar sobre ambos lados de una reacción, entonces elimine A de la reacción
------------------------------------------------------------------------------------------

**SUSTITUYA**

Si A tiene lugar en una reacción,  
Y A es compuesta de B y C,  
entonces reemplace A con B y C.

STAHL puede dar cuenta de la teoría del flogisto, la teoría calórica de Lavoisier y el descubrimiento del oxígeno.

STAHL incorpora conocimiento específico sobre la constitución de los objetos y la conservación de sustancias básicas. Construye las explicaciones en la forma de descripción de estructuras subyacentes de sustancias y reacciones.

#### ***4. El sistema DALTON***

Acepta como input el tipo de información que STAHL genera como output, por ejemplo que el hidrógeno reacciona con el oxígeno para formar agua, y que el hidrógeno reacciona con el nitrógeno para formar amoníaco. También se le dice que el agua tiene hidrógeno y oxígeno como sus componentes, mientras que el amoníaco tiene hidrógeno y nitrógeno. Por último a DALTON se le dice que el hidrógeno, oxígeno y nitrógeno son elementos, lo cual implica que no tienen elementos en común. Dalton representa esta información en un modo que es idéntico a aquellos usados por GLAUBER y STAHL (Langley, et al., 1987: 259).

El programa tiene como objetivo desarrollar modelos estructurales para cada reacción y las sustancias involucradas. El programa representa modelos estructurales en diversos niveles de abstracción y su actividad consiste en una búsqueda heurística en un espacio de modelos estructurales. Es un programa que no puede calificarse enteramente como guiado por los datos, siendo por lo tanto, aunque sea en parte guiado por teoría.

### ***5. El sistema FAHRENHEIT***

Es una continuación de los BACON y tiene la capacidad de determinar el ámbito o límites de leyes numéricas (Zytkow, Zhu & Hussam, 1990). El sistema puede considerar variables independientes alternativas lo que le permite descubrir leyes que BACON no podría.

### ***6. El sistema IDS***

Puede descubrir tanto leyes cuantitativas como cualitativas y representa el ámbito de las leyes de un modo más fuerte que los BACON. El programa incorpora la generación selectiva de experimentos que dependen de resultados de experimentos anteriores. (Nordhausen & Langley, 1990)

El programa intenta implementar tres aspectos importantes de la actividad científica, la formación de taxonomías, generación de leyes cualitativas y la producción de leyes cuantitativas. Una de las características llamativas de este sistema es haber incorporado la posibilidad de que el conocimiento sea también representado por esquemas cualitativos que resumen cambios en el tiempo en los valores de uno o más objetos. Es un tipo de representación y cambio de la misma que está inspirado en la teoría de los procesos cualitativos de Forbus (Forbus, 1984). Un tipo de representación como esta permite predecir cambios en los estados de un sistema físico.

Los esquemas cualitativos le dan significado a las leyes numéricas y restringen la búsqueda de las mismas.

A pesar de significar un avance en la integración de representaciones cuantitativas y cualitativas, IDS no incorpora o implementa alguna forma de experimentación, cuestión que limita la potencia de la integración entre la información cuantitativa y cualitativa que propone.

### 7. *El sistema AM*

Es un programa que busca el descubrimiento de nuevos conceptos y conjeturas en matemáticas elemental y teoría de conjuntos. Como característica distintiva, presenta una estructura general de resolución de problemas que no está orientada hacia objetivos preasignados, como ocurre con la mayoría de los programas automáticos de descubrimiento. En síntesis, es un sistema que simula el proceso que hace un matemático para descubrir nuevos conceptos y relaciones entre estos conceptos usando heurísticas. (Lenat, 1977) (Davis & Lenat, 1982)

AM empieza con 115 conceptos (como borrar o igualdad) y 250 heurísticas. Las heurísticas pueden llenar espacios en blanco dejados por los conceptos presentados como estructura de datos o el orden en que los conceptos deben ser explorados.

Las reglas (heurísticas):

Las heurísticas sugieren nuevas metas, aumentan valores, revisan y/o llenan facetas, crean nuevos conceptos y hacen conjeturas.

**Para crear nuevos conceptos:**

Generalización.

Especialización.

Inversión.

Composición.

Proyección.

**Para crear nuevas conjeturas:**

C1 es realmente un ejemplo de C2

C1 es una especialización (generalización) de C2

C1 es (casi) igual a C2

C1 y C2 están relacionados por algún concepto conocido

Operación sobre C1 tiene dominio D o rango R.

AM tiene mecanismos para generar automáticamente ejemplos (corriendo definiciones, buscando en especializaciones o generalizaciones). (Morales, 2001)

Los descubrimientos de AM:

AM conjeturó teoremas fundamentales de la aritmética y la conjetura de Goldbach.

Otras de las características de AM es que supone un punto de vista sobre el descubrimiento que se apoya más en una búsqueda guiada por la principios de estética matemática que por objetivos definidos.

### ***8. El sistema ABACUS***

Programa realizado por Falkenhainer y Michalski (1986), formula ecuaciones caracterizando datos observados y deriva descripciones explícitas que establecen las condiciones de aplicabilidad para estas ecuaciones. A diferencia de programas como los BACON, puede derivar múltiples ecuaciones para describir conjuntos de datos diferentes.

### ***9. El sistema ECHO***

Este programa, desarrollado por Thagard (1992) (1989), es una implementación de su teoría de la coherencia explicativa. El programa también puede ser visto como una aplicación directa de algoritmos conexionistas a problemas de la coherencia explicativa. Esta teoría está basada en la relación entre hipótesis y otras proposiciones en base a 7 principios que establecen relaciones de coherencia. Los principios son:

#### **1. Principio de Simetría**

Afirma que la coherencia y la incoherencia a pares son relaciones simétricas. La coherencia e incoherencia de dos proposiciones es diferente de las relaciones no simétricas de implicación y probabilidad condicional.

Si P y Q son coherentes, entonces Q y P son coherentes.

Si P y Q son incoherentes, entonces Q y P son incoherentes.

## **2. Principio de Explicación.**

Si  $P_1, \dots, P_m$  explican Q, entonces:

a) Para cada  $P_i$  en  $P_1, \dots, P_m$ ,  $P_i$  y Q son coherentes. (Lo que explica es coherente con lo que es explicado).

b) Para cada  $P_i$  y  $P_j$  en  $P_1, \dots, P_m$ ,  $P_i$  y  $P_j$  son coherentes. (Dos proposiciones son coherentes si conjuntamente ofrecen una explicación)

c) En (a) y (b), el grado de coherencia es inversamente proporcional al número de proposiciones  $P_1, \dots, P_m$ . (Si numerosas proposiciones son necesarias para facilitar una explicación entonces disminuye la coherencia entre cada una de las proposiciones que explican con la que es explicada)

## **3. Principio de Analogía**

Este principio no dice simplemente que dos proposiciones análogas son coherentes. Debe haber una analogía explicativa con dos proposiciones análogas que ocurren en explicaciones de otras dos proposiciones que son respectivamente análogas.

- a) Si  $P_1$  explica  $Q_1$ ,  $P_2$  explica  $Q_2$ ,  $P_1$  es análogo a  $P_2$  y  $Q_1$  es análogo a  $Q_2$ , entonces  $P_1$  y  $P_2$  son coherentes, y  $Q_1$  y  $Q_2$  son coherentes.
- b) Si  $P_1$  explica  $Q_1$ ,  $P_2$  explica  $Q_2$ ,  $Q_1$  es análogo a  $Q_2$ , pero  $P_1$  es no análogo a  $P_2$ , entonces  $P_1$  y  $P_2$  son incoherentes.

## **4. Principio de Prioridad del dato**

Proposiciones que describen resultados de observaciones tienen un grado de aceptabilidad propio; no es que se consideran indubitables sino que pueden tener llegado el caso más éxito que hipótesis cuya única justificación es que explican datos.

### **5. Principio de Contradicción**

La contradicción no es sólo sintáctica sino también semántica.

Si P contradice a Q, entonces P y Q son incoherentes.

### **6. Principio de competencia.**

Si tanto P como Q explican una proposición  $P_i$  y si P y Q no están explicativamente conectadas, entonces P y Q son incoherentes. Aquí P y Q están explicativamente conectadas si valen algunas de las siguientes condiciones:

- a) P es parte de la explicación de Q,
- b) Q es parte de la explicación de P,
- c) P y Q son conjuntamente parte de la explicación de algunas proposiciones  $P_j$ .

La hipótesis que explica la misma evidencia compite con todas las otras, a menos que haya razón para creer de otro modo. Por ejemplo en el debate sobre la extinción de los dinosaurios estas dos hipótesis son incoherentes:

1. los dinosaurios se extinguieron por una colisión de un meteorito.
2. los dinosaurios se extinguieron por la caída del nivel del mar.

1 y 2 pueden ser verdaderas pero los científicos las tratan como explicaciones en conflicto.

### **7. Principio Aceptabilidad**

- a) la aceptabilidad de una proposición P en un sistema S depende de su coherencia con las proposiciones en S.
- b) si no se explican muchos resultados de las observaciones experimentales relevantes, entonces se reduce la aceptabilidad de una proposición P que explica sólo unas pocas de ellas.

(Thagard, 1992: 65-69)

De acuerdo a la teoría de la coherencia explicativa, una teoría reemplaza a una anterior si tiene mayor coherencia explicativa. La vaguedad de esta forma de presentar esta teoría y la complejidad de computar las relaciones entre todos los pares de proposiciones lleva a implementarla en el programa computacional antes mencionado.

El programa ECHO aplica algoritmos conexionistas al problema de la coherencia explicativa. Las proposiciones que representan hipótesis y resultados de observación se representan por unidades. Las relaciones de coherencia se establecen a través de vínculos excitatorios, mientras que las incoherencias son implementadas a través de vínculos inhibitorios.

Los algoritmos conexionistas de ECHO muestran la computabilidad de las relaciones de coherencia. El éxito del programa deriva de la utilidad de las arquitecturas conexionistas para implementar satisfacción de restricciones en paralelo y del hecho de que la inferencia a la mejor explicación es inherentemente un problema de satisfacer simultáneamente múltiples restricciones. (Thagard, 1992: 97)

### **Ejemplo: La revolución Darwiniana**

#### *Evidencias de Darwin*

E1 los registros fósiles contienen pocas formas transicionales.

E2 los animales tienen órganos complejos

E3 Los animales tienen instintos.

E4 Las especies cuando son cruzadas dan cría estéril.

E5 Las especies entran en extinción.

E6 Una vez extintas las especies no aparecen.

E7 Las formas de vidas cambian casi simultáneamente alrededor del mundo.

E8 Las especies extintas son similares unas a otras y a formas vivientes.

E9 Las especies similares están separadas por barreras.

E10 Especies relacionadas están concentradas en las mismas áreas.

E12 Las especies muestran afinidades sistemáticas.

E13 Diferentes especies comparten morfologías similares.

E14 Los embriones de diferentes especies son similares.

E15 Los animales tienen órganos rudimentarios y atrofiados.

*Principales hipótesis de Darwin:*

DH1 Los seres orgánicos están en una lucha por su existencia.

DH2 Los seres orgánicos experimentan selección natural.

DH3 Especies de seres orgánicos han evolucionado.

*Las hipótesis auxiliares de Darwin.*

DH4 Los registros geológicos son imperfectos.

DH5 Hay formas transicionales de órganos complejos.

DH6 Las cualidades mentales varían y son heredadas.

*Hechos de Darwin:*

DF1 Los animales domésticos experimentan variación.

DF2 Los criadores seleccionan características deseadas de los animales.

DF3 Se desarrollaron variedades domésticas.

DF4 En la naturaleza los seres orgánicos experimentan variación.

DF5 Los seres orgánicos incrementan la población a tasas altas.

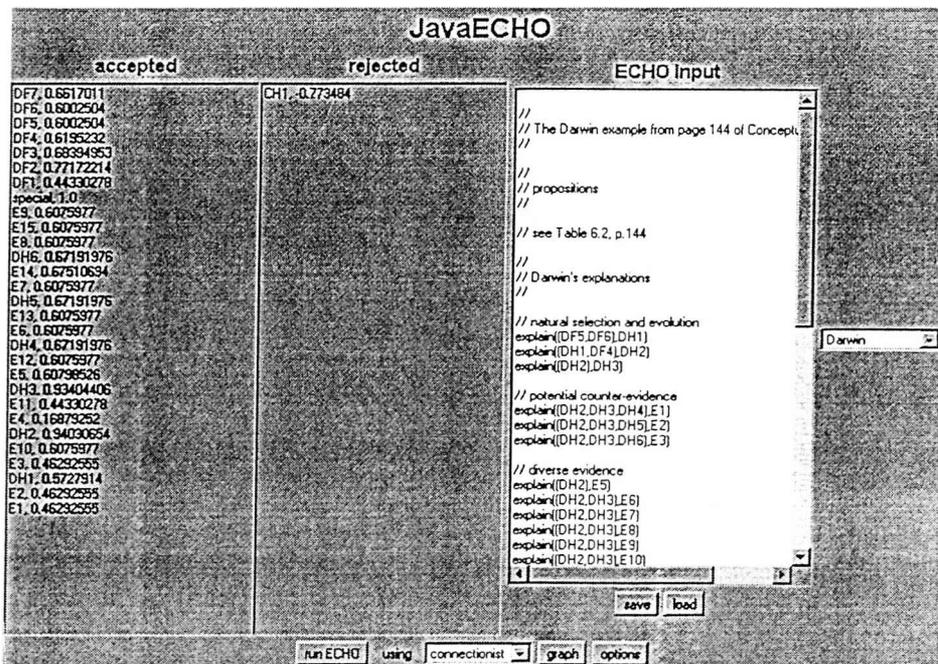
DF6 La subsistencia disponible para un ser orgánico no se incrementa a tasa alta.

DF7 Los embriones de diferentes variedades domésticas son similares.

*Hipótesis creacionista:*

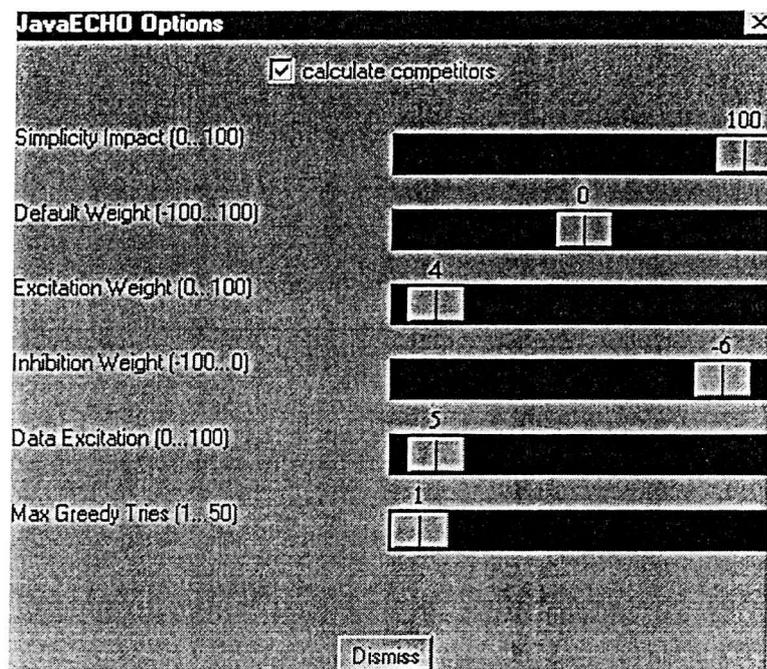
CH1 Las especies fueron creada separadamente por Dios.  
(Thagard, 1992: 143)

Dadas estas evidencias, hipótesis y hechos una versión java del programa ECHO, produce los resultados que se muestra en la siguiente figura:



Como puede apreciarse en la ventana *ECHO input*, también se le da al programa como entrada las distintas explicaciones que ofrece Darwin. Por ejemplo “(explain (DF5 DF6) DH1)” significa que se le indica al programa que los hechos autónomos “Los seres orgánicos se incrementan en población a tasas altas”, “La subsistencia disponible a un ser orgánico no se incrementa a tasa alta” explican por qué los seres orgánicos están en lucha por la existencia.

Evidencias, hechos e hipótesis se aceptan o rechazan figurando a su derecha los pesos positivos y negativos (en caso de rechazo). Estos valores surgen a partir de los siguientes parámetros con que se configura el programa:



#### Aplicaciones del ECHO:

Evaluación de la teoría del oxígeno versus la teoría del flogisto (Lavoiser)

Evaluación de la teoría evolutiva versus la teoría creacionista (Darwin)

Evaluación de las teorías respecto a la desaparición de los dinosaurios.

Evaluación de las teorías respecto a la deriva continental.

Aplicación de la resolución de problemas en física.

Evaluación de la astronomía copernicana versus la teoría Tolemaica.

Evaluación de razonamiento legal.

Evaluación de la comprensión de texto.

Evaluación de la revisión de creencias en física *naive*.

Evaluación de argumentación contraria.

Percepción de relaciones sociales.

#### **Críticas al ECHO.**

- a) Ignora problemas de inconmensurabilidad de teorías.
- b) No sostiene la revisión y dinámica de creencias, dos componentes esenciales de los razonamientos abductivos. (Wang, Johnson & Zhang, 1998: 1113).

### ***10. El sistema MECHEM***

Programa realizado por Raúl Valdez-Pérez (1994) es una ayuda computacional para la elucidación de los mecanismos o vías de reacción. Su tarea consiste en encontrar las vías de reacción más simples que sean consistentes con evidencia experimental disponible y el “background” teórico-químico. Como éxito importante del programa se puede señalar que la aplicación a las complejas reacciones de múltiples pasos de la catálisis de hidrocarburos.

La clave técnica subyacente del programa es un algoritmo para generar vías de reacción no-redundantes en orden a la simplicidad, donde la simplicidad es medida en términos del número de pasos de la reacción y el número total de especies que aparecen en una vía (pathway). Al algoritmo le es posible “conjeturar” especies no vistas en un modo novedoso: introduciendo comodines como X, Y, Z, etc. para los cuales se infieren fórmulas moleculares balanceando todos los pasos en los cuales los comodines tienen lugar. (Valdes-Perez, 1994: 976)

Un resultado que le ha permitido a este programa ser uno de los pocos ejemplos de descubrimiento exitoso es el haber encontrado una vía alternativa para la hidrólisis metal-catalizada del etano. MECHEM encontró una nueva vía de comparable simplicidad la cual involucra la

transferencias de hidrógeno entre especies absorbidas, más que las sucesivas hidrogenaciones, característica de los mecanismos aceptados.

La heurística más importante en MECHEM es prestarle atención a productos experimentalmente observados e intermedios y preguntar como podrían haber sido derivados a partir de los materiales que se tuvieron al principio.

La otra heurística que le sigue en importancia es la simplicidad, que aplicada a este contexto significa darle prioridad a las vías en las que aparezcan menos pasos y al total de especies.

Una tercera heurística o grupo de heurísticas es la que tiene que ver con las restricciones químicas, como balance de reacción, molecularidad, restricciones sobre valores atómicos o el umbral sobre el número de cambios de uniones por paso elemental. (Valdes-Perez, 1994: 1115)

### *11. El sistema PAULI*

Sistema de descubrimiento también desarrollado por Valdez-Pérez, ha llevado al descubrimiento de un teorema general sobre los valores cuánticos de partículas elementales en física.

### *12. El sistema KEKADA*

El programa KEKADA (Kulkarni & Simon, 1988) realizado sobre la base de los estudios históricos de F Holmes (1980) del descubrimiento Hans Krebs del ciclo del ácido cítrico.

Ya en 1932 había descubierto lo que se conoce como el ciclo de la urea mediante el cual el amoníaco es convertido en urea en los tejidos de mamíferos.

El programa intenta ofrecer una concepción del rol de la experimentación en el descubrimiento científico. Básicamente su tarea es:

Dado: Un fenómeno sorprendente,

Dado: Un conjunto de hechos e hipótesis acerca de un dominio.

Hacer: desarrollar una experimentación, adquirir los resultados del experimento y usar estos resultados para refinar del dominio de la teoría incrementalmente.

La novedad del programa con respecto a programas anteriores está en la capacidad que posee de detectar fenómenos sorprendentes y usar estas sorpresas para modificar la hipótesis o teoría en cuestión. El intento de KEKADA respecto a programas anteriores, como los BACON, es no solo realizar búsquedas sobre datos dados al comienzo, sino generar estos datos.

Proceso básico: proponer experimentos para testear teorías.

Representación de datos: en la memoria de trabajo los elementos son representados por pares valor-atributo.

Entre estos elementos el programa cuenta con las siguientes categorías:

Procesos: describe las reacciones químicas

Sustancias: da información acerca de una sustancia dada.

Experimentos: los atributos de un experimento son :inputs, condiciones para ser desarrollado, lugar para ser desarrollado, cantidades iniciales de input, indicadores de lo que debe ser medido cuando se realice el experimento.

Hechos suplementarios: dar información adicional sobre un proceso.

Hipótesis: es una descripción de cómo un fenómeno o proceso que se supone podría tener lugar. Se asocia a cada hipótesis una medida de confianza.

Representación de la medida de confianza: es un 5-tuplos:

1. éxito: el número de experimentos que han verificado una hipótesis universal sobre una clase o hipótesis en general.
2. Fracaso: el número de experimentos que han falsificado la hipótesis.
3. Esfuerzo-fracazo: la cantidad de esfuerzo gastado en encontrar una instancia positiva.
4. Éxito implicado: un hecho que es una indicación positiva, pero inconclusiva, que la hipótesis podría ser verdadera.
5. Fracaso-implicado: un hecho que indica, pero no conclusivamente, que la hipótesis podría ser falsa.

El sistema KEKADA está basado en el modelo de 2 espacios propuesto por Simon y Lea (1974), el programa busca en un espacio de datos y en un espacio de leyes o hipótesis.

**En el espacio de instancias o datos tenemos los siguientes operadores:**

Proponentes de experimentos.

Experimentadores.

**En el espacio de reglas:**

Proponentes de heurísticas o estrategias

Generador de problemas

PG1 si los resultados de un experimento violan las expectativas, entonces comience el estudio de este fenómeno enigmático y agréguelo a la agenda.

Elegidores de problemas

PC0 tomar en consideración todas las tareas de la agenda.

PC1 si no existe ningún método analítico para medir las salidas de un proceso o para ejecutar los procesos, elimínalo.

PC2 si la tarea no es considerada como muy importante por la disciplina, elimínela.

PC3 si un nuevo método incrementa significativamente su precisión y la tasa con la cual puede desarrollarse la tarea, entonces prefíeralo sobre otro método, siendo las cosas iguales.

PC4 si no hay otro criterio aplicable, entonces haga una elección aleatoria.

PC5 si no tiene la habilidad para estudiar una tarea, elimínela.

PC6 siendo otras cosas iguales, prefiera tareas que pueden ser estudiadas más precisamente.

PC7 siendo otras cosas iguales, prefiera tareas que puedan ser desarrolladas más rápido.

PC8 si una nueva tarea para estudiar un fenómeno enigmático está siendo agregada a la agenda, prefíerala sobre toda otra tarea, haciéndola el principal foco de atención.

DM1 si el output de un proceso no puede ser medido, elimínelo.

DM2 si la tasa típica de progreso de un proceso es significativamente mayor que la de otro proceso, prefíeralo.

DM3 si no hay otro criterio para la elección de hipótesis entre dos procesos, elija uno de ellos al azar.

DM5 si el costo de una sustancia a ser testada es demasiado alta, elimínela.

DM6 si la sustancia a ser testada no es fácilmente disponible, elimínela.

DM7 si el costo de dos sustancias es baja y ambas están disponibles, y son testadas debido a que son similares a una sustancia en particular, entonces dé preferencia a la sustancia que es más similar a la sustancia dada.

DM8 si no hay otro criterio para la elección entre sustancia, elija una de ellas al azar.

DM9 algunas veces la experiencia de los investigadores o la naturaleza de la hipótesis define un orden parcial de las hipótesis.

DM10 Al correr este sistema para el ejemplo de la urea, en unos pocos casos donde las heurísticas bioquímicas que Krebs usó para hacer la elección no son claras para nosotros, la elección fue realizada por el usuario.

EP1. Si la estrategia preferida es ver si un fenómeno sorprendente es común a una clase de sustancia, entonces use las tomadoras de decisión para elegir una sustancia A en aquella clase y decida estudiar el fenómeno con A como reactante.

EP2 Si usted está estudiando un fenómeno con A como reactante, y hay una hipótesis que A produce C con B como un producto intermedio, entonces desarrolle experimentos sobre A y sobre B, y compare tasas de formación de C a partir de A y B.

EP3 Si la hipótesis elegida es que en la reacción bajo estudio A y B reacciona conjuntamente para formar C, y que B es la fuente de uno de los componentes de C, entonces desarrolle un experimento con A y B conjuntamente, midiendo parámetros apropiados para determinar la cantidad de C en relación a las cantidades A y B.

EP4 Si la hipótesis elegida es tal que A y B reaccionan juntas para formar C, y si B es la fuente de uno de los componentes de C, entonces realice un experimento con A y B juntas, midiendo los parámetros apropiados para determinar la cantidad de C en relación con las cantidades de A y B.

EP5 Si la hipótesis elegida sostiene que el reactante A en un experimento es un catalítico, , o si la hipótesis elegida es que A dona algún elemento o grupo y no existe la posibilidad de que A done un

grupo o elemento, entonces desarrollar experimentos sobre largos períodos de tiempo pero con baja concentración de A.

EP6 si la hipótesis elegida es que la razón para un resultado sorprendente podría descansar en una sustancia no conocida, conjeture que la sustancia es una que está relacionada a los procesos, es decir, una sustancia que los primeros experimentos parecen haber asociado con los procesos dados o la misma clase de procesos. Elija una de las sustancias usando un tomador de decisiones, y desarrolle un experimento sobre ésta.

EP7 si el objetivo es estudiar una reacción particular en detalle, desarrolle la reacción bajo varias condiciones.

EP8 si la hipótesis preferida es estudiar la relación de un hecho relacionado a un fenómeno sorprendente, y las reacciones relacionadas y los fenómenos dados ambos producen la misma salida, cree dos nuevas hipótesis y agréguelas al conjunto de hipótesis:

- a) Haga hipótesis sobre una clase y prediga que producirá esta salida.
- b) Si hay evidencia para una hipótesis que dado el reactante podría ser un intermedio, entonces cree esta hipótesis. Finalmente estudie una de las hipótesis identificadas nuevamente.

ES1 si el mismo experimento fue desarrollado antes, el valor esperado es la media de las cantidades resultantes previas, mientras que el límite más bajo es la menor cantidad previamente observada menos un factor tolerancia.

ES2 si no se ha desarrollado antes ningún experimento con el *input* dado, y ningún experimento con *inputs* similares (es decir, experimentos con diferentes aminoácidos), entonces la expectativa es un valor asumido predeterminado que refleja el conocimiento anterior del investigador.

ES3 si los experimentos se desarrollan sobre miembros de una clase, la expectativa para la clase (esto es, para todos los miembros de la clase) se modifica para reflejar el resultado. Se usan expectativas para

una clase como expectativas para miembros de la clase que no ha sido previamente testeada.

ES4 Cuando se ha desarrollado un nuevo experimento, actualice los elementos de la información sumaria.

E1 los resultados de los experimentos los da interactivamente el usuario.

HG1 si un resultado sorprendente tiene lugar involucrando a A como un reactante, entonces hipotetice que hay una clase de sustancia conteniendo A (o sus derivadas) que producirá el mismo resultado.

HG2 si hay una sorprendentemente baja sustancia de salida A bajo algunas condiciones experimentales pero no otras, y si es posible que otra sustancia A esté presente en las últimas condiciones pero no en las primeras, hipotetice que la ausencia de S está causando la baja salida.

HG3 Si una reacción tiene un subproceso y el resultado de la reacción es sorprendente, hipotetice que el resultado sorprendente es sobre uno de los subprocesos.

HG4 Si una reacción produce alguna salida, cree la hipótesis que afirme que el reactante dona aquel grupo a la sustancia de salida y que el reactante podría ser un catalítico.

HG5 si la transformación esteroquímica desde el *inputs* al *outputs* de una reacción no es posible, entonces cree la hipótesis que existe un intermedio. De otro modo cree una hipótesis que hay una reacción estereoquímica de un paso.

HG6 si el objetivo es estudiar un fenómeno enigmático y si la reacción y el fenómeno sorprendente contienen dos sustancias comunes, entonces cree una hipótesis que pudiera estar relacionada.

HG7 si la salida de A y de B es diferente de la suma de las salida de A y de B, entonces cree la hipótesis que hay acciones mezcladas de A y B. De otro modo cree la hipótesis que el efecto es aditivo.

HG8 Propiedades de una clase son verdaderas para un miembro.

HM1 Si A y B reaccionan para producir C, y B no actúa sin A, y la cantidad de productos es grande relativo a la cantidad de A, entonces concluya que A es un catalítico.

HM2 Si la estrategia preferida es verificar la existencia de una reacción intermedia en una reacción, entonces desarrolle las siguientes tres etapas:

- 1) considere a las sustancias estructuralmente intermedias en una reacción, entre inputs y outputs como posibles candidatas,
- 2) evalúe la plausibilidad de cada candidata de ser una intermediaria en la reacción.
- 3) Elija la sustancia (si la hay) que haya sido evaluada como más probable de ser una intermediaria en la reacción.

HM3 (ésta en realidad es un conjunto de heurísticas) Dada una reacción en una forma incompleta y no balanceada, use la heurística balance listada abajo para intentar balancearla.

Reglas aplicables en niveles de abstracción correspondientes a grupos simples y compuestos:

B1 si se conoce el coeficiente de una sustancia en la reacción, entonces convierta el grupo contenido en la sustancia en GRUPOS FLOTANTES.

B2 si ninguna otra regla es aplicable, cambie el nivel de abstracción.

B3 cancele grupos iguales sobre lados izquierdos y derechos.

B4 Si una sustancia sobre un lado tiene un grupo A, y no hay un grupo flotante A del mismo lado, y hay cierto número de grupos flotantes

A sobre el otro lado de la reacción, entonces determine el coeficiente de la sustancia por una simple confrontación.

B5 Si hay grupos flotantes A sobre el otro lado, y no hay reactante teniendo A del otro lado cuyo coeficiente no es conocido, y una de las otras sustancias presente tiene el grupo A, entonces conjeture esta sustancia como el posible reactante de la reacción.

Reglas aplicables a nivel atómico de abstracción:

B6 Si los coeficientes de una sustancia en la reacción es conocida, entonces convierta los átomos de la sustancia en ATOMOS FLOTANTES.

B7 Si ninguna otra regla es aplicable y la reacción no está balanceada, entonces concluya que la reacción no puede ser balanceada.

B8 Cancele átomos idénticos del lado izquierdo y derecho.

B9 Si la sustancia de un lado tiene un átomo A y no hay átomos flotantes A sobre el mismo lado, y hay un cierto número de átomos flotantes A sobre el otro lado de la reacción, entonces determine el coeficiente de la sustancia por simple match.

B10 Si hay átomos flotantes de A sobre ambos lados, y no hay reactantes teniendo a A del otro lado cuyo coeficiente no es conocido, y una de las sustancias presente tiene átomo A, entonces conjeture a esta sustancia como el posible reactante de la reacción e intente balancear esta reacción.

B11 Si puede dar cuenta de ambos lados a nivel atómico, entonces la reacción es balanceada.

HM4 Si la cantidad de esfuerzo gastado sobre la hipótesis existencial alcanza un alto valor especificado haga a la hipótesis inactiva.

HM5 Si el número de experimentos que falsifican una hipótesis dada alcanza un alto valor especificado, haga la hipótesis inactiva.

HM6 Si mediante experimentos se encuentra que la fuente de un grupo de elementos G es la sustancia A, entonces elimine la hipótesis de que cualquier otra sustancia dona al grupo G, y cree una indicación de que A dona G.

CF1 Si hay una hipótesis que A produce C con B como un intermediario, y si los experimentos muestran que la producción de B es más baja que la de A, entonces incremente el fracaso implicado de la hipótesis en 1; de otro modo incremente el éxito implicado en 1.

CF2 Si hay una hipótesis que A y B reaccionan conjuntamente para producir C, y A y B conjuntamente no producen más output que A o B individualmente, entonces incremente el fracaso implicado en 1, de otro modo incremente el éxito implicado en 1.

CF3 El slot esfuerzo fracasado en el slot confianza almacena la cantidad de esfuerzo gastado sobre la hipótesis o un problema.

CF4 Si hay una hipótesis que una reacción tomará el lugar bajo ciertas condiciones y hay resultados positivos del experimento bajo las condiciones, entonces el slot fracaso incrementa en 1.

HSC1 Si no se elige ninguna hipótesis para consideración, entonces evalúe las alternativas y elija una de ellas de acuerdo a las reglas de toma de decisiones.

HSC2 Si la estrategia elegida es estudiar un subproceso en detalles, entonces elija uno de los subprocesos a estudiar usando el tomador de decisiones.

Categorías de heurística	Independiente del dominio	nro	Específica del dominio	nro
Elegidores de problemas	PC-8	9		
Generadores de problema	PG1	1		
Tomadores de decisiones	DM1-4	4	DM5-10	6
Proponentes de experimentos	EP1, EP6, EP7	3	EP2-5, EP8	5
Establecedoras de expectativas	ES1-4	4		
Generadoras de hipótesis	GH1,3,8	3	HG2,4,5,6,7	5
Modificadoras de hipótesis	HM4-5	2	HM1-3, B1-11, HM6	15
Modificadoras de confianza	CF3, CF4, CF5	3	CF1,2	2
Electoras de hipótesis/estrategias	HSC1, HSC2	2		
Conocimiento de fondo			Específico del dominio	
<b>TOTAL</b>		31		33

**Tabla 10**

La heurística u operador E1 claramente muestra que en este programa no se realizan experimentos, sino que le son requeridos al usuario, quien una vez realizados ingresa los resultados al sistema.

Como también puede apreciarse, la base del programa gira en torno a posibles resultados sorprendentes y al hecho que el tipo de actividad involucrada en el descubrimiento del ciclo de la ornitina permite trabajar con modificaciones de combinaciones que transforman al proceso de descubrimiento en un proceso de tipo correctivo.

Los pasos que hacen los usuarios en la simulación del descubrimiento de Krebs han merecido fuertes críticas en la discusión sobre el tema. Particularmente en los siguientes puntos:

a) El usuario decide estudiar la hipótesis que la fuente de grupo  $\text{NH}_2$  en urea es amoníaco. (Kulkarni & Simon, 1988: 163)

b) El usuario elige estudiar la reacción relacionada: reacción arginina. (Kulkarni & Simon, 1988: 163)

c) Elegir la posibilidad que la ornitina sea un catalítico (Kulkarni & Simon, 1988: 164).

Para GraBhoff y May (1995: 56) estas pocas elecciones son, junto con el descubrimiento del efecto ornitina, los pasos más importantes en la historia del descubrimiento. La crítica que hacen estos autores no sólo se queda ahí, señalan que si bien Kulkarni y Simon justifican esta elección basados en la elección que tomó Krebs en su reconstrucción del caso; no hacen justicia a cómo efectivamente fue este procedimiento. Krebs es cierto que dudó, pero elaboró varios caminos o vías alternativas que no están reflejadas en el programa. Según estos autores, deberían haber incluido estas alternativas y mostrar los distintos efectos sobre la dirección posterior del experimento o haber optado por una opción como lo hizo Krebs.

Otra crítica se basa en el rechazo de que “la ornitina es una fuente del nitrógeno-urea” y de “generar la hipótesis de que es un proceso catalítico” Esta hipótesis es generada en KEKADA por la siguiente regla: Si una reacción produce alguna salida, cree la hipótesis afirmando que el reactante dona aquel grupo a la sustancia de salida y que el reactante podría ser un catalítico. Según GraBhoff y May, esta regla sólo se ejecuta luego de que se descubre el efecto de la ornitina, creando varias explicaciones posibles a la sorpresa generada por la tasa de producción de urea. KEKADA no sólo genera esta hipótesis sino también la hipótesis que el amoníaco es un catalítico (que es absurdo a la luz de la bioquímica). No hay evidencia de que Krebs consideró la posibilidad de una reacción catalítica en aquel estadio. La consideró sólo en un estadio posterior, luego de otros resultados experimentales y de su infructuoso intento de ajustar esto dentro del modelo de reacción. Comentó

posteriormente que había sido “realmente ciego a lo obvio”, pero esto era obvio sólo con una mirada retrospectiva. Pero HG4 genera esta hipótesis rutinariamente. Esto trivializa el descubrimiento. (GraBhoff & May 1995: 56)

Si bien dicen que,

- 1) es una mejor estrategia determinar primero el ámbito del fenómeno y luego pensar sobre los mecanismos específicos de reacción. (Kulkarni & Simon, 1988: 168)
- 2) Krebs consideró la posibilidad de una reacción catalítica después de que se dio cuenta de que el efecto era específico.
- 3) En KEKADA sólo luego de la fase de determinar el alcance de esta enzima produce algunas vías de reacción, entre ellas una acción catalítica de la ornitina o de amoníaco. (Kulkarni & Simon, 1988: 169)

Krebs no generó una hipótesis catalítica hasta que tuvo evidencia específica. Por lo tanto, la presentación del KEKADA de la tediosa derivación de la función catalítica de la ornitina es histórica y sistemáticamente falsa. (GraBhoff & May, 1995: 57).

El gran espacio de datos donde se encuentra la hipótesis catalítica hace que la elección de hipótesis sea esencial. Kulkarni y Simon no explican esta elección.

El diseño experimental del KEKADA no se ajusta al estilo de Krebs.

La hipótesis catalítica llega en un modo rutinario, sólo como una vaga posibilidad (a la par con la hipótesis que el amoníaco es un catalítico) en un espacio de hipótesis que puede ser muy grande con ninguna evidencia a su favor. Supongamos por un momento que hubiera una descripción correcta del caso histórico, entonces, si uno quiere explicar por qué Krebs procedió como lo hizo, se hace crucial especificar las razones que llevaron a Krebs a señalar esta hipótesis y no una diferente. Esto revela un punto metodológico general. Si uno configura un espacio de hipótesis que contenga todos los posibles caminos de

reacción, el problema de alcanzar la hipótesis correcta en el espacio se hace más fácil, pero la evaluación más difícil. Esto significa que las heurísticas de la elección de hipótesis se hacen cruciales. Pero como hemos visto, Kulkarni y Simon no hacen un intento de explicar esta elección.

Diseño experimental:

El diseño experimental de Kulkarni y Simon es diferente del de Krebs; la heurística de proponer experimentos no parece requerir que haya un caso control. En lugar de esto, los experimentos son evaluados comparando los resultados al resultado medio de todos los experimentos similares. No sabemos si esto significa un reemplazo al caso control (esto sería inadecuado históricamente y un error metodológico) o si el programa de algún modo abstrae la necesidad de hacer un experimento control.

En síntesis, no es históricamente adecuado y es una mala reconstrucción de las estrategias de experimentación de Krebs. (GraBhoff & May, 1995: 57)

### ***13. El sistema CDP.***

Genera una teoría cualitativa sobre sistemas causales complejos y trabaja en un proceso iterado de generación de hipótesis empíricas planificando, ejecutando y evaluando experimentos simulados. Es una metodología adecuada para dominios que contienen un gran número de causas potenciales que puedan ser descritas cualitativamente. El modelo genera una teoría cualitativa de sistemas causales completa y correcta.

## Bibliografía

- Agassi, J. (1993). "Heuristic Bent". *Philosophy and Rhetorics*, 26, 9-31.
- Ahumada, J., Velasco, M., & García, P. (2000). *Heurísticas: Desde la inteligencia artificial a la filosofía de la ciencia*. Presented at the Primer Congreso Iberoamericano de Filosofía de la Ciencia y la Tecnología, Morelia, México.
- Bailey, D., & Girgensohn, R. (2003). *Mathematics by Experiment: Plausible Reasoning in the 21st Century*. Con acceso el 30-11-2003, URL: <http://crd.lbl.gov/~dhbailey/expmath/expbook-C.pdf>.
- Beasley, J. (1999). *Population Heuristics*. Imperial College. Londres.
- Belnap, N., & Steel, T.B. (1976). *The Logic of Questions and Answers*. Yale University Press.
- Best, B., & Simon, H. (2000). "Simulating Human Performance on the Traveling Salesman Problem" En N. Taatgen & J. Aasman (Eds.), *Proceedings of the Third International Conference on Cognitive Modeling* (pp. 42-49). Groningen, Netherlands: Universal Press.
- Brabeck, M. M., & Wood, P. K. (1990). "Cross-sectional and Longitudinal Evidence for difference Between Well-structured and Ill-structured Problem Solving Abilities" En M. L. M. L. Commons, C. C. Armon, Kohlberg, F. Richards, T. A. Grotzer & J. Sinnott (Eds.), *Adult development 2: Models and methods in the study of adolescent and adult thought* (pp. 133-146). Praeger.

- Bradshaw, G. L., Langley, P., & Simon, H. (1980). "BACON.4: The Discovery of Intrinsic Properties" En *Proceedings of the Third National Conference of the Canadian Society for Computational Studies of Intelligence*. Victoria, British Columbia.
- Burns, B., & Vollmeyer, R. (2000). "Problem Solving: Phenomena in Search of a Thesis" En *Twenty Second Annual Meeting of the Cognitive Science Society*. Con acceso el 30-11-2003 URL: [http://www.ircs.upenn.edu/cogsci2000/PRCDNGS/SPRCDNGS/posters/bur\\_vol.pdf](http://www.ircs.upenn.edu/cogsci2000/PRCDNGS/SPRCDNGS/posters/bur_vol.pdf).
- Campbell, D. T. (1974). "Evolutionary Epistemology" En P. Schilpp (Ed.), *The philosophy of Karl R. Popper* (pp. 412-463). LaSalle, IL: Open Court.
- Campbell, D. T. (1987). "Blind Variation and Selective Retention in Creative Thought and Other Knowledge Processes" En G. Radnitzky & W. Bartley (Eds.), *Evolutionary epistemology, theory of rationality, and the sociology of knowledge* (pp. 91-114). Open Court.
- Crick, F., & Koch, C. (1990). "Towards a Neurobiological Theory of Consciousness". *Seminars in the Neurosciences*, 2, 263-275.
- Davis, R., & Lenat, D. (1982). *Knowledge-Based Systems in Artificial Intelligence*. McGraw-Hill.
- Dennett, D. (1989). "Review of Penrose, The Emperor's New Mind" *The Times Literary Supplement*.
- Dewey, J. (1910). *How We Think*. Heath, Boston.
- Dunbar, K. (1995). "How Scientifics Really Reason: Scientific Reasoning in Real-World Laboratories" En R. Sternberg & J. Davidson (Eds.), *Mechanisms of insight* (pp. 365-395). M.I.T. Press.
- Dunbar, K. (1999). "Scientific Thinking and its Development" En R. Wilson & F. Keil (Eds.), *The MIT Encyclopedia of Cognitive Science* (pp. 730-733). MIT press.

- 
- Dunbar, K. (2001). "The Invivo/Invitro Approach to Cognition: The Case of Analogy" *Trends in Cognitive Science*, 5, 334-339.
- Duncker, K. (1945). *On problem-solving*. Westport, Conn.: Greenwood Press.
- Falkenhainer, B., & Michalski, R. (1986). "Integrating Quantitative and Qualitative Discovery. The ABACUS System" En *Machine Learning* (pp. 367-401). Kluwer.
- Feigenbaum, E. A. (1963). *Computers and thought*. McGraw-Hill.
- Feigenbaum, E. A. (1989). "What Hat Simon Wrought?" En D. Klahr, & K. Kotovsky (Eds.), *Complex Information Processing. The Impact of Herbert Simon*. Lawrence Erlbaum.
- Forbus, K. D. (1984). "Qualitative Process Theory" *Artificial Intelligence*, 24(85-168).
- Garey, M., & Johnson, D. (1979). *Computers and Intractability: A guide to the Theory of NP-Completeness*. W.H. Freeman and Company.
- Gerwin, D. (1974). "Information Processing, Data Inferences, and Scientific Generalization". *Behavioral Science*, 19(5), 314-325.
- Giere, R. N. (1988). *Explaining science a cognitive approach*. Chicago: University of Chicago Press.
- Gilhooly, K. (1989). *Human and Machine Problem Solving*. Plenum Press.
- Glymour, C. (1980). *Theory and Evidence*. Princeton. Princeton University Press.
- Glymour, C., Kelly, K., & Spirtes, P. (1991). "Artificial Intelligence and Hard Problems" En R. Cummins (Ed.), *Philosophy and AI*. MIT-Pr Cambridge.
- Gorman, M. (1998). *Transforming Nature*. Kluwer.

- 
- GraBhoff, G., & May, M. (1995). *From Historical Case Studies to Systematic Methods of Discovery* (AAAI Spring Symposium Series "Systematic Methods of Discovery"). AAAI Press (46-57).
- Graham, S., Joshi, A., & Pizlo, Z. (2000). "The Traveling Salesman Problem: A Hierarchical Model" *Memory & Cognition*, 28, 1191-1204.
- Hacking, I. (1981). "Lakatos's Philosophy of Science" En I. Hacking (Ed.), *Scientific Revolutions*. Oxford University Press.
- Hattiangadi, J. (1978). "The Structure of Problems, Part I". *Philosophy of the Social Sciences*, 8, 345-365.
- Hattiangadi, J. (1979). "The Structure of Problems, Part II" *Philosophy of the Social Sciences*, 9, 49-76.
- Haugeland, J. (1988). *La Inteligencia Artificial*. Siglo XXI.
- Hayes, J. (1989). *The Complete Problem Solver*. L. Erlbaum Associates.
- Hesse, M. (1992). "Comment on Herbert Simon: 'Scientific Discovery as Problem Solving'" *International Studies in the Philosophy of Science.*, VI, 33-34.
- Hoffman, A., & Wolfe, P. (1985). "History" En E. Lawer, J. Lenstra, A. Rinnoy Kan & D. Shmoys (Eds.), *The Traveling salesman problem* (pp. 1-16). Wiley & Sons.
- Hofstadter, D. (1995). *Fluid Concepts & Creative Analogies*. Basic Books.
- Holmes, F. (1980). "Hans Krebs and the Discovery of the Ornithine Cycle" En *Proceeding 63rd Annual Meeting of the Federation of American Societies for Experimental Biology* (Vol. 39, pp. 216-225).
- Hong, N. (1998). *The relationship between well-structured and ill-structured problem solving in multimedia simulatio.*, College of Education, The Pennsylvania State University.

- Hunt, E. (1994). "Problem Solving". En R. Sternberg (Ed.), *Thinking and Problem Solving* (pp. 215-232). Academic Press.
- Ibarra, A., & Mormann, T. (1997). *Representaciones en la ciencia*. Ediciones del bronce.
- Jacobs, S. (2001). "Limits to Problem Solving in Science". *International Studies in the Philosophy of Science.*, 15(3), 231-242.
- Johnson, D., & Papadimitriou, C. (1985). "Computational Complexity" En E. Lawer, J. Lenstra, A. Rinnoy Kan & D. Shmoys (Eds.), *The Travelling Salesman Problem* (pp. 37-85). Wiley & Sons.
- Johnson-Laird, P., & Legrenzi, P. (1992). "Science as Heuristic Search: Some Comments on Simon's Theory" *International Studies in the Philosophy of Science.*, VI, 35-39.
- Kantorovich, A. (1993). *Scientific discovery logic and tinkering*. SUNY series in philosophy and biology). Albany: State University of New York Press.
- Kaplan, C., & Simon, H. (1990). "In search of insight" *Cognitive Psychology*, 22, 374-419.
- Karp, P., Ourzoumi, C., & Paley, S. (1996). HinCyc: "A Knowledge Base of the Complete Genome and Metabolic Pathways of *H. influenzae*" En D. States, P. Agarwal, T. Gaasterland, L. Hunter & R. Smith (Eds.), *ISMB-96: Proceedings of the Fourth International Conference on Intelligent Systems for Molecular Biology* (pp. 116-124). AAAI Press.
- Kelly, K. (2000). "Naturalism Logicized" En R. Nola & H. Sankey (Eds.), *After Popper, Kuhn and Feyerabend: Current Issues in Scientific Method* (pp. 177-210). Kluwer.
- Kelly, K. T. (1987). "The Logic of Discovery" *Philosophy of Science. Philosophy of Science*, 54, 435-452.
- Kelzo, J. A. S. (1997). *Dynamic Patterns. The self-organization of brain and behavior*. MIT Press.

- Kitchener, K. S., & King, P. M. (1981). "Reflective judgment: Concepts of Justification and their Relationship to Age and Education" *Journal of Applied Developmental Psychology*, 2, 89-116.
- Klahr, D. (2000). *Exploring science the cognition and development of discovery processes*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Klahr, D., & Simon, H. A. (1999). "Studies of Scientific Discovery: Complementary Approaches and Convergent Findings" *Psychological Bulletin*, 125(5), 524-543.
- Kleiner, S. A. (1993). *The logic of discovery a theory of the rationality of scientific research*. Synthese library). Dordrecht Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Koertge, N. (2003). *The Importance of Scientific Problems*.
- Koza, J. (1992). *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*. MIT Press.
- Koza, J. (1994). *Genetic programming II: Automatic discovery of reusable programs*. MIT Press.
- Kubie, L. (1958). *The Neurotic Distortion of the Creative Process*. University of Kansas Press.
- Kuhn, T. (1971). *La Estructura de las Revoluciones Científicas*. Fondo de Cultura Económica.
- Kuhn, T. S. (1977). *The Essential Tension Selected Studies in Scientific Tradition and Change*. Chicago: University of Chicago Press.
- Kulkarni, D., & Simon, H. (1988). "The Processes of Scientific Discovery: The Strategy of Experimentation" *Cognitive Science*, 12, 139-175.
- Laird, J. (1993). "Extending Problem Spaces to External Environments" En P. Resenbloom, J. Laird & A. Newell (Eds.), *The Soar Papers: Research on Integrated Intelligence (Volume 2)* (pp. 1294-1308). M.I.T. Press.

- Langley, P. (1979). "Rediscovering Physics With BACON.3" En *Proceedings of the Sixth International Joint Conference on Artificial Intelligence* (Vol. 1). Tokyo: Morgan Kaufmann.
- Langley, P., Simon, H., Bradshaw, G. L., & Zytkow, J. (1987). *Scientific discovery: Computational explorations of the creative processes*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Langley, P., Bradshaw, G. L., & Simon, H. (1981). "BACON.5: The Discovery of Conservation Laws" En *Proceedings of the Seventh International Joint Conference on Artificial Intelligence*. Vancouver, British Columbia: Morgan Kaufmann.
- Langley, P., & Zytkow, J. (1989). "Data-driven Approaches to Empirical Discovery". *Artificial Intelligence*, 40, 238-312.
- Laudan, L. (1978). "Why Was the Logic of Discovery Abandoned?" En T. Nickles (Ed.), *Scientific Discovery, Logic and Rationality* (pp. 173-184) [Contribution]. REIDEL DORDRECHT, 1978.
- Laudan, L. (1977). *Progress and its problems toward a theory of scientific growth*. Berkeley: University of California Press.
- Laudan, L. (1996). *Beyond positivism and relativism theory, method, and evidence*. Boulder, CO: Westview Press.
- Lea, G., & Simon, H. (1974). "Problem Solving and Rule Induction: A Unified View" En W. Gregg (Ed.), *Knowledge and cognition* (p. Chap. 5). Potomac, MD: Erlbaum.
- Lee, R. (1985). *A Heuristic Approach to the Travelling Salesman* (University of Victoria. School of Public Administration).
- Lenat, D. (1977). "On Automatic Scientific Theory Formation: A Case Study Using the AM Program" J. Hayes, D. Michie & L. Mikulich (Eds.). *Machine Intelligence* Halsted.
- Lêwicki, P., & Hill, T. (1987). "Unconscious Processes as Explanations of Behavior in Cognitive, Personality, and Social Psychology" *Personality and Social Psychology Bulletin*, 13, 355-362.

- MacGregor, J., & Ormerod, T. (1996). "Human Performance on the Travelling Salesman Problem" *Perception & Psychophysics*, 58(4), 527-539.
- MacGregor, J., Ormerod, T., & Chronicle, E. (1999). "Spatial and Contextual Factors in Human Performance on the Travelling Salesperson Problem". *Perception*, 28, 1417-1427.
- Marconi, D. (1992). "Planetary Systems and Pomegranites: Doubts about Simon's Essay" *International Studies in the Philosophy of Science*, VI, 45-47.
- Marr, D. (1977). "Artificial Intelligence: A Personal View". *Artificial Intelligence*, 9, 37-48.
- Martínez, S. (2000). "El Concepto de Heurística" En A. Velasco Gomez (Ed.). *El Concepto de Heurística en la Ciencias y las Humanidades*. Siglo XXI.
- Meheus, J., & Batens, D. (1996). "Steering Problem Solving between Cliff Incoherence and Cliff Solitude". *Philosophica*, 58, 153-187.
- Metcalfe, J. (1986). "Feeling of Knowing in Memory and Problem Solving" *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 12, 288-294.
- Miller, G. (1956). *The Psychological Review*, 63, 81-97.
- Milosavljevic, A. (1995/1996). "The Discovery Process as a Search for Concise Encoding of Observed Data" *Foundations of Science*, 1, 212-218.
- Mines, R. A., King, P. M., Hood, A. B., & Wood, P. K. (1990). "Stages of Intellectual Development and Associated Critical Thinking Skills in College Students" *Journal of College Students Developments*, 31, 537-547.
- Morales, E. (2001). *AM (Lenat '79)*. Con acceso el 22/8/02, URL: <http://dns1.mor.itesm.mx/~emorales/Cursos/KDD01/node12.html>

- 
- Nersessian, N. J. (2002). "Kuhn, Conceptual Change, and Cognitive Science" En T. Nickles (Ed.), *Thomas Kuhn*. Cambridge University Press.
- Newell, A., & Shaw, J. (1957). "Programming the Logic Theory Machine" En *Proceedings of the 1957 Western Joint Computer Conference* (pp. 230-240). Institute of Radio Engineers.
- Newell, A., Shaw, J., & Simon, H. (1958). "Elements of Theory of Human Problem Solving". *Psychological Review*, 65.
- Newell, A., Shaw, J., & Simon, H. (1959). *The Processes of Creative Thinking*. Rand Corporation Paper.
- Newell, A., & Simon, H. (1976). "Computer Science as Empirical Inquiry: Symbols and Search" *Communications of the ACM*, 19, 113-126.
- Newell, A. (1981). "Duncker on Thinking: An Inquiry into Progress in Cognition" En S. Koch & D. Leary (Eds.), *A Century of Psychology as Science: Retrospections and Assessments*. McGraw-Hill.
- Newell, A. (1994). *Unified Theories of Cognition*. Harvard University Press.
- Newell, A., & Simon, H. A. (1972). *Human problem solving*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall.
- Newell, A., Shaw, J., & Simon, H. A. (1960). "Report on a General Problem-solving" En *Proc. Int. Conf. on Information Processing* (pp. 256-264). UNESCO.
- Newell, A., Shaw, J., & Simon, H. (1963). The Logic Theory Machine. En E. A. Feigenbaum & J. Feldman (Eds.), *Computer and Thought* (pp. 109-133). McGraw-Hill.
- Newell, A., & Simon, H. (1957). "Empirical Explorations of the Logic Theory Machine: A Case Study in Heuristics" En *Proceedings of*

- the Western Joint Computer Conference* (pp. 218-230). Institute of Radio Engineers.
- Nickles, T. (1981). "What is a Problem that we May Solve It?" *Synthese*, 47, 85-118.
- Nickles, T. (2003). "Evolutionary Models of Innovation and the Meno Problem" En L. Shavinina (Ed.), *The International Handbook on Innovation*. Elsevier.
- Nordhausen, B., & Langley, P. (1990). "A robust approach to numeric discovery" En *Proceedings of Seventh International Conference on Machine Learning* (pp. 411--418). Morgan Kaufmann.
- Ormerod, T., & Chronicle, E. (1999). "Global Perceptual Processing in Problem Solving: The Case of Traveling Salesperson" *Perception & Psychophysics*, 61(6), 1227-1238.
- Pearl, J. (1984). *Heuristics: Intelligent Search Strategies for Computer Problem Solving*. Addison-Wesley.
- Penrose, R. (1989). *The Emperor's New Mind Concerning computers, Minds and the Laws of Physics*. Oxford University Press.
- Penrose, R. (1996). *Shadows of the Mind: A Search for the Missing Science of Consciousness*. Oxford University Press.
- Petroni, A. (1992). "Why have a Heuristic of Scientific Discovery?" *International Studies in the Philosophy of Science.*, VI, 53-55.
- Poincaré, H. (1913). *Mathematical Creation* (G. Bruce Halsted, Trans.). New York: The Science Press.
- Polanyi, M. (1958). *Personal Knowledge*. Harper & Row.
- Polanyi, M. (1966). *The tacit dimension.*. Garden City, N.Y. Doubleday.
- Polya, G. (1945). *How to solve it: A new aspect of mathematical method*. Princeton University Press.
- Popper, K. (1963). *Conjectures and Refutations*. Routledge and Kegan Paul.

- 
- Popper, K. (1972). *Objective Knowledge*. Oxford University Press.
- Popper, K. (2001). *All Life Is Problem Solving*. Routledge.
- Putnam, H. (1993). "Mucho ruido por muy poco" En S. Graubard (Ed.), *El Nuevo Debate sobre la Inteligencia Artificial* (pp. 306-320). Gedisa.
- Reichenbach, H. (1938) *Experience and Prediction* University of Chicago Press.
- Reitman, W. (1965). *Cognition and Thought*. Wiley.
- Root-Bernstein, R. (1989). *Discovering: Inventing and Solving Problems at the Frontiers of Scientific Knowledge*. Harvard University Press.
- Schön, D. (1990). "The Design Process" En V Howard (Ed.), *Varieties of thinking: Essays from Harvard's philosophy of education center* (pp. 110-141). Routledge.
- Schulte, O. (1999). "Means-Ends Epistemology" *British Journal for the Philosophy of Science.*, 50, 1-31.
- Schunn, C., & Klahr, D. (1995). "A 4-Space Model of Scientific Discovery" En R. Valdes-Perez (Ed.), *Systematic Methods of Scientific Discovery* (pp. 40-45). The AAAI Press.
- Searle, J. (1994). *Rediscovery of Mind*. MIT Press.
- Shank, R., & Hughes, L. (1992). *International Studies in the Philosophy of Science.*, VI, 57-59.
- Shanker, S. (1998). *Wittgenstein's Remarks on the Foundations of AI*. Routledge.
- Simon, H. (1977). *Models of Discovery*. Reidel.
- Simon, H. (1973). "Does Scientific Discovery Have a Logic". *Philosophy of Science.*, 40, 471-480.
- Simon, H. (1977). "Discussion: The Meno Paradox" (pp. 338-341). Reidel.

- 
- Simon, H. (1981). *The sciences of the artificial* (2d ed., rev. and enl.). Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Simon, H. (1983). *Reason in human affairs*. Harry Camp lectures at Stanford University). Stanford: Stanford University Press.
- Simon, H. (1992a). "Scientific Discovery as Problem Solving" *International Studies in the Philosophy of Science.*, 6(1), 3-14.
- Simon, H. (1992b). "Scientific Discovery as Problem Solving: Reply to Critics". *International Studies in the Philosophy of Science.*, 6(1), 69-88.
- Simon, H. (1995/1996). "Machine Discovery" *Foundations of Science*, 2, 171-200.
- Simon, H. (1998). "Discovering Explanations" *Minds and Machines.*, 8(1), 7-37.
- Simonton, D. K. (1999). *Origins of genius. Darwinian perspectives on creativity*. New York: Oxford University Press.
- Sinnott, J. D. (1989). "A Model for Solution of Ill-structured Problems: Implications for Everyday and Abstract Problem Solving" En J. Sinnott (Ed.), *Everyday problem solving: Theory and applications*.
- Tabachneck-Schijf, H., Leonardo, A., & Simon, H. (1997). "CaMeRa: A Computational Model of Multiple Representations" *Cognitive Science*, 21, 305-350.
- Thagard, P. (1988) *Computational Philosophy of Science*. Mit Press.
- Thagard, P. (1989). "Explanatory Coherence" *Behavioral and Brain Science*, 12, 435-467.
- Thagard, P. (1992). *Conceptual Revolutions*. Princeton University Press.
- Thagard, P. (1998a). "Ulcers and bacteria I: Discovery and Acceptance" *Studies in History and Philosophy of Science Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 29, 107-136.

- Thagard, P. (1998b). "Ulcers and bacteria II: Instruments, Experiments, and Social Interactions" *Studies in History and Philosophy of Science Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 29, 317-342.
- Valdes-Perez, R. (1994). "Heuristics for Systematic Elucidation of Reaction Pathways" *Journal of Chemical Information and Computer Sciences*, 34(4), 976-983.
- van den Bosch, A. (1999). "Inference to the Best Manipulation - A Case Study of Qualitative Reasoning in Neuropharmacy" *Foundations of Science* 4 (4). Special issue on Scientific Discovery and Creativity: Case studies and computational approaches. *Foundations of Science*, 4(4).
- Velasco, M., García, P., & Ahumada, J. (1999). "Heurísticas como regla, como conocimiento y como representación" En *Actas de las V Jornadas de Epistemología de las Ciencias Económicas* (pp. 107-110). Facultad de Ciencias Económicas. Universidad de Buenos Aires.
- Vera, A., & Simon, H. (1993). "Situated action: A symbolic interpretation" *Cognitive Science*, 17, 748.
- Wang, H., Johnson, T., & Zhang, J. (1998). "Echo: A model of Uncertainty Management in Human Abductive Reasoning" En M. Gernsbacher & S. Derry (Eds.), *Proceedings of the Twentieth Annual Meeting of the Cognitive Science Society* (pp. 1113-1118). Lawrence Erlbaum.
- Wason, P. (1960). "On the Failure to Eliminate Hypotheses in a Conceptual Task" *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 12, 129-140.
- Wolfram, S. (2002). *A New Kind of Science*. Wolfram Media.
- Wolpert, D., & Macready, W. (1995). "No Free Lunch Theorems for Search" En *Working Papers 95-02-010*. Con acceso el 12/2/2002  
Santa Fe Institute: URL:

<http://www.santafe.edu/sfi/publications/Working-Papers/95-02-010.ps>.

- Wolpert, D., & Macready, W. (1997). "The No Free Lunch Theorems For Optimization". *IEEE Trans.Evol.Comp*, 1(1), 67-82.
- Wood, P. K., & Games, P. (1991). "Rationale, Detection and Implications of Interactions between Independent Variables and Unmeasured Variables in Linear Models". *Multivariate Behavioral Research*, 25, 295-231.
- Zhang, J. (1997). "The Nature of External Representation in Problem solving" *Cognitive Science*, 21(2), 179-217.
- Zhang, J. (2000). "External Representations in Complex Information Processing Tasks" En A. Kent (Ed.), *Encyclopedia of Library and Information Science* (pp. 164-180). Marcel Dekker.
- Zhang, J., & Norman, D. (1994). "Representations in Distributed Cognitive Tasks" *Cognitive Science*, 18, 87-122.
- Zytkow, J., Zhu, J., & Hussam, A. (1990). "Automated Discovery in a Chemistry Laboratory" En *Proceedings of the Eighth National Conference on Artificial Intelligence* (pp. 889-894). AAAI Press.