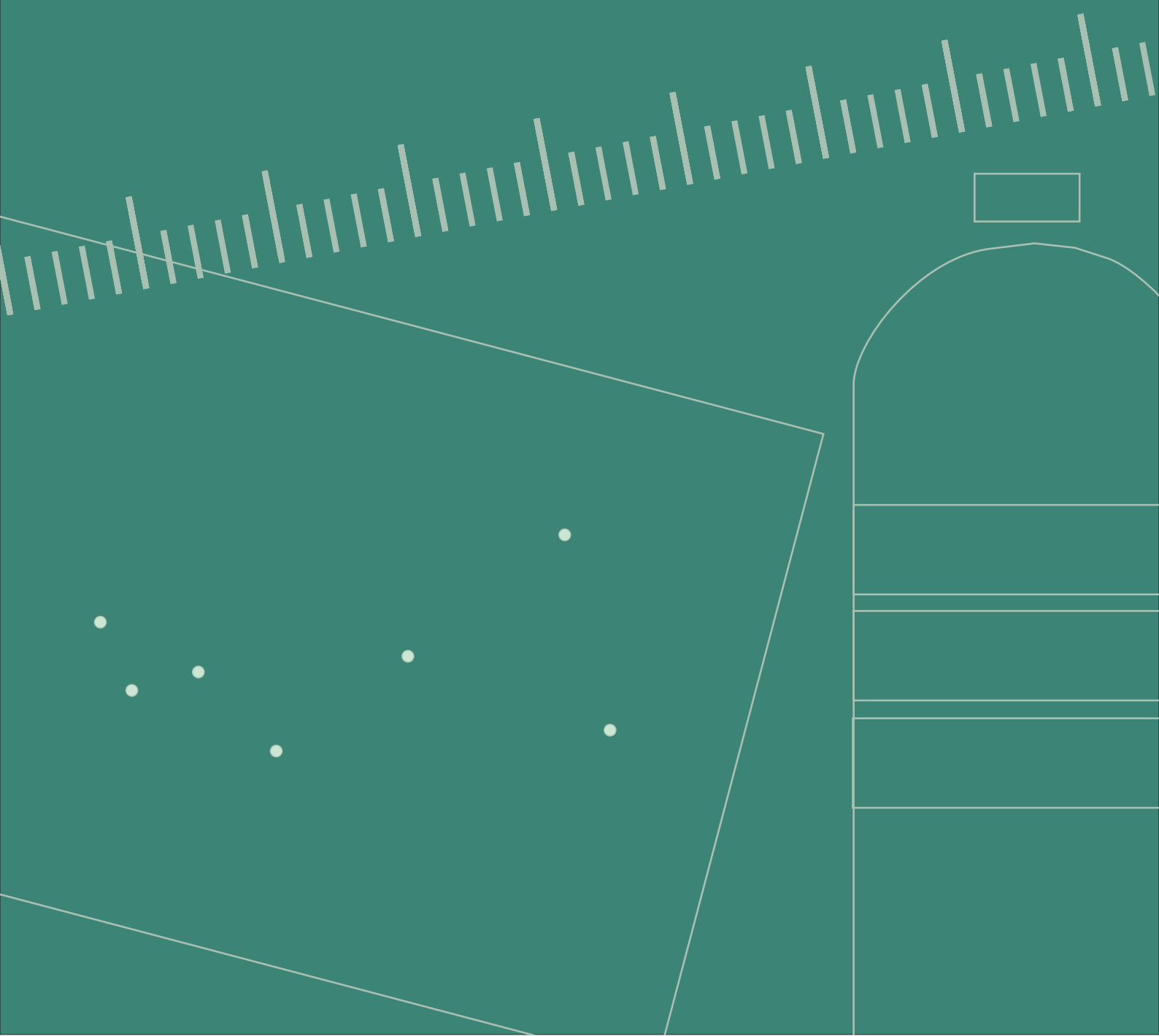


METODOLOGIA



2. METODOLOGÍA

El enfoque metodológico general está basado en la convergencia de evidencias, siendo necesario que más de un indicador específico converja en una hipótesis para que ella se convierta en la más plausible.

Cuanto más diversos sean los campos del conocimiento involucrados, más plausibles y sostenibles serán las conclusiones a las cuales se arribe.

Este camino metodológico crítico resulta especialmente apto para aquellas investigaciones en las cuales el sujeto es dinámico, como en este caso el agua subterránea (Hernández y González 1990).

En este apartado se presentan todos los procedimientos metodológicos adoptados y las técnicas utilizadas para alcanzar los resultados que se exponen en el capítulo siguiente, algunos de los cuales han surgido precisamente de la investigación.

Con el fin de no abundar en repeticiones ociosas, la descripción se estructura de la siguiente manera: una primera parte general donde se describen los pasos metodológicos comunes a más de una temática y una segunda donde se detallan las específicas a de cada una.

2.1. Metodología General

2.1.1. Recopilación de antecedentes

El primer paso metodológico consistió en la localización, revisión crítica y transferencia de la información antecedente (cartográfica, bibliográfica temática y regional, referencial, datos puntuales), para conformar un Base de Datos para la ulterior pre-elaboración que sirvió para orientar los trabajos, fundamentalmente los de campo.

2.1.2. Generación de cartografía básica y Sistema de Información Geográfico

Para la preparación de la cartografía básica se utilizaron las hojas topográficas escala 1:100.000 del Instituto Geográfico Militar (IGM), fotografías aéreas escala 1:60.000 e imágenes satelitales LANDSAT 7 (227/90 y 227/90 del 26 de agosto de 1999).

Las cartas topográficas fueron transferidas a formato digital mediante el empleo de un escáner de rodillo y georeferenciadas con el programa ER Mapper de manera de poder generar con este mismo software, un mosaico topográfico georeferenciado para toda el

área. Seguidamente se digitalizaron las curvas de nivel a fin de poder generar un modelo digital de elevación del terreno (DEM).

Las Imágenes Landsat se procesaron con el código ER Mapper, creándose distintos algoritmos para las diferentes combinaciones de bandas, que luego fueron fusionadas con la pancromática a fin de aproximar una definición espacial de 15m.

Se utilizó el software Mapinfo 8.0 para la generación de un Sistema de Información Geográfico (SIG) que permitió incorporar todos los datos espacializables, ya sean los crudos, como procesados expresamente en esta investigación.

El SIG es una herramienta altamente especializada que permite hacer un manejo organizado y de fácil acceso a diferentes tipos de información espacial. Se maneja tanto información gráfica (datos vectoriales y raster) como numérica (tablas de atributos) permitiendo asociar objetos representados espacialmente (layers o capas temáticas) con atributos cualitativos o cuantitativos. Mediante los Sistemas de Información Geográfica se llevan a cabo modelos o representaciones del mundo real, a partir de datos geográficos de localización cierta y mensurable.

Los mapas digitales que se construye con base SIG no presentaron dificultad para manipular información en diferentes escalas o sistemas de referencia.

La información geográfica se guarda en dos formatos básicos que parten de dos modelos diferentes: el vectorial y el Raster. El primero utiliza puntos, líneas y polígonos para representar las observaciones, presuponiendo que la información es constante dentro de los límites que fijan los objetos.

El raster trata a la información como continua, distribuida sobre todo el territorio dividiéndola en celdas individuales (píxeles), cada una de las cuales tiene un valor discreto.

De este modo se incorporaron al SIG la imagen Landsat, la información topográfica, la hoja geológica escala 1:250.000 (Haller, *et.al.* 2001), la cartografía de suelos (Rostagno, 1981), vegetación (Bertiller, *et.al.*, 1980), los datos de clima, la información hidrológica relevada en campo (ubicación de las fuentes de agua, propiedades fisico-químicas *in situ*) y la medida en laboratorio (análisis químicos e isotópicos).

Una vez cargada en el SIG toda la información básica previamente normalizada, se confeccionó con el mismo software la cartografía que se presenta en esta tesis, haciéndose uso de las herramientas que ofrece el Mapinfo 8.0 tanto aquellas de dibujo manual para la generación de mapas vectoriales, como el interpolador *Inverse Distance Weighting* (IDW) para los mapas raster.

El IDW utiliza un algoritmo simple basado en distancias y asume que las predicciones son una combinación lineal de los datos (Gotway *et.al.*; 1996, Schloeder *et.al.*, 2001), como lo muestra la ecuación:

$$Z(S_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(S_i) \quad i = 1, \dots, n$$

Dónde $Z(S_0)$ es el valor estimado en el punto interpolado $Z(S_0)$; n es el número de observaciones vecinas usadas para la estimación y λ_i es el peso dado al valor observado $Z(S_i)$ en las cercanías del valor S_0 (Lozano *et al.* 2004).

IDW calcula el peso de los valores de acuerdo a la relación inversa de la distancia (Schloeder *et al.* 2001) con la ecuación:

$$\lambda_i = \frac{[d(S_i, S_0)]^{-p}}{\sum_{i=1}^n [d(S_i, S_0)]^{-p}} \quad i = 1, \dots, n$$

Donde p es el parámetro del exponente que controla qué tan rápido los pesos de los puntos tienden a cero (al aumentar su valor) conforme aumenta la distancia del sitio de interpolación.

Cuanto mayor sea p , mayor peso es dado a los puntos más cercanos y por consiguiente se obtienen superficies más continuas o suaves y las predicciones tienden hacia el promedio de la muestra (Schloeder *et al.* 2001). Los valores p usualmente están entre 1 y 3, donde 2 es el más común (Gotway *et al.* 1996).

En las interpolaciones realizadas para esta Tesis se usó en general el valor $p=2$ y en el caso de los mapas hidroquímicos de isocontenidos iónicos, el valor de $p=3$, por ser los que mejor ajustaban a los resultados esperados.

El método IDW es similar al Kriging ordinario, ya que otorga más peso a los valores cercanos a un punto, pero posee una menor complejidad de cálculo (Villatoro, *et.al* 2008).

La técnica de interpolación mediante el inverso de la distancia combina las ideas de proximidad planteadas por el método de los polígonos de Thiessen, con los cambios graduales que se producen a partir de una superficie de tendencia (Borrough & McDonnell, 1998).

Finalmente se quiere resaltar que los procesos más importantes alcanzados con el montaje del un SIG fueron la posibilidad de realizar un análisis cruzado de toda la información espacializada y la generación de nueva mediante la aplicación de algoritmos a los datos ingresados.

2.2. Metodologías particulares

2.2.1. Hidrometeorología y Clima

2.2.1.1. Recopilación de información antecedente

Se localizaron y transfirieron los datos climatológicos procedentes del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) correspondiente a datos pluviométricos de Puerto Pirámides (1927/1955), Ea. El Salitral (1966/1995); Ea. El Trébol (1957/1977), Ea. La Adela (1912/2006), Ea. La Corona (1958/1980), Ea. La Isla (1957/1992), Ea. San Jorge (1966/1995), Ea. San Pablo (1971/1979), Ea. La Pastosa (1942/1956), Punta Delgada (1942/1968), Bahía Craker (1961/1979), Punta Lobos (1933/1955), San Pedro (1971/1992) y El Doradillo (1940/1979). Información de tipo modular mensual y seriada mensual. Los lapsos de tiempo abarcados no son coincidentes ni en cantidad de años de registro ni en periodo cubierto.

También se contó con información de la estación meteorológica del Centro Nacional Patagónico (CENPAT) ubicada en la localidad de Puerto Madryn, consistente en registros (1951/1970, 1980/2004) de precipitación pluvial, temperatura, humedad relativa y vientos (cuadrantes, velocidad y frecuencia). En todos los casos series completas (sin datos faltantes para el periodo considerado).

A continuación se procederá a la descripción detallada de la metodología usada en el tratamiento de cada una de las variables meteorológicas analizadas. El orden seguido en la descripción de las variables está directamente relacionado con el peso que tienen en el ciclo hidrológico.

2.2.1.2. Tratamiento básico de la información pluviométrica

En lo que refiere específicamente a las precipitaciones, los registros de la estación CENPAT fueron de tipo modular anual, mensual y diario, pero, ante la necesidad de densificar la información y precisar los valores, dada la incidencia de esta magnitud en una región árida, se recurrió a los datos procedentes de fuentes particulares.

Se realizó una primera selección de las estaciones a utilizar en base a la evaluación de su representatividad, extensión y garantía.

La representatividad es función de la ubicación geográfica atendiendo principalmente a la cercanía/lejanía al área de estudio. La extensión en cambio hace mención simplemente a la cantidad de datos sistemáticamente almacenados en el registro histórico, es decir a la longitud del record.

En el caso de la garantía, el análisis no es tan directo y se debió proceder a un tratamiento de análisis de la consistencia de la información mediante el método de las dobles acumulaciones (Heras, 1972).

Este método se basa en que, siendo la precipitación un fenómeno aleatorio dependiente del tiempo, la función probabilidad ajusta bien, por lo tanto, se puede estimar si existen errores en los datos iniciales mediante el contraste entre los datos base.

Representando en ejes de coordenadas las parejas de puntos definidas por las acumulaciones sucesivas de dos series de valores de un mismo periodo, la línea resultante es una recta, si los valores de las dos series son proporcionales.

Si se produce un cambio en la pendiente de la curva, es que ha ocurrido un cambio en la constante de proporcionalidad de las dos variables, o que la proporcionalidad no es constante en el proceso acumulativo. Para definir mejor la comparación, las acumulaciones de una de ellas se pueden comparar con las acumulaciones de un “grupo” de variables, para lo cual se calcula una tipo, media aritmética de las que forman el grupo, pues esta estación tipo está menos afectada por los errores que puedan existir en alguna de las variables del grupo, (Heras, 1972).

El orden seguido en la discriminación de las 15 estaciones originalmente localizadas se inició con la evaluación su representatividad y extensión, seleccionándose así 10 sitios (Puerto Madryn, Puerto Piramides, Punta Delgada, Ea. La Corona, Ea. La Adela, Ea. El Trebol, Ea. San Jorge, Ea. La Pastosa, La Isla, Ea. El Salitral) que cumplían medianamente estos requisitos y finalmente se procedió a analizar su garantía mediante el tratamiento de contrastes arriba mencionado.

Pese a tratarse de información procedente de particulares, se verificó un aceptable nivel de garantía para todas ellas.

2.2.1.3. Tratamiento estadístico

Según Chow et.al., (1994) “...El objetivo de la estadística es extraer la información esencial de un conjunto de datos, reduciendo un conjunto grande de números a un conjunto pequeño de números. Las estadísticas son números calculados de una muestra los cuales resumen sus características más importantes. Los parámetros estadísticos son características de una población...”.

Un parámetro estadístico es el valor esperado de alguna función de una variable aleatoria. En este caso, son los milímetros anuales de precipitación, donde la muestra son

los registros en un lapso de tiempo finito en una estación pluviométrica, y la población son los milímetros anuales de precipitación caídos en toda la región en un lapso dado.

Para el caso concreto de esta investigación se realizaron los cálculos de los estimadores (media, desviación estándar, varianza, rango, valor mínimo y máximo) para las 9 series pluviométricas anuales y para la serie Puerto Madryn. Dado que se contó con registros diarios de precipitación, se calcularon los estadísticos diarios y la probabilidad de ocurrencia de ciertos niveles de precipitación.

2.2.1.4. Elaboración de la información pluviométrica seriada

Análisis temporal

En los 9 sitios seleccionados se calcularon las precipitaciones medias anuales y construyeron los pluviogramas seriados. Luego se elaboraron promedios móviles de paso quinquenal, decenal y veinteñal, con el propósito de advertir las tendencias históricas y situar la condición actual.

Esta técnica consiste en promediar los valores del lapso (5, 10, 20 años respectivamente) asignando la media al primer año de la serie, para luego descartarla e incorporar la siguiente, atribuyendo ese valor al segundo año y así sucesivamente. Los pluviogramas resultantes son analíticamente útiles para mostrar las tendencias y un apoyo importante al momento de analizar las posibilidades de recarga en zonas áridas.

Por último se generó un pluviograma integrado donde se muestran juntas todas las series pluviométricas, de manera de poder visualizar los periodos de coincidencia de registro en las distintas estaciones y su comportamiento comparativo.

Análisis espacial

A partir de las medias anuales se generó el mapa pluviométrico, teniendo en cuenta que los registros debían ser contemporáneos. De esta manera se tomó el mayor número de puntos posibles para un periodo de tiempo considerable. Hay que tener en cuenta que si bien se dispone de datos de 10 sitios, éstos no pertenecen a periodos de tiempo comparables, con lo cual hubo que reducir el periodo al intervalo 1979-1992 que resultó ser el que mayor cantidad de estaciones incorporaba para un lapso de tiempo aceptable. Los datos utilizados pertenecen a la estación Puerto Madryn, Ea. La Isla, Ea. La Adela, Ea. El Salitral y Ea. San Jorge.

La representación espacial se realizó de dos maneras, ambas con el soporte del programa MapInfo 8.0 sobre la base del Sistema de Información Geográfica (SIG) generado en este estudio en el cual se poseen georeferenciados los datos pluviométricos.

Uno de los procedimientos consistió en el trazado manual de curvas isohietas, y otro en la generación mediante un interpolador (Inverso de la Distancia al Cuadrado) de una imagen raster. En este último la importancia radica en la fácil aplicación de un SIG.

Esta técnica sería similar al de la Media Aritmética, pero con el agregado de una ponderación por distancia. Ramírez (1998) señala que dicha ponderación, al tener un factor cuadrático, recibe una influencia bastante fuerte del monto pluvial de las estaciones más cercanas y al considerar una serie o variedad de puntos de estimación, puede formar concentraciones concéntricas de los montos estimados en torno a las estaciones.

La información para la aplicación de esta técnica no va más allá de poseer la ubicación exacta de los puntos de medición, además de la información pluvial. Entre los inconvenientes que se vislumbran, está el que sólo considera distancias pero no direccionalidad de la precipitación, la cual a su vez puede ser influida por condiciones tanto del terreno como atmosféricas.

Además, su estimación va a depender en forma importante, de la separación que tengan las estaciones en la respectiva zona. Este método divide el área de estudio en celdas, considerando que la precipitación dentro de una celda sin registro, es una función de la precipitación de las celdas próximas que poseen medidas y del inverso de la distancia que las separa elevada al cuadrado.

2.2.1.5. Elaboración de la información pluviométrica modular

Para poder analizar la distribución estacional de la precipitación, se calcularon las medias muestrales de todos los sitios y graficó la información en series mensuales, tratando los datos de manera estadística a fin de obtener los promedios pluviométricos.

El análisis de la distribución intraanual de las precipitaciones se efectuó mediante la graficación de las precipitaciones mensuales medias y medianas ya que este último es un parámetro de posición que caracteriza mejor que el promedio el régimen de distribución de una localidad. (Scian y Mattio 1975).

Con la serie más completa se decidió mostrar los estadísticos bajo el grafico de Cajas y Bigotes dado que es una herramienta muy útil para describir características importantes en un conjunto de datos. La construcción de este diagrama emplea medidas

descriptivas que son poco sensibles a datos extremos y por lo tanto presentan una descripción más clara de la información. Básicamente se emplean para su construcción tres cuartiles, los valores mínimos y máximos y la media muestral solo como medida de localización en el gráfico.

Una observación se dice Atípica si está a más de 1,5 veces el rango intercuartil de alguno de los cuartiles Q1 o Q3. Una observación se dice Atípica Extrema si está a más de 3 veces el rango Intercuartil de alguno de los cuartiles Q1 o Q3.

El diagrama (Figura 2.2.1) está conformado por una caja la cual se construye con ayuda del primer y tercer cuartil. La mediana es dibujada en el interior de la caja al igual que la media muestral. Los bigotes se extienden desde los cuartiles a la derecha y a la izquierda. Su longitud depende de si hay o no datos atípicos. (Palomino, 2004).

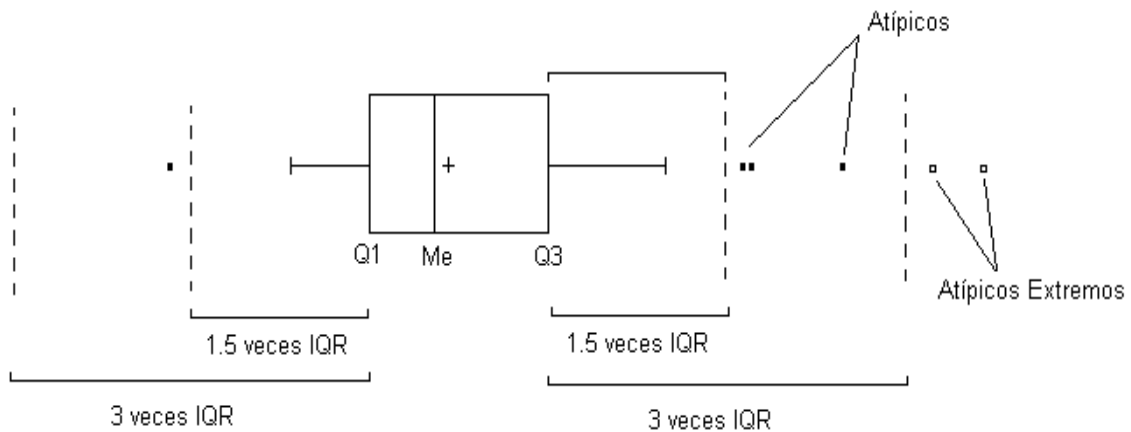


Figura 2.2.1: Explicación del diagrama de cajas

La utilidad de esta gráfica radica, en la facilidad de interpretación que otorga frente a una serie de datos históricos mensuales.

Permite observar claramente aquellos meses que presentan mayor variabilidad en el registro de sus medias acumuladas, ya que éstos se alejan de la caja quedando identificados como valores atípicos o atípico extremos.

2.2.1.6. Elaboración de la información termométrica modular

La información de temperatura procede del CENPAT, correspondiente a la localidad de Puerto Madryn, y del INTA para los sitios Punta Delgada, Punta Norte e Isla de los pájaros. Dado el muy corto periodo de tiempo abarcado por la estaciones INTA, y en base a que las variaciones entre las estaciones no es muy marcado, se procedió a utilizar solamente los datos de la estación del Centro Nacional Patagónico.

Se obtuvieron así temperaturas medias mensuales medias, máximas y mínimas para un periodo de tiempo de 22 años.

2.2.1.7. Otras variables hidrometeorológicas

De la estación CENPAT se trataron también valores modulares diarios de velocidad del viento (media anual (m/s), media por dirección, y frecuencia total por intervalo de dirección) para el lapso 1982-2002. Los atributos por dirección se muestran juntos es una grafica de barras (frecuencia) y líneas (velocidad) dado que resulto ser esta la manera más completa de representación de los datos.

Los valores de humedad relativa, fueron cedidos por el Centro Nacional Patagónico, pero su fuente original fue el Servicio Meteorológico Nacional y corresponden al periodo 1901-1970. Se graficaron para dicho lapso las medias, y máximos y mínimos medios mensuales.

2.2.1.8. Evapotranspiración

Como es conocido, esta variable es la más compleja de obtener en cuanto a lo que a insumos del balance hidrológico concierne. No habiendo en la región ninguna estación de medición directa y considerando que si la hubiera los valores no serían fácilmente extrapolables dada la condición árida de la comarca, no queda más que estimar la evapotranspiración potencial a partir de técnicas empíricas. A esto se suma que los datos disponibles no permiten usar algunos métodos que podrían ser más ajustados como por ejemplo el aerodinámico global o el de perfil de humedad y viento.

Se ha aplicado la metodología Thornthwaite - Mather, que si bien no es apta para climas áridos, ya que son descalificadas por los propios autores para climas extremos, se pretende con ella obtener, por un lado un orden de magnitud referencial del déficit hídrico probable y de su distribución intraanual, y por otro permitir la clasificación climática de la región por el método de Thornthwaite (1948).

El método de Thornthwaite – Mather calcula la evapotranspiración potencial mediante la expresión:

$$E_p = 16 (10 t / I)^a$$

donde:

E_p : evapotranspiración potencial (mm)

t : temperatura media mensual (°C)

I : índice calórico anual ($\sum_1^{12} i$)

i : índice calórico mensual = $(t/5)^{1,514}$

a : $6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,792 \cdot 10^{-2} \cdot I + 4,9239 \cdot 10^{-1}$

Los valores calculados son corregidos posteriormente a Evapotranspiración potencial ajustada (Evtp) de acuerdo a las horas de insolación diaria (función de la latitud del lugar) y número real de días del mes.

Así obtenida la evapotranspiración potencial, a través de una grilla que pondera la relación entre la Precipitación, Evtp y la reserva de agua útil en el suelo, se realiza el Balance Hídrico de Thornthwaite para obtener la evapotranspiración real, excesos y déficit hídricos. Thornthwaite y Mather (1957) modifican el procedimiento de cálculo original, para situaciones más reales y simplifican mediante tablas los cálculos correspondientes.

Con este mismo método se obtienen los índices de aridez, de humedad e hídrico, necesarios para la tipificación climática junto con la concentración térmica estival.

2.2.1.9. Balances hídricos

Sobre la base de los datos obtenidos y de la reserva de agua útil del suelo, se realizaron dos balances hídricos utilizando la metodología de Thornthwaite – Mather, uno para una capacidad de campo de 50mm y otro de 25mm, valores considerados en función de estudios de suelos similares (Ferrer, et.al, 1990), a fin de obtener una aproximación de la distribución intraanual de los déficits y poder apreciar temporalmente las condiciones más favorables para facilitar la entrada atmosférica de agua al sistema. Cabe aclarar que no se pretendió con esta técnica estimar un valor de evapotranspiración real ya que se conocen sus limitaciones en la aplicación a zonas áridas.

Dado que la metodología anteriormente expuesta hace un tratamiento modular mensual de las precipitaciones, y con la intención de verificar si se producían variaciones en la distribución de los déficits, se realizó también un balance hídrico de paso diario.

El balance de paso diario se llevó a cabo con el software BALSHORT (Carrica 1993), a partir de los datos de la estación meteorológica Puerto Madryn. Dicho programa basa el cálculo de la evapotranspiración diaria en los datos de evapotranspiración potencial media mensual cargada por el usuario, en este caso calculada por Thornthwaite-Mather

(1957), y en los datos de precipitación diaria. Son insumos del programa también los datos de tipo de suelo, capacidad de campo e interceptación vegetal.

Se realizaron dos corridas del programa, una utilizando todos los datos de precipitación diaria y otra, teniendo en cuenta el concepto de precipitación efectiva (Hernandez, *et.al.* 2002) solo con aquellas mayores a 5mm, En ambas se utilizó, una capacidad de campo de 25mm, tipo de suelo arenoso y sin corrección por interceptación vegetal.

2.2.1.10. Clasificación Climática

La clasificación climática se realizó con el método de Thornthwaite (Burgos y Vidal, 1951) y con la de Köppen-Geiger-Pohl, (Geiger y Pohl, 1953).

Thornthwaite se basa en el concepto de evapotranspiración potencial y en el balance de vapor de agua. Contiene cuatro criterios básicos: índice global de humedad, variación estacional de la humedad efectiva, índice de eficiencia térmica y concentración estival de la eficacia térmica.

La evapotranspiración potencial (ETP) se determina a partir de la temperatura media mensual, corregida según la duración del día; y el exceso o déficit se calcula a partir del balance de vapor de agua, considerando la humedad (Im), que junto con la ETP permite definir los tipos de clima, que se subdividen en otros en función del momento del año con exceso o falta de agua y de la concentración estacional de la eficacia térmica.

La clasificación de Köppen se basa en el crecimiento de la vegetación natural y en consecuencia su criterio se basa en el grado de aridez y la temperatura.

Los climas son definidos por los valores medios anuales y mensuales de las temperaturas y las precipitaciones. Bajo estos criterios, mediante letras mayúsculas, diferencia cinco grandes grupos que a su vez se subdividen en subgrupos más específicos, identificados mediante letras minúsculas, en referencia a la distribución estacional de la precipitación. Por último, para reflejar el régimen térmico se hace uso de una tercera letra.

2.2.2. Geomorfología

El primer paso para la descripción de las geoformas, fue la recopilación de antecedentes dentro de la tarea común a todos los temas, ya sea aquellos referidos a estudios estrictamente geomorfológicos, como los que se basaron en esta disciplina para

desarrollar otros aspectos. Fueron de gran utilidad los trabajos de Rovereto (1921), Re & Brodtkorb, (1962). Súnico (1996) y Del Valle, et.al (2008).

Para la interpretación y mapeo geomorfológico las herramientas cartográficas utilizadas fueron las hojas topográficas escala 1:100.000 del IGM, fotografías aéreas escala 1:60.000 e imágenes Landsat7 (227/90 y 227/90 del 26 de agosto de 1999).

Las cartas topográficas fueron transferidas a formato digital mediante un escanner de rodillo y georeferenciadas con el programa ER Mapper de manera de poder generar con este mismo software un mosaico topográfico georeferenciado de toda el área.

Una vez obtenida la imagen básica, se procedió a la digitalización de las curvas de nivel mediante el software Autocad 2002 a fin de poder generar un modelo digital de elevación del terreno (DEM).

Las Imágenes Landsat se procesaron con el código ER Mapper, generándose distintos algoritmos para las diferentes combinaciones de bandas, que luego fueron fusionadas con la pancromática para aproximar una definición espacial de 15m. De las variadas composiciones de bandas intentadas, la combinación **5-4-2** resultó ser la que mejor resaltó las características geomorfológicas.

Realizados estos pasos, se incorporaron al Sistema de Información Geográfico (SIG) tanto la imagen Landsat como la información topográfica. La conjunción de estas dos herramientas permitió analizar los rasgos geomorfológicos más destacados a escala regional.

A fin de completar la interpretación y profundizar en un mayor detalle, se utilizaron fotografías aéreas, mapeando bajo estereoscopio de espejos todos los rasgos geomorfológicos observados.

Paralelamente fueron verificadas mediante reconocimientos de campo las elaboraciones logradas hasta este punto, procediéndose entonces al trazado en formato digital del mapa geomorfológico para toda la zona de estudio, previa selección de la leyenda más adecuada sobre la base de los cánones o convenciones usuales.

Para ello se recurrió a las herramientas de dibujo que ofrece el SIG utilizando como base la imagen satelital y la topografía, elementos a los cuales se incorporó la información aerofotográfica y de campo para obtener un único mapa.

Como puede advertirse, el análisis involucró escalas de trabajo muy disímiles, de modo que al momento de generar la salida gráfica hubo que decidir cuál era la más apropiada en función de la investigación en que se enmarca la temática.

Finalmente, se optó por una escala regional (1:300.000), conforme con la densidad de información hidrogeológica relevada, dado que el objetivo del análisis geomorfológico del área se funda en la implicancia que puedan presentar las distintas geoformas en el comportamiento geohidrológico de cada sector.

2.2.3. Geología

El criterio metodológico esencial para el desarrollo de este ítem fue el de privilegiar el aspecto hidrológico, es decir el rol que la litología desempeña en la fase terrestre del ciclo hidrológico.

Se inició con la recopilación, análisis y transferencia del material bibliográfico existente sobre la región, donde el elemento usado de referencia y como punto de partida, tanto en la búsqueda de antecedente como en el chequeo de campo, fue la *Hoja Geológica 4366-1 Península Valdés* escala 1:250.000 realizada por Haller *et.al.* y publicada en el año 2001 por el Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR).

La información de la zona data desde los primeros pioneros de la Patagonia hasta trabajos que han sido recientemente publicados, tratándose en general de investigaciones de tipo regional con especial énfasis en los aspectos paleontológicos y estratigráficos.

Otra fuente de datos importante, si bien mucho más escasa, fue la procedente de las descripciones geológicas del cutting de perforaciones realizadas tanto para exploración de hidrocarburos (pozo YPF PV Ch es-1) como para aguas subterráneas.

La perforación YPF PV Ch es-1, dada su gran profundidad, sirvió como apoyo para definir las características de la cuenca.

Por su parte, los datos de las perforaciones realizadas con fines hidrogeológicos sirvieron de apoyo para darle continuidad lateral a los afloramientos descritos sobre las márgenes de la península.

Una vez obtenido el panorama geológico general, el siguiente paso metodológico fue el reconocimiento en campo de las distintas unidades geológicas, tarea que se llevó a cabo simultáneamente con las observaciones geomórficas, mediante el examen de exposiciones en los acantilados costeros, las laderas de los grandes bajos (salinas Grande y Chica) y afloramientos menores dispersos por el interior de la península.

Fue de suma utilidad, al momento de efectuar el reconocimiento de campo y el posterior mapeo en gabinete, la tarea realizada sobre la temática geomorfológica con el uso

de imágenes satelitales Landsat 7 con una combinación de bandas que resalta los rasgos de interés como se anticipara.

Una circunstancia favorable desde el punto de vista metodológico, fue la marcada identidad entre las unidades geomórficas reconocidas y el contenido geológico, bastante habitual en paisajes de comarcas llanas bajo clima árido (Hernández, 2005a).

Con todos estos elementos se realizó una descripción de todas las unidades geológicas aflorantes focalizada en las características litológicas de los estratos y evitando salvo cuando resultó estrictamente necesario, entrar en disquisiciones de índole cronoestratigráfica, paleontológica o de nomenclatura formacional.

Respecto de las unidades no aflorantes, pero presentes en las inmediaciones del área de estudio, se las menciona a modo de completar el esquema regional descrito para la península Valdés.

Por último se compuso un mapa geológico integrando la información antecedente con la generada para este estudio.

Dada la existencia de la hoja geológica de la península, y la fiabilidad de los datos y expresiones ahí expuestos, se optó por tomarla como base en la elaboración del mapa final y procediéndose a georeferenciarla y fusionarla con la imagen satelital anteriormente mencionada. Todas las tareas relacionadas al mapeo fueron realizadas con el software MapInfo.

Finalmente se logró definir con mayor precisión los límites de las unidades, principalmente de aquellas que por su característica dinámica (medanos activos principalmente) sufren cambios en función del tiempo.

2.2.4. Hidrología superficial

Para poder caracterizar el escurrimiento superficial, así como los cuerpos de tal carácter, se procedió en primera instancia al mapeo, e incorporación de la red de drenaje a la base de datos del SIG.

Dicha tarea se realizó partiendo genéricamente de la base de la información presente en las cartas topográficas IGM con el apoyo de la interpretación de imágenes satelitales Landsat.

El mapeo de la red de drenaje y de los cuerpos de agua superficiales no presento grandes dificultades más que el grado de incertidumbre manejado al momento de delinear el trazo de los cursos, por ser estos de carácter efímero.

2.2.5. Hidrología subterránea

La diversidad metodológica utilizada en esta sección obliga a tratar separadamente cada uno de sus subítem, ordenándolos de la misma manera que serán desarrollados en el capítulo de resultados: *Hidrogeología, Hidrodinámica, Hidroquímica e Hidrología isotópica.*

2.2.5.1. Hidrogeología

Una vez realizados los mapas geomorfológico y geológico, el siguiente paso fue la valoración hidrogeológica de diferentes unidades reconocidas y mapeadas.

La tipificación hidrolitológica se elaboró en función de la capacidad de recibir, alojar y transmitir agua de los distintos materiales geológicos. De este modo se los clasificó en acuíferos (aquellos que reciben, alojan y transmiten el agua con facilidad), acuicludos (que reciben, alojan pero no transmiten) y acuitardos (reciben y alojan el fluido, pero lo transmiten con dificultad y bajo ciertas condiciones físicas y temporales). Un cuarto componente no presente en superficie es el acuífugo, aquellos materiales que no reciben ni transmite el agua.

La base para la descripción hidrogeológica fue el mapa geológico, del cual se obtuvo la distribución espacial y las características litológicas generales de los distintos materiales aflorantes, y el mapa geomorfológico que sirvió de apoyo al momento de definir tridimensionalmente la disposición de los mismos.

Como primera aproximación se efectuó la identificación macroscópica en campo de las unidades hidrolitológicas aflorantes. Esta tarea fue llevada a cabo en los cortes topográficos naturales de los acantilados costeros y los bajos endorreicos (principalmente la margen Sur de la salina Grande que es donde se halla el desnivel más potente de toda el área), y en las canteras generadas con fines viales.

En dichas secciones se analizaron las características físicas de los materiales: granulometría, selección y grado de consolidación, así como también la presencia de calcáreos, humedad o rasgos hidromórficos que dieran algún indicio del comportamiento hidrológico del sedimento.

De dichas observaciones surge una primera calificación, cualitativa, de las permeabilidades de los distintos sedimentos acuíferos.

El esquema geohidrológico físico se completa con la hidrogeología de subsuelo, interpretada a partir de los perfiles geológicos de perforaciones de exploración para aguas subterráneas.

Se dispuso de información antecedente de 9 perfiles geológicos correspondientes a sondeos exploratorios, a los que se sumaron 3 realizados expresamente para esta investigación.

El material histórico está compuesto por 5 perforaciones realizadas en el año 1956 por la Compañía Argentina de Perforación de Aguas y Minas y 4 efectuados en 1983 por la Dirección de Hidráulica e Ingeniería de la Provincia del Chubut. Las primeras con destino agropecuario y las últimas con el propósito de proveer de agua potable a la localidad de Puerto Pirámides.

Los registros más antiguos fueron cedidos por el propietario de la estancia en donde se localizan, Sr. E. Ferro y los de 1983 por el geólogo que estuvo a cargo de dichas perforaciones, Lic. J. Stampone.

Los sondeos realizados en el marco de esta tesis fueron practicados, en noviembre-diciembre de 2008, con personal y maquinarias (Prominas) de la *Dirección General de Obras Hídricas de la provincia del Chubut*. Se perforó por el sistema rotativo en un diámetro de 8 pulgadas y entubándose con caños de PVC de 6" con tramo filtrante a la altura del nivel productivo. La supervisión y la toma de muestras fueron efectuadas por la tesista.

Los sitios a perforar se seleccionaron en función de cubrir aquellas áreas sin información de subsuelo y en los sitios más favorables de obtener resultados positivos, en cuanto a la posible productividad del pozo y la calidad del agua.

Finalmente se efectuaron cuatro sondeos, dos dentro de la Ea. El Trébol, uno en la Ea. San Jorge, y el restante en un sector aledaño a la localidad de Puerto Pirámides. Cabe aclarar que en este último, el objetivo principal que marcó su ubicación fue el de encontrar agua apta para consumo humano lo más cerca posible a dicha población.

A continuación se detalla la metodología seguida en todas las etapas que involucró la descripción y análisis de las perforaciones.

Trabajo de campo

Durante el transcurso de la perforación se realizaron varios controles de testificación a intervalos regulares, el tiempo de avance de penetración del trépano (el perfil de cronometraje), la salinidad y temperatura del lodo de inyección y se sacaron muestras cutting.

La colecta de dicho material se realizó sistemáticamente, cada un metro de avance de perforación o cambio litológico, mediante el uso de tamices de distintas granulometrías y por decantación dentro de recipiente para la fracción fina a muy fina.

Una vez tomada la muestra, se hizo una descripción macroscópica *in situ* y se la embolso para su descripción más detallada en laboratorio.

Trabajo de laboratorio

Las muestras se describieron bajo lupa binocular siguiendo, para los diferentes tipos de rocas o sedimentos, las secuencias que se detallan a continuación:

Areniscas y gravas

- Color: en húmedo según la carta de colores para rocas (Rock-color Chart Committee, 1963).
- Tamaño: según la clasificación de Wentworth para rocas clásticas.
- Composición mineral
- Redondez: según contrastación visual con la carta de angularidad. (Powers, 1953)
- Selección: carta de estimación visual de grado de selección. (Folk, 1961)
- Cemento: reacción con HCl
- Consolidación

Pelitas

- Color: en húmedo según la carta de colores para rocas (Rock-color Chart Committee, 1963).
- Aspecto (en bloques, subplanar, planar, amorfo)
- Fractura (concoide, irregular)
- Inclusiones
- Reacción calcárea: reacción con HCl

Calcáreos

- Color: en húmedo con la carta de colores para rocas (Rock-color Chart Committee, 1963).

- Tipo
- Hábito
- Residuo arcilloso
- Dureza

Trabajo de gabinete

Una vez concretada la descripción del cutting, la información fue volcada en perfiles descriptivos, por medio de una columna dibujada a escala, donde para cada profundidad se muestran los porcentajes relativos de las litologías identificadas.

Luego, a partir del perfil descriptivo, el perfil de cronometraje y el análisis de campo, se generaron los perfiles interpretados que, a diferencia de los perfiles descriptivos, asignan un tipo de roca/sedimento y atribución formacional a los distintos tramos.

Finalmente y luego de proceder a un análisis detallado la información correspondiente a cada uno de los sitios dónde se poseen datos de subsuelo, se construyó un perfil esquemático integrado que refleja de modo simplificado la componente física del sistema geohidrológico del área.

El último paso dentro de la caracterización hidrogeológica fue la interpretación integrada de los datos superficiales y de subsuelo en el marco de geología regional y la geomorfología de modo de generar un esquema en tres dimensiones que permitiera visualizar el modelo planteado para la zona.

2.2.5.2. Hidrodinámica

Se detallan las tareas atinentes a elaborar e interpretar los fenómenos que caracterizan la dinámica del flujo subterráneo, en sus estadios de recarga, circulación, descarga y transferencia intrasistémica.

Tareas de campo y generación de mapas regionales

Como primera acción se realizó un relevamiento regional en el ámbito de toda la Península Valdés consistente en el inventario de las fuentes de agua subterráneas, registros y muestreos.

Como resultado de esa primera etapa se generaron dos mapas regionales, uno equipotencial y otro auxiliar de isosalinidad de modo de obtener una visión general de la hidrología subterránea de la Península Valdés que conduzca a dar el marco regional y delimitar hidrogeológicamente los bordes de la zona de tesis.

Para la elaboración de los mapas se concretó un censo de perforaciones (Noviembre de 2005) dónde fueron relevadas aquellas ubicadas en las hojas topográficas 1:50.000 del Instituto Geográfico Militar (IGM) que alcanzaran una distribución lo más representativa posible y fuesen de acceso relativamente fácil. En general estos requisitos coincidieron con los cascos de estancia, por razones utilitarias como se deduce del capítulo historia.

Esta tarea resultó en la localización y posicionamiento espacial con GPS de un total de 89 sitios de aprovechamiento de agua (ganadero y humano), que en general fueron molinos en pozos de gran diámetro (mayor a 1m), aunque también se relevaron manantiales y perforaciones de diámetro convencional.

En cada punto fue medida la profundidad del nivel del agua, la altura del brocal, junto con las propiedades fisicoquímicas “*in situ*” tomándose una muestra para el ulterior análisis químico para la caracterización hidroquímica.

A partir de estos datos se elaboró un primer mapa equipotencial (metodología que se detalla más adelante), que permitió identificar las principales áreas de recarga-circulación-descarga, como así también las divisorias subterráneas mayores, información que resultó fundamental al momento de definir el área específica de la investigación que atañe a esta Tesis.

Una vez enmarcada en el contexto regional la zona de estudio, el paso metodológico siguiente fue la densificación espacial del muestreo y el subsecuente monitoreo de las fuentes relevadas. Con este propósito se realizaron 3 campañas: Octubre de 2006, Junio de 2007 y Marzo de 2008.

El procedimiento de campo seguido en todos los casos fue el ya descrito para la campaña original de Noviembre de 2005, con la salvedad que en las sucesivas se muestrearon todos los molinos de los que se tuvo acceso, ya sea porque figuraban en la cartografía IGM o porque fueron informados por los pobladores rurales.

Elaboración de mapas: isopáquico de la Zona No Saturada (ZNS), iso-variación de los niveles freáticos y equipotenciales.

Los datos puntuales de cota topográfica, profundidad del nivel freático, altura de referencia y características físico-químicas medidas “*in situ*”, fueron incorporados al SIG, al igual que las notas referidas al uso de la fuente de agua (caudal de extracción, estado del funcionamiento y destino.).

Con los valores geográficamente posicionados de profundidad del nivel del agua de cada pozo y mediante el uso del interpolador IDW (explicitado en la sección de metodología general) se elaboraron los mapas isopáquicos de la ZNS (isoprofundidad del nivel freático) para los años 2005, 2006, 2007, y 2008, con control manual de los trazos en situaciones que excedían la interpolación meramente numérica.

Los mapas de isovariación del nivel freático (resultante de la resta algebraica para cada pozo del nivel medido en un año respecto del anterior) y el de variaciones máximas absolutas (producto de la diferencia entre el máximo y mínimo valor puntual), se realizaron también, a partir de la interpolador IDW proporcionado por el software Mapinfo 8.0., con idéntica supervisión.

A partir de la profundidad medida en cada sitio, la cota topográfica obtenida de la cartografía IGM y la altura del brocal, se calcularon, para cada uno de ellos y para cada posición en el tiempo, las alturas freaticométricas expresadas en metros sobre el cero IGM.

Una vez volcados los puntos con sus respectivos datos de potencial hidráulico, se procedió a trazar los cuatro mapas equipotenciales (Noviembre de 2005, Octubre de 2006, Junio de 2007 y Marzo de 2008).

La metodología consistió en el tradicional trazado por interpolación supervisada de las curvas isofreáticas, usando como herramienta de dibujo las disponibles en el software MapInfo 8.0, y aplicando para su delimitación un criterio hidrogeomorfológico basado en el análisis integrado de los mapas geomorfológico, geológico y topográfico.

La leyenda utilizada está de acuerdo a la normativa internacional establecida por Struckmeier & Margat, (1995).

Interpretación de los mapas equipotenciales

La lectura de las representaciones gráficas obtenidas permitió el estudio global de la morfología de la superficie potenciométrica, que incluyó el análisis del movimiento de las aguas (trazado de los filetes de flujo y consecuentemente de las direcciones de

escurrimiento), la definición de los distintos tipos de diseño morfológico y el establecimiento de las zonas de recarga y circulación regional.

A partir de la interpretación del espaciado de las curvas isopiezas, se determinaron los distintos gradientes hidráulicos, expresados como:

$$i = \frac{H_1 - H_2}{l}$$

Donde H_1 y H_2 representan las alturas potenciométricas en metros sobre cero IGM entre curvas equipotenciales consecutivas respecto a la distancia entre ellas y l la distancia horizontal entre ambas.

Ensayos hidráulicos

Para la obtención de los parámetros hidráulicos Permeabilidad (K), Porosidad efectiva (Pe) o Almacenaje (S) y Transmisividad (T), existen diversos métodos ya sean de laboratorio o de campo.

Los primeros (tablas, fórmulas o perméametros), son en general muy aproximativos y se usan solo para dar un orden de magnitud en los casos en los que no es posible aplicar los segundos.

Mucho más fiables y representativos de las condiciones "in situ" son los métodos de campo, dado que permiten la obtención de valores medios para amplias áreas, se efectúan en las condiciones naturales del terreno sin alterar su estructura, recogen simultáneamente todos los factores y posibilitan la verificación por repetición puesto que no destruyen la muestra.

Dentro de los posibles métodos de campo, se pueden citar los trazadores, los ensayos de inyección y los de bombeo.

Los de inyección fueron descartados por no cumplirse en la zona los requisitos para su aplicación (nivel freático somero y pozo de diámetro convencional), además porque que solo arrojarían valores validos para la cercanía del pozo.

Por su parte el método de los trazadores no se consideró conveniente dado que no se disponía de perforaciones con el distanciamiento y la ubicación respecto al flujo requeridas para su realización, sumado a que los bajos gradientes hídricos de la zona impedirían llevarlo a cabo en un tiempo aceptable.

Se optó entonces por los ensayos de bombeo y dentro de ellos por los de no equilibrio dado que no se contó con los pozos de observación necesarios para poder conducir un método de equilibrio.

Fueron practicados entonces bajo la modalidad de no-equilibrio a caudal constante, tanto en pozos de diámetro convencional como en aquellos de gran diámetro usados habitualmente por lo pobladores. Se utilizó una bomba electro-sumergible Grundfos accionada por grupo electrógeno.

Para los ensayos practicados en las perforaciones de diámetro convencional se dispuso de los perfiles geológicos, las características del entubado y la posición y longitud de los filtros.

La situación más común fue la de contar solamente con un pozo que funcionara solo como punto de extracción, sin poder utilizarse otros como de observación. Solamente en el ensayo efectuado sobre pozo P14 se tuvo la posibilidad de utilizar otro para la observación (PO14), (Figura 2.2.2).



Figura 2.2.2: Ensayo en sondeo de diámetro convencional con pozo de observación

Esta práctica encontró la más importante dificultad en que la gran mayoría los pozos disponibles son de gran diámetro, con dimensión superior al metro y medio, llegando en los acuíferos más someros a los 4m, (Figura 2.2.3).



Figura 2.2.3: Pozos de gran diámetro

El reducido espesor del acuífero atravesado en este tipo de perforaciones, y su consecuentemente baja Transmisividad dificultaron alcanzar la estabilización del nivel dinámico antes de que el pozo se agotase.

Esto, sumado a la relativa certeza que de por sí presentan los ensayos de bombeo cuando se los realiza en condiciones que se alejan de la theisiana (diámetro infinitamente pequeño), redundan en un alto grado de incertidumbre al momento de interpretar los resultados.

Los registros obtenidos durante los ensayos fueron procesados en gabinete con el software ACUIFER TEST que permite el análisis, bajo distintos métodos, de los datos extraídos en el campo.

Dadas las condiciones establecidas en el ensayo de campo, se pudieron aplicar los siguientes métodos:

- Theis (recuperación), Theis, Hantush, Jacob. Para los pozos, de diámetro convencional, en los que se contó con un pozo de bombeo y otro de observación.
- Theis (recuperación), en los casos de perforaciones de diámetro convencional pero sin pozo de observación.
- Papadopulos & Copper (recuperación) cuando fueron en perforaciones de gran diámetro y sin pozo de observación.

Por tratarse de métodos y fórmulas muy difundidos, no se cree necesaria su descripción ya que está suficientemente expuesta en Kruseman & de Ridder, (1975), Custodio & Llamas, (1976) Villanueva, et.al (1984), entre otros.

Estimación de la velocidad real o efectiva

La cuantificación de esta variable se logró mediante la aplicación de la fórmula darcyana:

$$V_e = \frac{K \cdot i}{\theta}$$

Siendo:

V_e : velocidad efectiva [m/día]

K : coeficiente de Permeabilidad de Darcy [m/día]

i : gradiente hídrico (adimensional)

θ : porosidad efectiva (adimensional)

Los valores de K utilizados procedieron de la regionalización, con base geológica, de los resultados puntuales ofrecidos por los ensayos hidráulicos y los gradientes, de la medición sobre los mapas equipotenciales.

Análisis de la recarga-circulación-descarga

A partir de la interpretación de los mapas y el análisis de la red de flujo, se localizaron y delimitaron las principales áreas de recarga, circulación y descarga procediéndose a la descripción de cada uno de ellas en función de los elementos y mecanismos actuantes.

Para analizar la recarga se intentó en primera instancia su cuantificación, utilizando como métodos de aproximación el balance hídrico del suelo de paso diario y las fluctuaciones de los niveles freáticos.

El balance utilizado para cuantificar la recarga fue el realizado con las precipitaciones calificadas (mayores a 5mm) cuya elaboración fue detallada en la sección metodología correspondiente a Hidrometeorología. De él se tomó la sumatoria de los excesos diarios de cada año y se obtuvo el promedio anual para el periodo bajo análisis.

En cuanto al método de cálculo por las fluctuaciones de los niveles freáticos, se utilizaron los únicos pozos del área de los cuales se tenía certeza de no haber sido afectados por bombeo en el lapso de la investigación (2005- 2008).

De ellos (pozos 3, 5 y 118) se tomó la máxima fluctuación entre las mediciones registradas, cuyo producto por la porosidad efectiva media permite obtener un valor en mm de la altura de la lámina de agua incorporada al acuífero.

El paso siguiente en el análisis fue la interpretación de los diferentes mecanismos de recarga actuantes. Para ellos se recurrió a la interpretación de la información climática, geológica, geomorfológica, de suelos, vegetación e hidrogeológica.

Esto se vio facilitado gracias al montaje del SIG, herramienta que permite la visualización cruzada de toda la información disponible para un mismo punto.

La circulación fue valorada a partir del análisis de la red de flujo subterránea, localizándose las principales áreas interpuestas entre las zonas de recarga y descarga. Se midieron los gradientes hídricos en cada una de las distintas fases del circuito hidrodinámico, caracterizándose a partir de ellos las velocidades efectivas de flujo según la fórmula expresada precedentemente.

El análisis de la descarga partió de las evidencias de campo y la interpretación de los mapas equipotenciales, atendiendo a los sectores con convergencia de filetes de corriente.

Se localizaron y observaron manchas de humedad, chorrillos y manantiales, aforándose a estos últimos en los casos que fue posible, por las características y caudal de los afloramientos.

Las estimaciones de las pérdidas del sistema se concentraron sobre los bajos de las Salinas Grande y Chica, a partir del cálculo de las pérdidas consuntivas desde la superficie de los cuerpos de agua allí contenidos.

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial se utilizó el valor aportado por la metodología Thornthwaite-Matter, explicada anteriormente cuando al abordar la metodología hidrometeorológica.

También se estimó esta variable según el método de Penman- Monteith, para lo cual se empleó el programa FAO Cropwat 4.2. Dada la cantidad de insumos requeridos (datos mensuales de precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima, humedad relativa e insolación), se utilizaron los registros de la próxima estación Puerto Madryn CENPAT, puesto que en la zona de estricta de tesis no se cuenta con esta información.

Una vez calculados los valores de evapotranspiración potencial (ETP), la estimación de las pérdidas consuntivas desde los cuerpos de agua consistió en su producto por la superficie media ocupada por cada laguna en las salinas.

2.2.5.3. Hidroquímica

Las labores atinentes a calificar químicamente el agua subterránea e interpretar su vinculación con la red de flujo y las características geológicas y geomorfológicas asociadas (hidrogeoquímica), pueden diferenciarse en su descripción metodológica entre aquellas de campo, laboratorio y gabinete.

Trabajo de campo

Como se explicara en el apartado anterior, se realizó una primera campaña a escala de toda la península (Noviembre de 2005), donde se determinaron las propiedades fisicoquímicas *"in situ"* (pH, Temperatura, Conductividad eléctrica) y se extrajeron muestras para su posterior análisis de laboratorio a fin de obtener la composición iónica dominante, teniendo en cuenta los componentes mayoritarios (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , Cl^- , $\text{SO}_4^{=}$, HCO_3^- , $\text{CO}_3^{=}$).

En las campañas de octubre de 2006 y junio de 2007 se repitió el mencionado procedimiento, simultáneamente con la densificación de puntos realizado para completar los aspectos de interés hidrodinámicos.

La determinación de los elementos minoritarios (Plomo, Cinc, Cromo, Manganeso, Arsénico, Vanadio, Estroncio, Hierro divalente, Flúor, Boro, Nitratos) se llevó a cabo a partir del muestreo realizado expresamente con ese propósito en septiembre 2008, donde además se registraron las propiedades físico-químicas “*in situ*”.

Los procedimientos seguidos, en todos los casos en la toma de muestras fueron los recomendados por la Guía ASTM 4448-85a 2001, *Stándar Guide For Sampling Groundwater Monitoring Wells*.

Análisis de laboratorio

Las determinaciones de iones mayoritarios fueron realizadas en el laboratorio de análisis químicos del Instituto de Geomorfología y Suelos y los de elementos minoritarios procesados por el laboratorio C&D de la ciudad de La Plata bajo los métodos que se detallan en la tabla 2.2.1 expuesta a continuación.

Tabla 3.2.1 Métodos analíticos según parámetro determinado

PARÁMETROS	MÉTODO
Calcio	EPA 3005/7140 Volumetría
Magnesio	EPA 3005/7450 Volumetría
Sodio	EPA 3005/7770 Espectrofotometría de llama
Potasio	EPA 3005/7610 Espectrofotometría de llama
Carbonatos	SM 2320B Volumetría
Bicarbonatos	SM 2320 Volumetría
Sulfatos	SM 4500-SO ₄ ⁻² E Turbidimetría
Cloruros	SM 4500- CL- C Volumetría
Plomo	EPA SW 846 M 3010 A M 7420 EAA
Zinc	EPA SW 846 M 3010 A M 7950 EAA
Cromo	EPA SW 846 M 3010 A - M 7190 EAA
Cobre	EPA SW 846 M 3010 A - M 7210 EAA
Manganeso	EPA SW 846 M 3010 A M 7460
Arsénico	SM M 3500 As -C - Espectrofotométrico
Vanadio	EPA SW 846 M 7910 - EAA
Estroncio	EPA SW 846 M 7780 - EAA
Hierro Divalente	SM M 3500-Fe-B - Espectrofotometría UV-Vis
Fluoruros	SM M 4500 F -D - Espectrofotométrico
Boro	SM M 4500 B -C - Espectrofotometría UV-Visible
Nitratos	SM M 4500 NO ₃ ⁻ -E Espectrofotometría UV Vis
Hidrocarburos totales de petróleo	EPA 418.1 Espectrofotometría Infrarroja

Tareas de gabinete

Los resultados tanto de las variables medidas “in situ” como de los análisis químicos, fueron incorporados georeferenciadamente al SIG de modo que para cada sitio de monitoreo se dispusiera simultáneamente los de todos los componentes analizados.

Una vez cargadas todas las determinaciones en la base de datos del SIG, se procedió a la elaboración de los distintos mapas: isoconductividad, isocontenidos, isorelación de iones mayoritarios.

Fueron realizados con el código Mapinfo 8.0 mediante la aplicación del interpolador del IDW, tal como se explicara en el acápite 2.1.2. y las leyendas se fijaron en función de las sugeridas por el código internacional (Struckmeier & Margat, 1995).

Para la evaluación del contenido iónico de **elementos mayoritarios** se recurrió al software Easy_Quim.1 . (Vazquez Suñé, 1999), que además de la conversión de unidades en peso (mg/l) a equivalentes (meq/l), calcula el error analítico y los valores de relaciones molares e iónicas trazando los diagramas Piper-Hill, Scholler-Berkaloff y Stiff modificado.

El primero de ellos, consistente en la representación de cationes y aniones (expresados en porcentajes de miliequivalentes por litro) en sendos triángulos composicionales, permite mediante una figura rómbica sintética su clasificación en los distintos grupos iónicos.

El segundo es una representación columnar, en plantilla semilogarítmica, de las concentraciones en meq/l de los iones mayoritarios. Esta gráfica es muy útil para reconocer, en función de la geometría de la rama aniónica, el estado de evolución hidroquímica de la muestra considerada

Con ambos se generaron, en función de la población de muestras considerada, dos tipos de gráficas, una de carácter regional abarcando muestras representativas de toda el área y otra de tipo local para cada unidad geomorfológica.

Las rastras gráficas utilizadas en ambos casos están en función de la geoforma a la cual pertenece la muestra, manteniéndose el mismo criterio en todas las representaciones.

Los diagramas poligonales Stiff modificado, fueron volcados en un mapa sobre el punto donde se tomó la muestra de modo de poder estudiar la variación espacial de la composición del agua en el acuífero. A fin de que sean comparables entre sí, se mantuvo la misma escala para todos los puntos lo que ocasionó en el caso de las aguas más salinas que los extremos sus polígonos aparecieran seccionados.

La composición de **elementos minoritarios** se representó con diagramas circulares dispuestos geográficamente en un mapa sobre el sitio al que corresponde el análisis. Esta representación se condujo con el software Mapinfo 8.0 a partir de la base de datos generada con los datos de campo y laboratorio.

Otra gráfica utilizada en la interpretación de los componentes minoritarios fueron los diagramas de dispersión, mediante los cuales se evaluaron las posibles correlaciones existentes entre ellos, como así también con los elementos mayoritarios, y las propiedades físico-químicas.

Para analizar la ocurrencia de las **variaciones temporales** en las características hidroquímicas generales, se emplearon los valores de conductividad eléctrica de todos los periodos muestreados y se los represento en un gráfico de series año vs. Pozo.

Una vez detectados aquellos pozos en los que las fluctuaciones fueron mayores, se generaron, para cada uno de ellos gráficos de series temporales de los iones mayoritarios, a fin de establecer cuáles fueron los responsables principales de las variaciones en la composición hidroquímica de la muestra.

El **análisis de la aptitud del agua** para consumo humano se efectuó en función de lo establecido por el Código Alimentario Argentino (CAA) teniendo en cuenta por un lado los parámetros establecidos para aguas minerales naturales y por otro para aguas de suministro público.

Los mapas de calidad fueron elaborados con el código Mapinfo 8.0, gracias a la posibilidad que ofrece el SIG de analizar simultáneamente para un mismo punto toda la información utilitaria necesaria (total de sólidos disueltos, contenido iónico, contaminantes) cargada en la base de datos, y graficarla en función de los límites pautados por la mencionada normativa.

En cuanto a la determinación de la **aptitud uso agrícola**, se utilizó la clasificación de la U.S. Salinity Laboratory Staff. Índice SAR (Sodium adsorption ratio), la cual toma como parámetros:

- La concentración total de sales solubles expresada como conductividad eléctrica
- La concentración relativa de sodio con respecto al calcio y magnesio establecida por la siguiente fórmula:

$$SAR = \frac{rNa^{-}}{\sqrt{\frac{rCa^{2+} + rMg^{2+}}{2}}}; \quad r = meq/l$$

- El boro (en mg/l)
- La concentración del Carbonato Sódico Residual (CSR) calculado según la fórmula:

$$CSR = rCO_3^{2-} + rHCO_3^{-} - (rCa^{2+} + rMg^{2+}); \quad r = meq/l$$

Mediante la determinación de estos parámetros y haciendo uso de las correspondientes tablas clasificatorias, se determinó para los distintos tipo de aguas, el grado de salinización o alcalinización que sufrirían los suelos si se las utilizara para riego.

Por último, la **aptitud para uso ganadero** se evaluó en función de los rangos sugeridos por Sager, (2000) y en los lineamientos canadiense de la calidad de agua para ganado (CCREM, 1987).

2.2.5.4. Hidrología isotópica

Como un auxiliar muy valioso y complementario para la interpretación hidroquímica, se recurrió al empleo de las técnicas isotópicas en la investigación. Están basadas en el estudio de la abundancia de los distintos isótopos (elementos químicos con igual número atómico y distinto número de neutrones) presentes en la naturaleza, dentro de los cuales interesan particularmente los de Hidrógeno y Oxígeno por ser éstos constituyentes de la molécula de agua.

El Oxígeno tiene tres isótopos estables (^{16}O , ^{17}O , ^{18}O) y el Hidrógeno dos (1H y 2H) y uno radiactivo (3H), de los cuales los más abundantes son el ^{16}O y el 1H .

Teniendo en cuenta solamente a los estables, surgen seis posibles especies moleculares de agua, de las cuales tres son las usadas en los estudios hidrológicos: $^1H^1H^{16}O$, $^1H^2H^{16}O$ y $^1H^1H^{18}O$, la primera de ellas dominante en la naturaleza.

La sustitución de isótopos tanto de Oxígeno como de Hidrógeno en la molécula de agua, produce variaciones en aquellas propiedades controladas directamente por la masa molecular, como la densidad, presión de vapor, velocidad de difusión y otras (IAEA, 1981).

De este modo los procesos físicos y los fenómenos meteorológicos responsables del transporte del agua en las diferentes fases del ciclo hidrológico producen una caracterización isotópica del agua de acuerdo a su historia, que puede ser de gran utilidad en el estudio de su **origen** y comportamiento (Plata Bedmar, 1979). Estas variaciones dan lugar al llamado fraccionamiento isotópico entre las distintas sustancias o fases intervinientes de forma que las concentraciones de las mismas resultan ser diferentes a las del estado inicial, (Panarello y Parica, 1984).

La determinación de la relación isotópica de una muestra se expresa en desviaciones por mil respecto (δ ‰) a una referencia internacional y se define como:

$$\delta(\text{‰}) = 1000 \frac{R_M - R_E}{R_E}$$

donde:

$\delta = \delta_{\text{VSMOW}}$ = desviación isotópica en partes por mil (‰)

M=muestra

E= estándar internacional, Vienna Standard Mean Ocean Water (V-SMOW) (Gonfiantini, 1978).

R: relación isotópica. ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^2\text{H}/^1\text{H}$, etc)

La relación isotópica se define como el cociente entre el número de moléculas de la especie más pesada, menos abundante y de la especie más ligera, más común. En el caso del oxígeno-18 (R_{18}) y deuterio (R_2) les corresponde, respectivamente, las siguientes expresiones:

$$R_2 = \frac{H^2H^{16}O}{H_2^{16}O} \qquad R_{18} = \frac{H_2^{18}O}{H_2^{16}O}$$

Por definición, el valor $\delta_{\text{V-SMOW}} = 0$ ‰. Por lo tanto, un valor δ positivo de ^{18}O o de ^2H significa que el contenido de ^{18}O o ^2H de la muestra es mayor que el de la referencia (muestra enriquecida, es decir mayor concentración de los isótopos pesados); un valor negativo indica lo contrario (muestra empobrecida).

Los análisis isotópicos fueron realizados en los laboratorios del Instituto de Geocronología y Geología Isotópica (INGEIS). Los ensayos de ^{18}O en aguas se realizan siguiendo la técnica descrita en Panarello y Parica (1984) que incluye referencias a las metodologías desarrolladas por Epstein y Mayeda (1953) (método de equilibración) y Roether (1967). Las determinaciones de ^2H se realizan siguiendo la técnica enunciada por Coleman et al. (1982). Finalmente las mediciones de las relaciones isotópicas $^2\text{H}/^1\text{H}$ o

$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ se realizan en un espectrómetro de masas de triple colector, sistema de introducción múltiple automático, Finnigan MAT Delta S.

Respecto a la incertidumbre, la gran cantidad de variables aleatorias involucradas en estos métodos hace muy difícil realizar una propagación de errores convencional. Por lo tanto, la incertidumbre corresponderá a la desviación estándar de los datos utilizados en la validación, sin decimales.

La incertidumbre para $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ es de $\pm 0,2\text{‰}$ y $\pm 1\text{‰}$, respectivamente (INGEIS, 2005a; IAEA, 1992)

Teniendo en cuenta que la precipitación puede constituir uno de los principales factores de la recarga, el conocimiento, la caracterización y registro de su contenido isotópico (^2H , ^{18}O y ^3H) es de importancia fundamental cuando se inicia un estudio hidrológico. La composición isotópica media de la precipitación es una característica de cada región y está determinada principalmente por los parámetros meteorológicos locales (temperatura, humedad relativa, cantidad). La medición y archivo del contenido isotópico de las precipitaciones de la Argentina se lleva a cabo a través de las estaciones de la Red Nacional de Colectores (Dapeña y Panarello, 2008) que pertenece la Global Network for Isotopes in Precipitation (GNIP) (IAEA/WMO, 2002).

Para evaluar la función de entrada en este sistema se utilizó la estación colectora Puerto Madryn, provincia de Chubut,. (IAEA/WMO, 2002; Dapeña y Panarello, 2008). Está ubicada en el CENPAT y es operada por su personal. Las muestras son analizadas en los laboratorios de INGEIS. Esta estación tiene un registro irregular y sólo se cuenta con datos de ^{18}O y ^3H del periodo 1982-1985 y ^{18}O y ^2H de los años 1999-2000.

Una vez obtenidos los resultados analíticos, la interpretación se efectúa a partir de la graficación de los datos en diagramas convencionales $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ versus $\delta^2\text{H}\text{‰}$, donde es posible analizar, en función de los patrones que generen, su historia dentro del ciclo hidrológico.

En la Figura 2.2.4 se muestran los principales procesos modificadores de la relación $\delta^2\text{H} - \delta^{18}\text{O}$ en el agua subterránea respecto a la lluvia que la ocasiona.

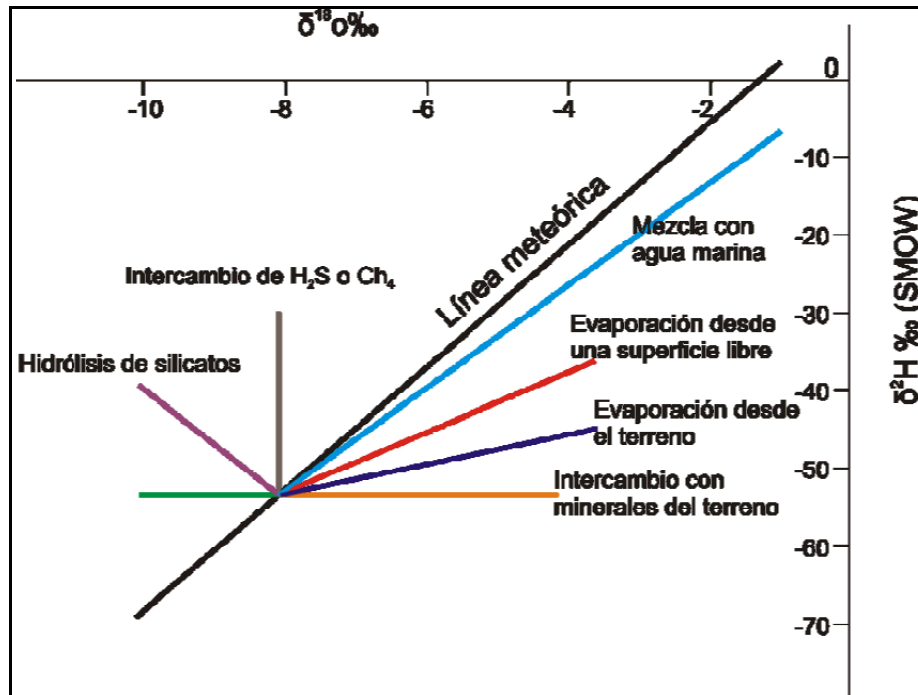


Figura 2.2.4: Procesos modificadores de la relación $\delta^2\text{H} - \delta^{18}\text{O}$ (Escuder, et.al, 2009)

El muestreo para el análisis de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ se realizó tratando de cubrir representativamente la mayor diversidad de situaciones. Se tomaron nueve muestras de agua subterránea (siete de pozo y dos de manantiales), dos de agua subsuperficial (una de la Salina Grande y otra de la Chica) y una de mar (Golfo Nuevo).

En cuanto a los isótopos radiactivos, el **Tritio (^3H o **T**)** resulta de gran utilidad para estimar el **tiempo de recarga** en aguas jóvenes puesto que tiene un período de semidesintegración de 12,32 años, lo que significa que al cabo de 5 periodos de semidesintegración (62 años) solo queda el 3 % de cualquier cantidad de Tritio inicial (Escuder, et. al., 2009).

Su origen puede ser tanto natural, en las capas superiores de la atmósfera (Panarello y Albero, 1983), como artificial proveniente de las detonaciones nucleares y de la operación de centrales atómicas (que entre los años 1945 y 1963 inyectaron una gran cantidad de Tritio a la atmósfera). Luego se oxida y precipita con las lluvias incorporándose al ciclo hidrológico.

De este modo, los valores de Tritio similares a aquellos correspondientes a las precipitaciones de las cuales se recarga el acuífero indicarán tiempos relativamente cortos desde la infiltración. En vez, tenores inferiores podrían señalar tiempos intermedios de recarga, o bien una mezcla entre aguas recientemente infiltradas y aguas muertas.

Por otro lado hay que considerar que si los valores de Tritio correspondientes a las lluvias locales son muy bajos, estas variaciones no resultarán tan notorias y consecuentemente se dificultará su interpretación, (Panarello y Albero, 1983).

Respecto a la aplicación del ^3H en el fechado de aguas primero se debe distinguir entre el concepto de “*edad*” y “*tiempo de residencia*” del agua subterránea, ya que es frecuente encontrar en la literatura la aplicación de los mismos como sinónimos. Kazemi *et al.* (2006) definen “*edad de agua subterránea*” como el lapso comprendido desde que una molécula de agua es recargada al sistema subterráneo hasta que alcanza un lugar específico en dicho sistema, en donde es muestreada físicamente o teóricamente estudiada para datarle su edad. Por otro lado, estos autores establecen que al tiempo que le lleva a una partícula de agua subterránea viajar desde el área de recarga a la de descarga del acuífero, es decir desde su infiltración al subsuelo hasta que aflora en superficie como “*tiempo de residencia del agua subterránea*”. En hidrogeología es preferible considerar “*tiempo de residencia medio del agua subterránea*” empleado por Clark and Fritz (1997) y “*edad promedio del agua subterránea*”, debido a una gran cantidad de incertidumbres a considerar como tránsito del agua en zona no saturada, técnicas disponibles, complejidad de flujo y transporte, fenómenos de mezcla, heterogeneidad del sistema acuífero).

Clark and Fritz (1997) señalan que existen cinco métodos –cualitativos y cuantitativos- para aproximarse al fechado de las aguas subterráneas con Tritio, a saber:

Velocidad del pico de 1963: identifica el pico termonuclear preservado en las aguas subterráneas e identifica claramente su edad. Es adecuado para acuíferos poco activos.

Decaimiento radioactivo permite calcular, para un grupo de valores medidos, el tiempo de desintegración a partir de un nivel de entrada (input) conocido. Raramente se encuentran aguas subterráneas en las que no haya ocurrido una mezcla tal que permita un fechado efectivo por este método. Una de las más importantes limitaciones en la aplicación de este método es la fuerte dependencia estacional que suele presentar el input de Tritio, lo que limita mucho poder fijar el ^3H inicial al momento de la recarga. Más que un valor único, existe consenso en aceptar que el input de ^3H es una función plurianual promedio.

Modelo de la función de entrada: determina la recarga atenuada de los niveles de tritio para un sistema de flujo dado de aguas subterráneas aplicando la ecuación de decaimiento radioactivo.

Análisis de la serie temporal: a partir del muestreo sistemático en puntos específicos de los valores de entrada y salida durante un tiempo lo suficientemente largo

para permitir identificar el tiempo de tránsito. Muchas veces es necesario reconstruir las series temporales de Tritio y para ello hay varias metodologías como las de Weiss y Roether (1980) y de Doney et al, (1992), Plata-Bedmar (1999), Celle-Jeanton, Gourcy y Aggarwal (2000).

Interpretación cualitativa: donde el ^3H mensurable se considera equivalente de la recarga moderna. Esta aproximación establece intervalos para la clasificación de la recarga a las aguas subterráneas, como por ejemplo la de Clark y Fritz (1997) para zonas costeras y bajas latitudes, donde:

< 0.8 UT	submoderna, recarga anterior a 1952
0.8 a ~2 UT	mezcla entre submoderna y reciente
2 a 8 UT	moderna (<5 a 10 años)
10 a 20 UT	Presente (^3H residual bombas)

Las determinaciones de Tritio fueron realizadas en los laboratorios del INGEIS. En el proceso de análisis de ^3H se utiliza el enriquecimiento electrolítico, luego del cual las muestras se miden por espectrometría de centelleo líquido. Las concentraciones de ^3H se expresan como unidades de tritio (U.T.)

$$1U.T. = \frac{1 \text{ átomo de } ^3\text{H}}{10^{18} \text{ átomo de } ^1\text{H}}$$

La incertidumbre se realiza con propagación de errores para cada muestra individualmente de acuerdo con Gröning y Rozanski (2003, 2004) e INGEIS (2005b).

Como ya se indicó en párrafos previos, para evaluar la concentración de ^3H que ingresa al sistema (función de entrada) se utilizan los registros obtenidos en muestras de precipitación de la estación colectora Puerto Madryn.

Para este análisis fueron colectadas seis muestras: tres de la zona de recarga principal (Unidad Médanos y Mantos Arenosos) correspondientes a un pozo somero otro de profundidad media y el restante profundo (los dos primeros de gran diámetro y sin entubar y el último de diámetro convencional y entubado), dos de los Depósitos Costeros y una de las Planicies aterrazadas (todos ellos de diámetro mayor a 1,2m).

El **Carbono 14** (^{14}C), es otro isótopo radiactivo de interés hidrogeológico y que dado su tiempo de vida media de 5730 años, es utilizado para datar aguas más antiguas que las que se determinan con el método precedentemente desarrollado.

El fundamento del método consiste en que el ^{14}C es incorporado a la materia orgánica viva a través del CO_2 atmosférico del cual forma parte. Mientras el organismo está vivo, su actividad de ^{14}C está en equilibrio con la atmósfera y es constante (100pmc), pero cuando el organismo muere deja de intercambiar Carbono con el ambiente y empieza a perder ^{14}C por desintegración a un ritmo igual al período de semidesintegración.

Cuando el agua de precipitación entra en contacto con el suelo, el Carbono fijado por fotosíntesis puede entrar en solución como Carbono inorgánico ($\text{CO}_{2(\text{aq})} + \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$) o como Carbono orgánico (ácidos húmicos, fúlvico) y del mismo modo, al dejar de estar en equilibrio con la atmósfera empieza su desintegración.

El ^{14}C se mide por espectrometría de centelleo líquido sobre benceno de alta pureza obtenido a partir de las muestras. Las concentraciones de ^{14}C se refieren como actividad porcentual respecto al carbono moderno (PCM), que es la actividad actual del CO_2 atmosférico.

Las incertidumbres involucradas en la medición de la actividad de ^{14}C en muestras de aguas depende además de los procesos propios de la preparación y medición de la muestra de varios factores específicos como la hidrodinámica y propiedades geoquímicas del sistema acuífero involucrado (Fontes, 1992).

La incertidumbre combinada de la Actividad de la muestra se expresa utilizando propagación de errores. Siguiendo las recomendaciones de EURACHEM/CITAC (1995) la incertidumbre expandida debe incluirse con el resultado analítico. La incertidumbre expandida se obtiene multiplicando la incertidumbre combinada por un factor numérico, denominado factor de cobertura y que en la mayoría de los casos es igual a 2. Esto corresponde a un límite de confianza de ca. 95%, siempre que los resultados de los análisis se ajusten a una distribución normal.

El cálculo para estimar la edad del agua en función del contenido de ^{14}C , se realiza con la siguiente fórmula:

$$t = \frac{5730 \text{ años}}{0.693} * \ln \frac{N_0}{N}$$

donde:

$N_0 = 100$ [pmc]

$N =$ actividad ^{14}C determinada en el agua [pmc]

En este caso el muestreo se llevó a cabo en sólo dos de los sitios en los cuales se lo realizó para Tritio (p73 y p14) dada la complejidad del procedimiento de toma (detallado a continuación) y la incertidumbre de aplicabilidad del método, sobre todo en una zona donde el contenido de carbonatos y bicarbonatos en el agua es muy reducido.

La cantidad de material necesario a emplear en la datación está directamente relacionada con el contenido de Carbono (HCO_3^- , CO_3^{2-} , CO_2) de la muestra. Para una medición se requiere una cantidad mínima de 6 gramos de Carbono, por lo que el volumen a precipitar de la muestra dependerá del contenido de Carbono total. En el caso de las aguas, se debe hacer precipitar una cantidad suficiente del carbonato disuelto, (Dapeña, 2007).

Para ello se utiliza un muestreador especial (Figura 2.2.5), en cuya base se colecta el precipitado formado al agregar una serie de reactivos: $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (floculante), solución de NaOH (para crear un pH básico) $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (para precipitar el CO_3^{2-} como BaCO_3).

La sal de Bario se debe agregar inmediatamente después de que el agua alcance pH (9-10), ya que cualquier solución alcalina expuesta al aire va a absorber CO_2 atmosférico, e inmediatamente agitar vigorosamente.



Figura 2.2.5: Muestreador de aguas para ^{14}C

Al momento de la interpretación de los datos hay que considerar que el CO_2 del suelo confiere agresividad al agua que ingresa al subsuelo dando la posibilidad de que se disuelvan carbonatos sólidos del terreno y por lo tanto, que se modifique el contenido inicial

de ^{14}C en el agua, provocando así un envejecimiento. Existen ciertas aproximaciones tendientes a corregir este error (corrección química de Tamers y corrección de Pearson) que se encuentran aún en fase de investigación. (Escuder, *et.al*, 2009). Para el fechado de aguas los resultados se modelan de acuerdo a las características geoquímicas e hidrodinámicas del sistema acuífero. En Taylor *et al.* (1992) se puede consultar una completa recopilación de los modelos disponibles

2.2.5.5. Cálculo de reservas

Para la estimación de las reservas de agua subterránea se realizó una serie de cálculos siguiendo la metodología que se detalla.

Las **reservas totales** (reguladoras, generadoras o fluctuantes + geológicas o profundas), en un acuífero libre resultan del producto del volumen de acuífero involucrado por la porosidad efectiva media.

$$Reservas = \Delta h \times Area \times \theta$$

Dónde θ es la porosidad efectiva y Δh el espesor saturado.

No obstante lo amplia que resulta esta definición, es necesario precisar los bordes dentro de los cuales será calculada, es decir los límites superior e inferior del acuífero.

El superior, al ser una capa libre, es coincidente con la superficie freática y el inferior fue ubicado con criterio estratigráfico, estableciéndoselo al alcanzar el primer nivel relativamente impermeable o con permeabilidad muy baja, con al menos un metro de potencia, localizado en el sector inferior de la zona saturada.

Cuantificar el volumen es tarea que evidentemente no resulta fácil en una zona donde se poseen muy pocos datos del espesor de la unidad o de la profundidad a la que se encuentra su piso. Es decir, es el límite estratigráfico inferior el que genera las mayores incertidumbres.

La componente vertical del volumen acuífero, se estimó a partir de una regionalización de los espesores saturados de las perforaciones “Los Médanos”, “SJ-x1” y “TR-x2”, ubicadas dentro del área de Tesis.

Los registros de las perforaciones “Los Médanos” muestran distintos espesores (9,5; 9,5; 9; 7; 6 y 6m) para su primer nivel acuífero y las perforaciones TR-x2 y SJ-x1, 10,5m y 8m respectivamente.

En función de estas diferencias se optó por calcular reservas mínimas utilizando el valor de **6m**.

En cuanto al área a considerar, del total para la zona de estudio se decidió descartar para el cálculo la correspondiente a las zonas de descarga, principalmente porque el espesor acuífero es muy discontinuo y cabría la posibilidad de incurrir en un error por sobreestimación.

No se consideró tampoco la superficie correspondiente a los bajos de las salinas Grande y Chica ni la de las geoformas de erosión que acompañan el contorno de la península. De este modo, el área sobre la que se calcularon las reservas se redujo a **1500km²**.

Respecto a la porosidad efectiva, al no poder concretarse ensayos de bombeo con pozo de observación, se utilizaron tablas confiables que la estiman en función de la litología y/o granulometría.

Los sedimentos que conforman el acuífero objeto se incluyen dentro de la clasificación de Sanders (1998) en la categoría “arenas finas a arenas limosas” correspondiéndoles el rango de 10 a 28% de porosidad efectiva. Por otro lado Custodio & Llamas (1976) proponen 18% para gravas y arenas con algunos limos y 15% para limos con arenas muy finas.

Dado que la *Formación Puerto Madryn* presenta variaciones faciales evidentes de los sedimentos que la componen, es esperable que se reflejen en valores dispares de la porosidad efectiva. Si bien en las dos perforaciones (TR-x2 y SJ-x1) el acuífero estaba conformado por arenas finas a finamente limosas, es conocido que en la unidad existen variaciones por tramos a fracciones de menor granulometría, por lo cual se decidió considerar un valor medio situado entre los dos más bajos propuestos por los mencionados autores, resultando en tal sentido en una porosidad efectiva de **12,5%**.

Una vez obtenidas las reservas totales generales, se procuró estimar las **Reservas totales según calidad**, procediendo a distinguir entre aquellas utilizables solo para la actividad ganadera y las que podrían ser aplicadas para consumo humano.

Se tomó en consecuencia como área para el cálculo al sector principal del mapa de *Aptitud del agua para suministro público* (Figura 3.5.51 en el apartado Hidroquímica) con TSD <1500mg/l, descartándose las situaciones aisladas a fin de favorecer una estimación más segura. En cuanto a los espesores y porosidades, se emplearon los mismos valores que los adoptados para el cálculo de las reservas totales.

Por último las **reservas reguladoras**, definidas por el volumen de agua que se recarga anualmente, fueron estimadas teniendo en cuenta la fluctuación de los niveles freáticos tal como se explicara para el cálculo de la recarga en la sección metodológica correspondiente a Hidrodinámica, utilizando la variación máxima de 0,42 m, y las cifras de porosidad efectiva y áreas hasta aquí consideradas.

Como puede advertirse, se mantuvo al momento de fijar la cuantía de cada uno de los parámetros un criterio netamente conservador, a favor de realizar una evaluación lo más realista posible.

2.2.6. Hidrogeomorfología

Las particularidades del medio físico en las regiones áridas se prestan para considerarlo como el marco analítico y descriptivo de las características de la etapa terrestre del ciclo hidrológico, porque es el ámbito donde los sucesos de tal carácter están fuertemente condicionados por la geomorfología y la geología (Hernández et al, 1983; Alvarez et al, 2009).

Además y como se precisara en el acápite 2.2.3, pueden advertirse con claridad las diferentes geoformas por su expresión en las imágenes remotas como por sus relaciones de campo, guardando a su vez una estrecha relación con el contenido geológico, normalmente mayor a la esperable en los dominios del clima húmedo.

De esta manera, la conjunción de elementos de juicio de índole hidrolítica, hidrodinámica, hidroquímica e isotópica permitió definir unidades hidromorfológicas típicas de los sectores de recarga, circulación y descarga, tomándose para su identificación la nominación oportunamente adoptada para las unidades geomorfológicas.

El proceso metodológico consistió fundamentalmente en la superposición espacial de los resultados emergentes de cada uno de los módulos para los temas mencionados, para lo cual se recurrió a la utilización del Sistema de Información Geográfico (SIG).

Mediante esta herramienta se dispuso simultáneamente de todos los parámetros necesarios para la interpretación y caracterización conceptual de las unidades hidrogeomorfológicas, consistente tanto en información proveniente directamente del relevamiento de campo, como en la obtenida de los análisis de laboratorio o la procesada, elaborada e interpretada en gabinete.

La figura 2.2.6 sintetiza, a modo de diagrama esquemático de flujo, el procedimiento seguido en tal sentido y los productos considerados (mapas geomorfológico,

geológico, hidrodinámico, de isosalinidad y de contenido iónico) para la definición de cada una de las unidades.

Quedan resaltadas en el esquema las bondades del SIG para poder arribar a los resultados pretendidos. La base metodológica del SIG y el procesador utilizado en este caso están descriptos en este mismo capítulo.

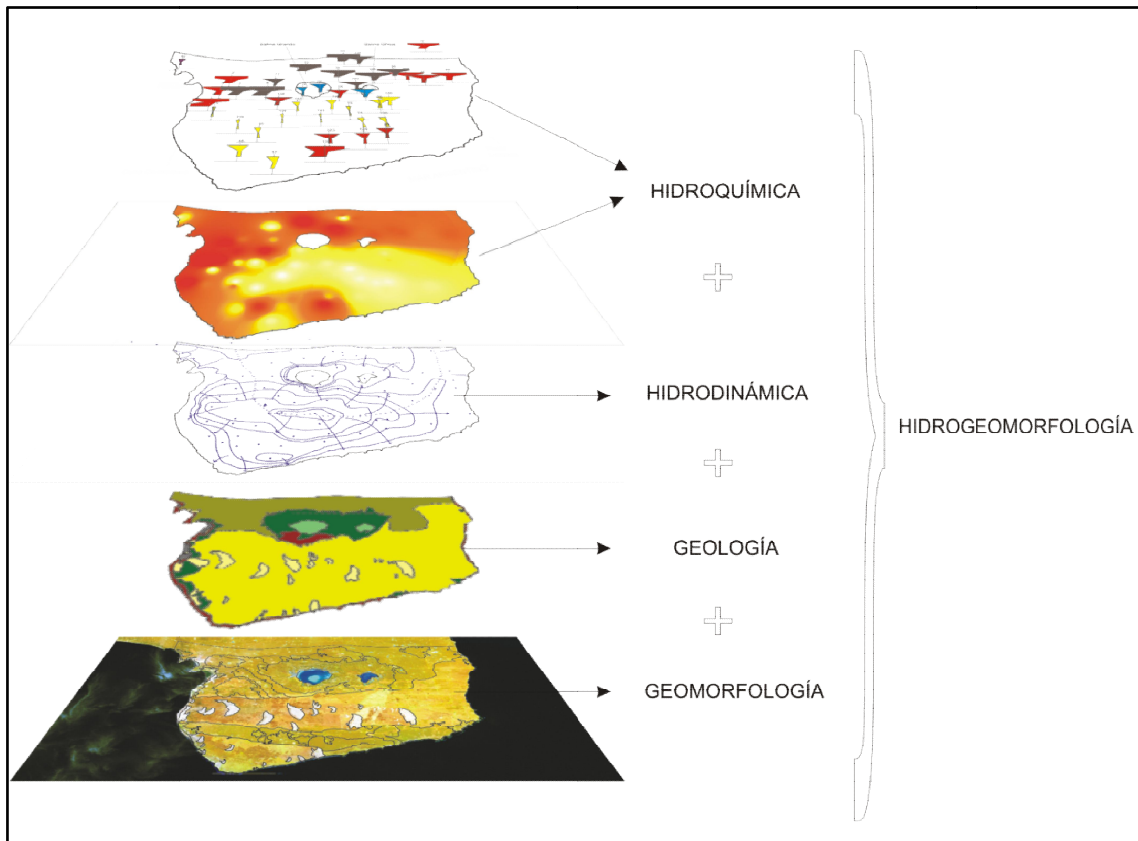


Figura 2.2.6 Esquema conceptual para la definición de unidades hidrogeomorfológicas

Al poseer generalmente las unidades geomórficas bordes netos, resulta más fácil asignar el contenido temático, es decir inscribir los sucesos hidrológicos, e inclusive percibir la gradualidad de algunos de ellos, como se pondrá de manifiesto en el capítulo pertinente.

Quizás el valor más destacable de la metodología utilizada es su relativa sencillez y aplicabilidad, ya que tanto la definición de las unidades de base como el empleo de la herramienta informática resultan muy accesibles y fundamentalmente, extrapolable a otras zonas de la región patagónica.

2.2.7. Hidrología ambiental

Las tareas atinentes al diagnóstico hidrológico ambiental consintieron básicamente en un análisis integrador de los resultados físico-químicos y biológicos con el entorno socioeconómico, como así también en la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero libre.

El concepto de “vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas”, es introducido por Margat en la década del '60 y se basa en el hecho de que la ZNS ofrece a las aguas subterráneas cierto grado de protección frente a la contaminación tanto por fuentes antrópicas como naturales.

La idea de vulnerabilidad de un acuífero puede ser a su vez dividida en vulnerabilidad natural o intrínseca y en vulnerabilidad específica, siendo la primera definida por Vrba & Zaporozec, (1994) como la suma de las características (suelos, ZNS, parámetros hidráulicos y recarga) que controlan la aptitud del acuífero para hacerle frente a un impacto indeterminado y su capacidad de autorestauración, o bien como la sensibilidad de un acuífero para ser afectado por una carga contaminante (Foster & Hirata, 1991).

En cambio la específica es definida como la aptitud del acuífero para hacer frente a un tipo de contaminante o impacto concreto, dentro de su contexto socioeconómico. (Vrba y Zaporozec, 1994).

La principal utilidad de la determinación de la vulnerabilidad es su idoneidad para la generación de mapas temáticos, los cuales proporcionan una visión subjetiva y semicuantitativa de la capacidad subsuperficial del medioambiente para proteger el agua subterránea, en principio en términos de la calidad, (Vrba & Zaporozec, 1994).

Existen muy variadas metodologías para determinar la vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero: DRASTIC, SINTAC, GOD, EPIK, BGR, que esencialmente coinciden en su resolución a partir de las características intrínsecas del medio. De este conjunto de técnicas se optó por la que mejor se adaptaba a las características físicas del medio local y principalmente, al nivel de información disponible.

De esta manera se condujo la evaluación por el método GOD, (Foster 1987; Foster e Hirata 1991) que califica a la vulnerabilidad intrínseca como el producto de los siguientes factores:

$$\text{Índice de Vulnerabilidad} = G * O * D$$

G = índice por condición de confinamiento del acuífero u ocurrencia del agua subterránea (*Groundwater occurrence*)

O = índice del sustrato litológico en términos de grado de consolidación y características litológicas (*Overall aquifer class*).

D = índice por profundidad del nivel del agua freática o techo del acuífero confinado (*Depth*),

Los valores individuales se asignan según los rangos establecidos en la grilla mostrada en la Figura 2.2.7.

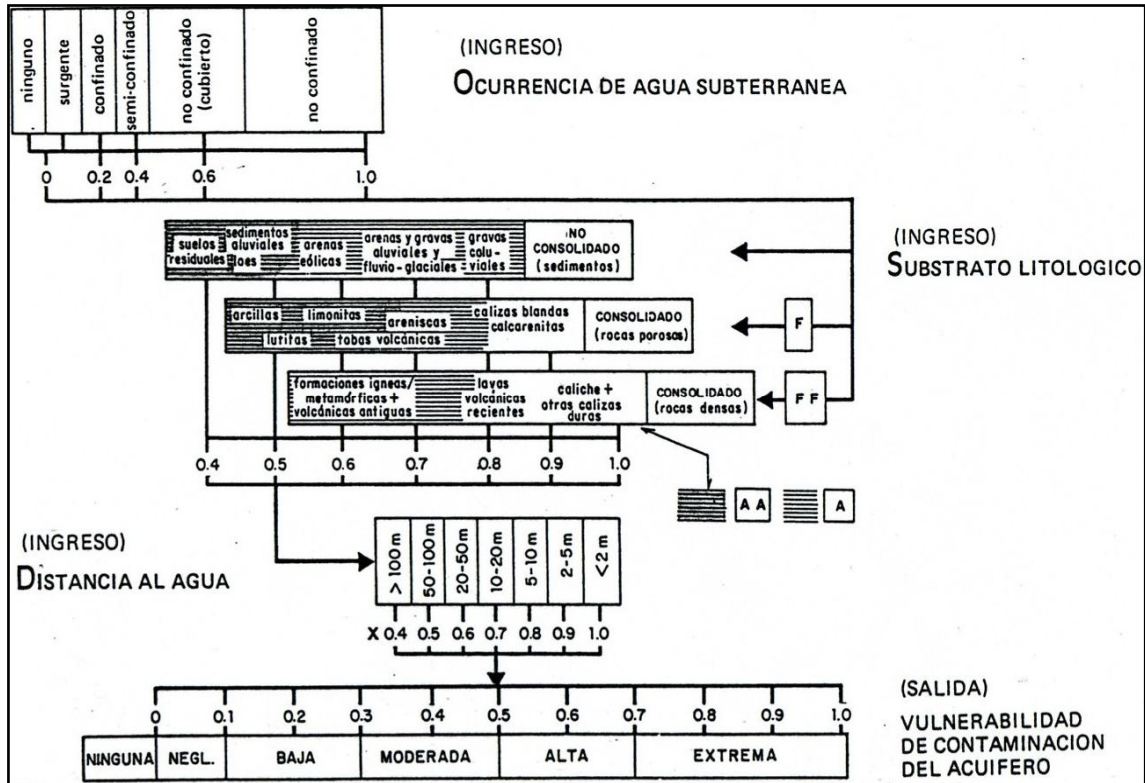


Figura 2.2.7 Caracterización de la vulnerabilidad GOD (Foster & Hirata, 1991)