

# CAPÍTULO 1

## Sistemas y marcos de referencia

*Laura I. Fernández*

¿podrías decirme, por favor, que camino debo seguir para salir de aquí?

-Esto depende en gran parte del sitio al que quieras llegar- dijo el Gato.

–Lewis Carroll, *Alicia en el país de las maravillas*

Coloquialmente, es común escuchar que sistemas y marcos de referencia se confunden y utilizan de modo indistinto. Conceptualmente se trata de cuestiones diferentes.

Lo primero que debemos interrogarnos es la necesidad de un sistema de referencia. Los sistemas de referencia, pilar y base de todo el contenido que desarrollaremos en este libro, son necesarios para conocer y describir posiciones y movimientos de objetos tanto en el espacio como sobre la superficie terrestre. Esta necesidad se enfrenta con un universo que no está estático. Todo se mueve, y aunque podemos expresar matemáticamente estos movimientos a través de rotaciones y/o traslaciones, la necesidad de una referencia espacial sigue siendo imperiosa.

Enfrentar el problema desde el punto de vista matemático, nuevamente parece ser una tarea sencilla. Bastará con definir un plano de referencia, una recta perpendicular al mismo, ubicar los ejes coordenados formando una terna directa y asignar un origen de coordenadas. Luego deberemos establecer convenciones para asignar orígenes, sentido y unidades a las magnitudes medidas en mi sistema. Por ejemplo: las latitudes geodésicas serán positivas para los puntos ubicados al Norte del plano Ecuatorial y negativas al Sur del mismo.

Pero aun cumpliendo con todos estos requisitos, el problema no está resuelto. El verdadero problema detrás del concepto de sistema de referencia no se encuentra en el enunciado de los principios y/o convenciones que lo integran, sino en su accesibilidad.

Por definición, un sistema de referencia es un concepto abstracto. Está caracterizado por tres direcciones mutuamente perpendiculares en el espacio y tiene por objetivo facilitar una descripción cuantitativa de las posiciones y los movimientos de los objetos en él. Su

materialización, el *marco de referencia*, constituye la herramienta de su accesibilidad. Dicho de otro modo, lleva a la práctica el sistema de referencia posibilitando su uso.

En este capítulo no sólo distinguimos los conceptos de sistema y marco de referencia, además desarrollaremos el método de cuatro pasos para la realización de un sistema de referencia propuesto por Kovalevsky y Mueller (1989). Asimismo, concluiremos con un ejemplo del método aplicado a la materialización del sistema de referencia celeste.

## **Pasos necesarios para la materialización de un sistema de referencia**

Según Kovalevsky y Mueller (1989, p. 3) se necesita un mínimo de cuatro pasos para materializar un sistema de referencia: 1) Concepción, 2) Elección de una estructura física, 3) Modelado de la estructura física y 4) Materialización.

La concepción de un sistema de referencia consiste en el enunciado de un principio general o propiedad, el cual vamos a exigir que el sistema de referencia cumpla. En general, se pide que el sistema de referencia en cuestión sea inercial. A través de esta exigencia incorporamos condiciones para asegurar el cumplimiento del principio establecido. Por ejemplo, para que el sistema de referencia sea inercial sus ejes no deberán rotar con respecto del resto universo como un todo<sup>1</sup> (Green, 1985, p. 49) y las ecuaciones diferenciales del movimiento de los objetos en él no deben poseer términos de aceleración. Concluida esta etapa, donde enunciamos la propiedad fundamental que el sistema de referencia debe cumplir, estamos frente a un sistema de referencia *ideal*. Un enunciado abstracto que aún debe ser materializado.

Los pasos 2 y 3 están íntimamente ligados entre sí. Por un lado, debemos elegir una estructura física cuyos movimientos en el sistema ideal admitan ser descriptos por las leyes de la Física. En particular, y considerando que este texto es introductorio a la Astrometría de precisión, exigiremos que se cumplan las leyes básicas de la Dinámica, dicho de otro modo, las Leyes de Newton.

Por otro lado, luego de haber elegido la estructura física, es necesario modelarla. Durante el modelado es común adoptar constantes, establecer condiciones iniciales o fijar parámetros. Todo esto debe hacerse unívocamente y libre de ambigüedades para evitar incertezas. Este objetivo sólo se cumplirá si somos capaces de asociar convenciones al modelo desarrollado. Por todo esto, luego del tercer paso, estaremos frente a un Sistema de Referencia *Convencional*.

---

<sup>1</sup> Principio de E. Mach

**Tabla 1.1.**

*Ejemplos del método de los cuatro pasos para sistemas de referencia celestes*

	<b>Dinámico</b>	<b>Cinemático</b>
1	Los astros se mueven de tal forma que sus ecuaciones de movimiento no poseen términos de aceleración (Sólo aplicación en un entorno del sistema solar, asume Mecánica Newtoniana) <sup>2</sup>	Asume la existencia de objetos “en reposo” <sup>3</sup>
2	Sistema Solar, Sistema Tierra – Luna	Cuásares, radio estrellas, objetos extragalácticos en general con movimiento propio ( $\mu$ ) no discernible
3	Masas planetarias, condiciones iniciales para las ecuaciones de movimiento.	La dirección de los ejes coordenados se fija en el espacio por convención y estos ejes son independientes de los planos fundamentales y/o líneas nodales asociadas a la dinámica de la Tierra
4	<b>Catálogos fundamentales clásicos:</b> posiciones estelares referidas a posiciones observadas de planetas	<b>Marco de Referencia Celeste Internacional (ICRF, International Celestial Reference Frame):</b> reducciones de observaciones de la Interferometría de Línea de Base muy Larga (VLBI, Very Long Baseline Interferometry) a radio fuentes extragalácticas lejanas

*Nota: Basado en Kovalevsky y Mueller, 1989.*

Concluido el tercer paso, estaremos en condiciones de definir coordenadas para un dado objeto. Estas serán el resultado de aplicar los modelos adoptados a las estructuras físicas elegidas en los pasos anteriores. Sin embargo, estas coordenadas definidas aún son inaccesibles. La accesibilidad del sistema de referencia quedará garantizada luego de su materialización. Una vez aplicados los modelos y las convenciones adoptadas para describir la

<sup>2</sup> Nótese que para que el sistema pueda ser considerado inercial, su origen también debe serlo. Por lo tanto, el origen debe ser baricéntrico (Baricentro del Sistema Solar). Asumiendo a la galaxia en movimiento circular puede estimarse una aceleración despreciable ( $\approx 2 \times 10^{-10} \text{ m seg}^{-2}$ )

<sup>3</sup> Velocidad despreciable

posición y los movimientos de los objetos o estructuras físicas elegidas y observadas, se obtendrán las posiciones del conjunto finito de  $N$  objetos seleccionados. Afirmaremos entonces que son  $N$  los puntos que *materializan* el sistema de referencia.

De modo que las coordenadas de los  $P_i$  objetos (con  $i = 1, \dots, N$ ), y sus respectivos errores estadísticamente estimados, constituyen el *Marco de Referencia* o lo que es lo mismo la *materialización* del sistema de referencia.

Así el conjunto de posiciones conocidas  $P_i$  (marco de referencia), permitirá asociar el punto  $A$  de posición desconocida a su sistema de referencia. En resumen: Para determinar la posición del punto incógnita  $A$ , bastará con determinar la posición de  $A$  con respecto a los  $P_i$ .

Nos queda pendiente el tratamiento de un punto importante durante este proceso. Es necesario agregar un quinto paso para asegurarnos que las coordenadas determinadas estén libres de errores sistemáticos. Para ello debemos evitar los errores provenientes de la escala de tiempo asociada al marco.

Efectivamente, un error en la referencia temporal afectará del mismo modo al movimiento de *todos* los objetos en el marco. Ignorar este efecto puede causar una *deformación* o distorsión del marco de referencia y por lo tanto es esencial asociar una *escala de tiempo uniforme* (ver Capítulo 9) al proceso de materialización del sistema de referencia.

Finalmente, si el número  $N$  de puntos resulta insuficiente para permitir la posición de cualquier punto incógnita, será necesario extender el proceso a un nuevo conjunto secundario de puntos. Si este es el caso, estaremos frente a una *extensión* o *densificación* del marco de referencia.

## Referencias

- Green R. M. (1985) *Spherical Astronomy*. Cambridge University Press.
- Kovalevsky J. y Mueller I. (1989) *Introduction in Reference frames in Astronomy and Geophysics*. J. Kovalevsky, I. Mueller y B. Kolaczek (eds.). Kluwer Academic Publishers.