



Grupo de Geodesia Satelital de Rosario

Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Universidad Nacional de Rosario

GEORREFERENCIACIÓN

Edición 2022

Índice de contenido

Contenido	Pág.
I. Georreferenciación	I-1
I.1. Información Georreferenciada	I-1
I.2. Coordenadas geográficas: ¿cómo obtenerlas?	I-2
I.3. La Georreferenciación	I-3
I.4. Ciencias, profesiones y georreferenciación	I-3
I.5. Salto tecnológico devenido en cambio cultural	I-4
I.6. Aplicaciones	I-4
II. Coordenadas	II-1
II.1. El espacio territorial y las coordenadas	II-1
II.2. Definiciones y reseñas	II-1
II.2.1. Coordenadas geográficas Latitud y longitud	II-1
II.2.2. Coordenadas cartesianas	II-6
II.3. Observando nuestro presente. Sistemas y superficies de referencia	II-7
II.3.1. Sistemas de referencia. De extensiones locales a globales	II-7
II.3.1.1. Sistema de referencia local	II-8
II.3.1.2. Sistema de referencia global (único para todo el planeta)	II-9
II.3.2. Superficies de referencia	II-10
II.3.2.1. Elipsoide. Coordenadas geodésicas	II-10
II.3.2.2. Geoide	II-12
II.4. Coordenadas cartesianas y geodésicas. Aplicaciones	II-13
Complemento: Marcos de referencia	II-15
III. Sistemas de Posicionamiento Global	III-1
III.1. Historia	III-1
III.2. Sistema GPS	III-2
III.3. Obtención de coordenadas	III-4
III.4. Métodos de obtención de coordenadas	III-7
III.5. Estación Permanente GPS (o bien GNSS)	III-13
IV. Cartografía	IV-1
IV.1. Cartas, mapas y planos	IV-1
IV.2. Historia de la cartografía argentina	IV-1
IV.3. La representación plana	IV-2
IV.4. Representación cartográfica Gauss-Krüger	IV-4
IV.5. Cartografía y georreferenciación	IV-6
IV.6. Distintos tipos de cartas	IV-6
IV.7. Cartografía digital	IV-6
V. Bibliografía	V-1
Anexo A: Agricultura de precisión	A-1

I. Georreferenciación

Definición. Significación práctica en las actividades humanas. Diversos tipos de aplicaciones: investigación científica (desplazamientos de la corteza terrestre, monitoreo de corrientes marinas, etc.), catastro multifinalitario (identificación de parcelas públicas y privadas, áreas de reservas naturales, límites administrativos, etc.), agricultura de precisión, navegación (aérea, marítima, fluvial y terrestre), construcción de obras, Sistemas de Información Geográficos (SIG), asuntos legales, etc. Ejemplos. Su significación actual.

I.1. Información georreferenciada

Hoy es habitual encontrar la expresión "**información georreferenciada**", ¿cuál es su significado? Se entiende que una información está georreferenciada cuando se conocen las coordenadas geográficas, latitud y longitud, de un punto (o un conjunto de puntos) del espacio terrestre vinculados a esa información.

En rigor deberíamos hacer la salvedad de que, en algunos casos, también es necesaria la altura y la época, cuestión que analizaremos más adelante. Momentáneamente nos referiremos a esas dos coordenadas señaladas, latitud y longitud.

La "información georreferenciada" puede ser del más diverso tipo, pongamos por caso la identificación de un elemento físico, como la ubicación de un hotel o un cruce de rutas, también podría ser un suceso tal como un acto artístico o un accidente, o bien un dato estadístico como el promedio de lluvia anual.

Esa es la condición necesaria y común a todos los casos: conocer las coordenadas.

Otra cosa distinta es como se presenta esa información al usuario, que puede ser mediante mapas, mediante archivo digital, mediante Sistemas de Información Geográficos. Seguramente la forma más difundida es la de los mapas.

No necesariamente se muestran las coordenadas, pero ellas son el sustento que permite obtener todo lo demás.

La posibilidad de contar, más o menos fácilmente, con información georreferenciada ha producido un enorme impacto en todo el conocimiento que, de una u otra manera, tiene que ver con las actividades humanas vinculadas al territorio.

Los aparatos popularmente conocidos como GPS, los que se utilizan en vehículos, no hacen otra cosa que trabajar con información georreferenciada, previamente acumulada en su memoria, vinculándola con la ubicación del vehículo que obtiene en cada momento mediante posicionamiento satelital. Así funcionan los navegadores portátiles.

Lo único que se obtiene en cada instante es la posición. El resto es vincular esa información con la previamente disponible.

Cuando se dice "el GPS funciona mal", por ejemplo, porque no indica un camino de construcción relativamente reciente, no es en realidad producto de un "mal funcionamiento", sí es en cambio producto de la falta de actualización de la información georreferenciada memorizada, la que no se adquiere por vía de los satélites.

Debe diferenciarse entre una información previamente georreferenciada, producto de una acción anterior y la acción de "georreferenciar" algo, es decir determinar sus coordenadas, para que ese algo pase a la categoría de información georreferenciada.

Demás está decir que si lo que se georreferencia es algo fijo basta efectuar la operación una vez, pero si se trata de un móvil la operación debe ser continuada.

Georreferenciación

Hasta no hace muchos años, pongamos finales del siglo XX, la información correlacionada con coordenadas geográficas era escasa, solía estar disponible principalmente en mapas o bien en estudios específicos de algunos temas y su acceso era muy limitado.

Sin embargo, el conocimiento de la latitud y longitud correspondiente a un hecho o fenómeno es muy antiguo, eso no es lo nuevo.

Antes del advenimiento del posicionamiento satelital, esas coordenadas, como veremos más adelante, no respondían a un sistema único mundial, estaban condicionadas por parámetros que fijaba cada país o región.

Lo nuevo, lo que nos permite hablar de georreferenciación o de información georreferenciada son tres cuestiones, a saber:

- Por un lado, la existencia de un sistema de referencia único mundial.
- Por otro la facilidad con que se puede obtener las coordenadas.
- Y además la facilidad de su aplicación práctica, mediante el uso de la informática y en particular de internet.

Actualmente, a partir del Sistema de Posicionamiento Global llamado GPS, existe un uso popular de la información georreferenciada, más allá de que quien lo hace tenga o no conocimientos específicos al respecto.

El caso más típico es el de los celulares, otrora llamados teléfonos celulares.

Estamos acostumbrados al uso de gran cantidad de aplicaciones, pongamos por caso averiguar la pronta llegada de un vehículo de transporte público, pero no es habitual pensar que el receptor satelital de ese vehículo está transmitiendo sus coordenadas a un centro de procesamiento que las vincula, en tiempo y espacio, con las coordenadas de nuestro lugar de espera.

Como si fueran un fantasma, aunque no se expongan a la vista, detrás están siempre las coordenadas.

1.2. Coordenadas geográficas: ¿cómo obtenerlas?

Desde al año 1994 está plenamente operativo el Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Como suele suceder se acostumbra identificar con ese nombre al aparato que se utiliza, el cual, entre otras cosas, es un receptor de las señales satelitales que permiten calcular las coordenadas del punto en el cual está ubicado ese receptor.

GPS forma parte del sistema militar de los EEUU, pero se permite el uso civil dentro de determinadas precisiones.

Con posterioridad se habilitaron otros sistemas similares, creados por otros países o asociación de países, y actualmente existe un complejo de sistemas satelitales que pueden ser usados en forma conjunta, al cual se lo denomina Sistema Satelital de Navegación Global, y se lo conoce con la sigla **GNSS** por su expresión en inglés, Global Navigation Satellite System.

En definitiva, es muy fácil obtener coordenadas.

Sólo se necesita contar con un receptor satelital y con cielo disponible que permita acceder a las señales satelitales.

En esas condiciones es posible obtener coordenadas con precisión de algunos metros.

Esto es así al menos por ahora. No obstante, la tecnología avanza y también es posible, con limitaciones y mediante sistemas adicionales, obtener coordenadas en sitios cerrados.

Más adelante veremos qué pasa cuando existen requerimientos especiales, como por ejemplo cuando se pretende que el conocimiento de las coordenadas sea con alta precisión.

I.3. La Georreferenciación

La georreferenciación consiste en la identificación de todos los puntos del espacio (aéreos, marítimos, fluviales o terrestres; naturales o culturales), mediante coordenadas referidas a un único sistema mundial.

Las coordenadas son algo así como el **Documento Universal de Identidad** (sería el DUI) de cada uno de los puntos del espacio.

Por ejemplo, se puede ver en Google Earth:

32° 57' 33.6" S, 60° 37' 46.6" W ⇔ Esquina Pellegrini y Ayacucho, Rosario

32° 57' 34.3" S, 60° 37' 41.9" W ⇔ Esquina Pellegrini y Colón, Rosario

La Georreferenciación sólo identifica la posición, pero a partir de allí se posibilita una infinidad de aplicaciones. Por ejemplo, vincular unos puntos con otros calculando la distancia que los separa.

Pero además permite correlacionar datos referentes al mismo punto (información georreferenciada) proveniente de distintas épocas y/o de distintas fuentes informativas. Por ejemplo, calcular el desplazamiento de la corteza terrestre, en determinado lugar, con motivo de un terremoto.

En el año 2010, por efecto del terremoto con epicentro en Concepción, Chile, la Estación Permanente GNSS de esta Facultad registró un desplazamiento del orden de los 3 centímetros hacia el Oeste.

Seguramente cuando el terremoto de Cauçete, San Juan, la consecuencia no fue menor pero entonces, 1977, era imposible medirlo.

A modo de anécdota podemos referir que en conversación con un ex-alumno, recibido hacía siete años, preguntó si en la Facultad todo seguía igual, si estaba "en el mismo lugar"; le contestamos que no, y, ante su asombro, le dijimos que en esos siete años se había desplazado alrededor de 7 centímetros hacia el norte, por efecto del movimiento de las placas tectónicas.

Así nos vamos acercando a la idea de la importancia de la georreferenciación en el estudio de la naturaleza y la actividad humana.

I.4. Ciencias, profesiones y georreferenciación

Sabemos que el objeto de estudio de muchas ramas de la ciencia es o bien directamente el **territorio** o bien fenómenos vinculados en forma más o menos directa con el **territorio**.

La georreferenciación concretiza la correlación entre esos conocimientos y el territorio.

Lo mismo pasa con diversas profesiones.

Podemos decir que hoy, utilizando un navegador satelital (o un celular), **es posible "caminar" sobre mapas.**

Pareciera que la tecnología se empeña en demostrar que las aventuras de la imaginación, si son geniales, merecen ser corroboradas.

Veamos si no el breve cuento publicado en 1946 por Jorge Luis Borges, quien en uno de sus juegos literarios, lo atribuye a un supuesto y antiguo autor.

"Del rigor en la ciencia

En aquel Imperio, el Arte de la Cartografía logró tal perfección que el mapa de una sola Provincia ocupaba toda una Ciudad, y el mapa del Imperio, toda una Provincia. Con el tiempo esos mapas desmesurados no satisficieron, y los Colegios de Cartógrafos levantaron un mapa del Imperio que tenía el tamaño del Imperio y coincidía puntualmente con él. Menos adictas al Estudio de la Car-

Georreferenciación

tografía, las generaciones siguientes entendieron que ese dilatado mapa era inútil y no sin impiedad lo entregaron a las inclemencias del sol y de los inviernos.

En los desiertos del oeste, perduran despedazadas ruinas del mapa, habitadas por animales y por mendigos; en todo el País no hay otra reliquia de las Disciplinas Geográficas...”

*Suárez Miranda; Viajes de varones prudentes, Libro Cuarto, Cap. XLV,
Lérida, 1658*

Veamos ahora un ejemplo de domicilio expresado en lenguaje universal:

	
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, INGENIERÍA Y AGRIMENSURA UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO	
Avda. PELLEGRINI 250 C.P. 2000 ROSARIO REPÚBLICA ARGENTINA	Teléfono: +54 - 341 - 4802649 /52 Correo electrónico: secdec@fceia.unr.edu.ar LATITUD: 32° 57' 33,3" S LONGITUD: 60° 37' 43,9" W

1.5. Salto tecnológico devenido en cambio cultural

Es indudable que, por su incidencia en una enorme gama de actividades humanas, la georreferenciación mediante posicionamiento satelital ha devenido rápidamente de salto tecnológico en cambio cultural.

No es necesaria demasiada ilustración. El uso en los celulares, en los taxis o el acceso a programas como Google Earth o Google Maps, así lo demuestran.

Ahora bien, ante tal cambio, ¿cuál es la situación, el papel y la necesidad de cada científico, de cada docente, de cada profesional, atendiendo naturalmente a los requerimientos propios de su especialidad?

La georreferenciación ¿es una herramienta a utilizar? ¿Hasta dónde es necesario conocer sus “secretos”? ¿Hasta dónde se precisa divulgarlos?

¿Cuáles son los fundamentos del posicionamiento satelital? ¿Quedamos dominados por la “magia” de la tecnología (y sus mitos) o podemos ser protagonistas?

La georreferenciación ¿es una herramienta en la docencia y la investigación en cada uno de nuestros ámbitos?

Estos y otros interrogantes son parte de la temática a abordar y, quizás, y al menos en parte, puedan ser debatidos y/o respondidos en el desarrollo del curso.

1.6. Aplicaciones

A los efectos de una mayor ilustración mencionamos algunas aplicaciones de la georreferenciación que no pretenden agotar, de ningún modo, todas las existentes y menos aún todas las posibles.

Georreferenciación

En el desarrollo del curso el tema se presta a riquísimos comentarios; seguramente será el aporte de los asistentes la mayor fuente de ampliación y profundización, a partir de la experiencia y las inquietudes de cada una de las especialidades.

Suponemos que, naturalmente, es posible que sean muchos más los interrogantes que surjan que las dudas que se despejen.

Científicas

- Medición del desplazamiento de la corteza terrestre
- Monitoreo de corrientes marinas
- Velocidad de aguas fluviales
- Límites de cuencas hidrográficas
- Estudio de desplazamiento de la fauna

Catastrales

- La ley Nacional, de Catastro, N°26209, en el art. 5° considera elemento esencial "*La ubicación georreferenciada del inmueble*"
- Límites administrativos
- Áreas de reservas
- Información georreferenciada para los censos y obtenidas en ellos
- Zonas periurbanas de restricción del uso de herbicidas

Movimiento de personas y cosas, seguramente la aplicación más difundida

- Transporte
 - Aéreo
 - Marítimo
 - Fluvial
 - Terrestre
- Circulación de vehículos

Construcción de Obras de Ingeniería.

- Conexión física: Rosario – Victoria, coordenadas de las cabeceras de la obra, construcción simultánea de puentes

Asuntos legales

- Persecución del contrabando y narcotráfico
- Límites de las propiedades
- Contratación y pago de seguro

Agricultura de precisión

- Conocimiento de la Topografía
- Elaboración de mapas de suelos
- Mapas de rendimiento
- Guiado y autoguiado de maquinaria
- Dosificación de productos orgánicos
- Programación de siembra
- Delimitación de cultivos agroecológicos

Ver ilustración en Anexo A

Georreferenciación

Sistemas de Información Geográfica (SIG)

- Los SIG integran información gráfica y alfanumérica correlacionada por su georreferenciación. A título ilustrativo las podemos considerar "capas" superpuestas como muestra la Figura I-1, en la cual mencionamos algunas posibles capas. Dependerá de cada disciplina establecer qué capas le son necesarias.

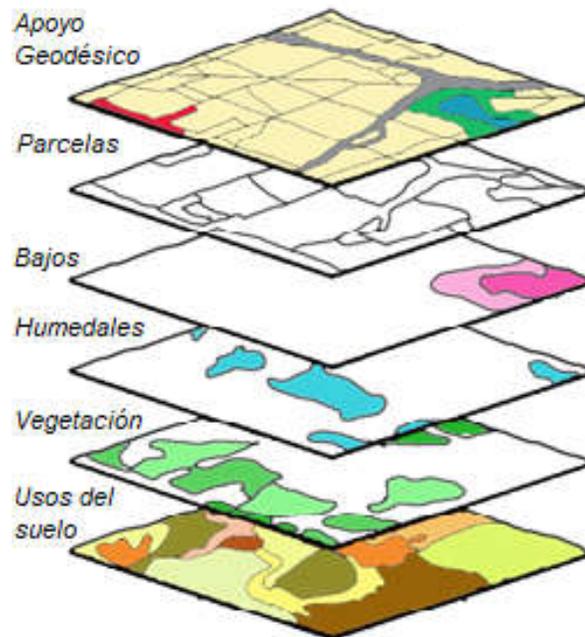


Figura I-1: Esquema ilustrativo de la superposición de capas en un SIG
(Modificado de Servicio Transfronterizo de Información Geográfica: <http://www.stig.usal.es>)

Uso militar (y sus paradojas)

- Bombardeo quirúrgico
- Degradación de la precisión

II. Coordenadas

El espacio territorial expresado mediante coordenadas. Coordenadas geográficas: latitud, longitud. Coordenadas cartesianas. Sistemas de referencia: local y global. Superficies de referencia: esfera, elipsoide, geoide.

II.1. El espacio territorial expresado mediante coordenadas

Aquellas disciplinas vinculadas al espacio territorial, requieren de su conocimiento con la finalidad de poder desarrollar propósitos inherentes a objetivos planteados. A modo de ejemplo, podemos citar la elaboración de un mapa que permita representar la superficie cubierta por bosques nativos de una determinada zona geográfica, con la finalidad de efectuar un registro público catastral para analizar su evolución temporal. Esta elaboración involucra múltiples tareas, pudiendo citar: (i) relevamiento topográfico de dichos bosques (in situ o teledetección); (ii) localización espacial dentro del área relevada – que comprende posición relativa respecto a alguna referencia –; (iii) representación gráfica – cartográfica –, acompañada de una simbología representativa que posibilite su comprensión y análisis; entre otras.

Así entonces, considerando el ejemplo citado, entre otros, la solución involucra el conocimiento del espacio territorial, para lo cual determinamos:

- Forma
- Dimensión
- Ubicación

de aquellos elementos (naturales o no) existentes sobre la superficie terrestre

Considerando entonces la falta de regularidad de la superficie terrestre, podemos aproximarnos a su representación mediante la determinación de la posición espacial de puntos relevantes de la misma. Llamaremos este tipo de representación: 'discretización', designación admitida por contraposición a una representación continua de la variación de la superficie terrestre.

Cuando expresamos determinar la posición espacial de puntos, nos referimos a vincularse con la asignación de coordenadas a dichos puntos.

¿Por qué esta vinculación? Porque las coordenadas constituyen una herramienta que nos ayuda a conocer la localización y orientación relativas (sin excluir la posibilidad de lo absoluto) entre puntos, habiéndose asumido y/o establecido una determinada referencia.

Citemos otro ejemplo: sea una línea eléctrica de alta tensión que atraviesa terrenos de inmuebles urbanos y/o rurales. Para evitar sus efectos perjudiciales, determinaremos las franjas de seguridad requeridas. Entonces, mediante asignación de coordenadas tanto para la traza de la línea de alta tensión como de los lugares linderos, podremos así obtener localización y orientación relativas entre ellos.

En cuanto a coordenadas, podemos trabajar con diversos tipos dependiendo de la finalidad, pero nosotros nos centraremos en latitud y longitud geográficas (esféricas o elipsóidicas), y cartesianas (bidimensionales o tridimensionales).

II.2. Definiciones y reseñas

II.2.1. Coordenadas geográficas latitud y longitud

Para definir las, vamos a considerar como primera aproximación de nuestro planeta Tierra, una esfera, con su eje de rotación determinado por los polos Norte y Sur. Aquellos planos que intercepten al cuerpo esférico perpendicularmente al eje de rotación, determinan círculos que son los llamados paralelos; mientras los meridianos, se originan al interceptar la esfera con aquellos

Georreferenciación

planos que pasan por el eje de rotación (Figura II-1). Aquel plano perpendicular al eje que contiene al centro geométrico de la esfera, determina un círculo máximo que es considerado origen para la coordenada latitud. Ésta se define como el ángulo entre este círculo máximo (el que se denomina Ecuador), y la recta que une el centro de la esfera con un determinado punto de la superficie terrestre. Para el caso de la longitud, su definición requiere también considerar un círculo máximo 'origen', y se determina como el ángulo entre el meridiano del círculo máximo 'origen' y el meridiano que pasa por el punto considerado. (Figura II-2) (Ibáñez, 2011).

La latitud y longitud se definen positivas hacia el Norte y Este respectivamente; y varían entre -90° a 90° , la latitud, y -180° a 180° , la longitud. Generalmente los valores numéricos de latitud y/o longitud se los señala acompañados por la letra del hemisferio correspondiente a la ubicación del punto; por ejemplo: $33^\circ S$; $60^\circ W$, significa que el punto se localiza al Sur del paralelo del Ecuador, y al Oeste del meridiano origen, denominado Meridiano de Greenwich tal como muestra la Figura II-2 (a). Cabe aclarar que, para el caso de la longitud, se emplea la letra W para señalar el Oeste, que proviene de su traducción al inglés: West, y de esa manera se evita confusión entre la letra "O" y el número 'cero'; también puede señalarse: -33° ; -60° , es decir, precediendo a los números con signos negativos.

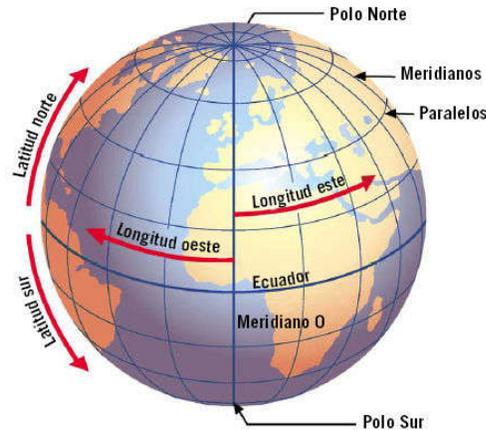


Figura II-1: Paralelos, meridianos, latitud y longitud para una aproximación esférica del planeta (Fuente: Doncel Domínguez, 2014)

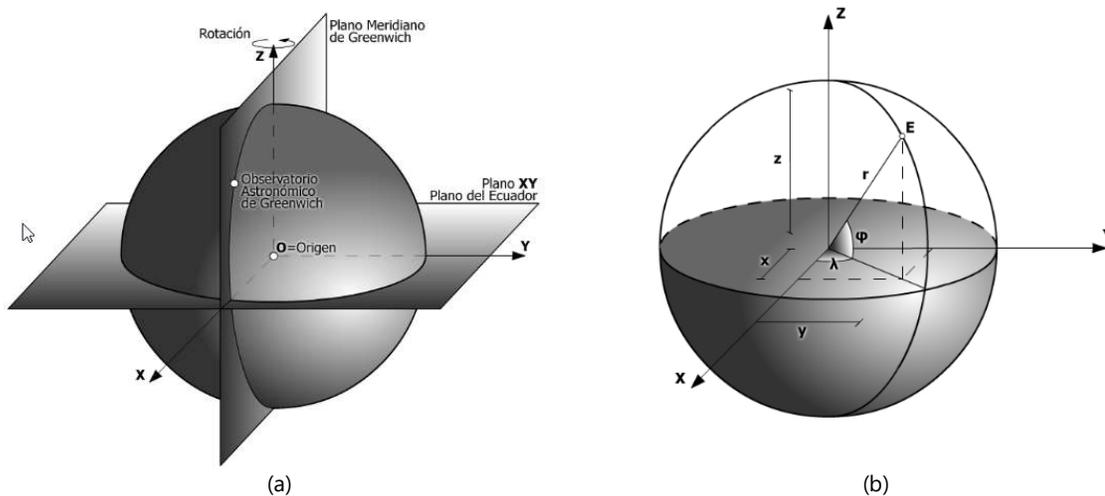


Figura II-2: (a) Primera aproximación del planeta: una esfera. Paralelo y Meridiano orígenes. (b) Coordenadas latitud (φ) y longitud (λ) geográficas del punto E (Fuente: Furones, 2010)

De meridianos y paralelos

Nos remontamos a la ciudad de Alejandría. Esta ciudad era un centro de desarrollo para las ciencias, su museo albergaba una biblioteca que reunía conocimientos de la época, y su notoriedad perduró alrededor de quinientos años. Entre los "alejandrinos", podemos citar a Euclides, Arquímedes, Eratóstenes, Hiparco, Ptolomeo, entre otros. Entre los mencionados, destacamos a Eratóstenes de Cirene (276-194 a. C.), contemporáneo de Arquímedes, quien fuera bibliotecario del museo de Alejandría y un notable geógrafo. "Famosamente" conocido porque fue quien calculó por primera vez la circunferencia de la Tierra⁽¹⁾, y además, desde un enfoque cartográfico, a él se le atribuye la creación de lo que hoy en día conocemos como paralelos y meridianos. Tal como se visualiza en la Figura II-3, él empleó líneas horizontales y verticales como referencia, que no fueran dibujadas de manera regular, y cuyas direcciones atravesaban lugares conocidos (Papp, 1996). Así, estas direcciones, permitían especificar la localización de puntos en forma de pares ordenados.

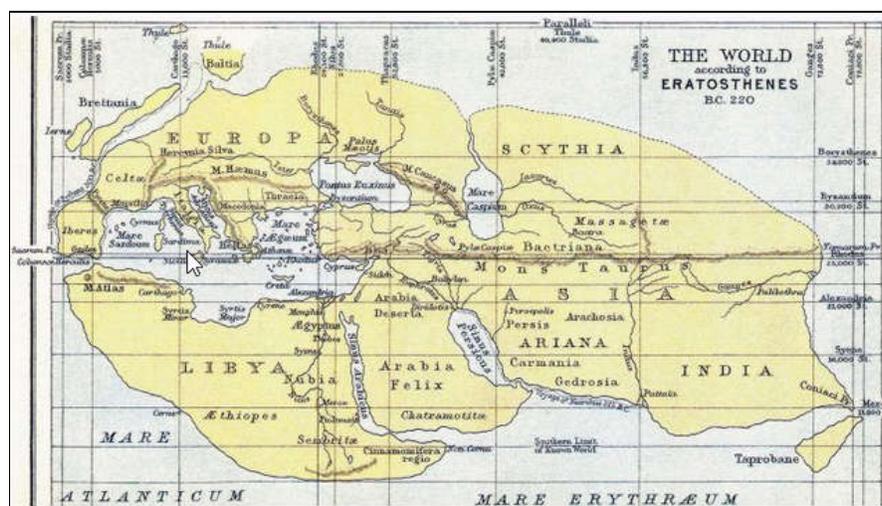


Figura II-3: Reconstrucción del mapa atribuido a Eratóstenes (Fuente: Prieto, 2016)

También se atribuye a Eratóstenes haber refutado la creencia griega que existía sólo un hemisferio donde se podía habitar, admitió la existencia de antípodas, y predijo la existencia de un continente en el Atlántico (Papp, 1996).

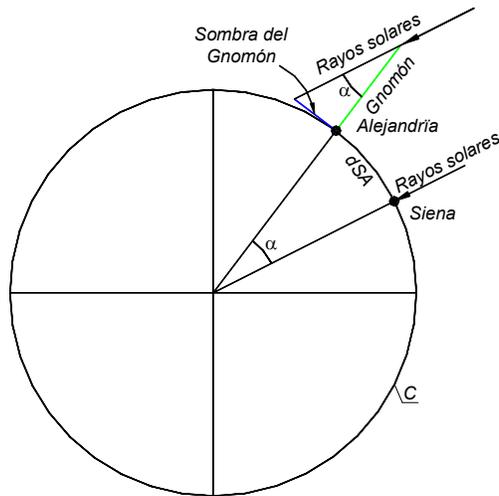
Hiparco de Nicea (180-120 a. C.), también emplea en sus mapas paralelos y meridianos, pero, a diferencia de Eratóstenes, traza un sistema 'regular', es decir, mantiene igual distancia de separación entre ellos (Ibañez, 2011). Tal como lo explica Schlögel, 2007, establece una red sistemática para posicionar los lugares.

Ptolomeo (?-150 d.C.), el último de los grandes representantes de la astronomía antigua, fue, junto a Eratóstenes y Estrabón, uno de los notables geógrafos de la Antigüedad. Escribió sus conocimientos en obras conocidas bajo los nombres 'Almagesto' y 'Geografía' (Papp, 1996).

⁽¹⁾ El procedimiento que aplicó Eratóstenes para el cálculo de la circunferencia de la Tierra, consistió en determinar dos posiciones, correspondientes éstas a las ciudades de Alejandría y Siena (asumidas sobre el mismo meridiano, aunque con el tiempo se demostró que no lo estaban). En la época del solsticio de verano, observó que en una de las posiciones, el rayo solar no originaba ninguna sombra por la señal colocada, mientras que en la otra posición, en igual horario y día, sí lo hacía. Tal como se observa en la Figura II-5, la sombra proyectada originada por los rayos solares (asumidos paralelos), formaba un ángulo

Georreferenciación

igual a 7.2 grados (α en la figura). Considerada la Tierra de forma esférica, podía establecerse la relación que 7.2 grados equivalía a 1/50 de 360 grados; entonces, multiplicando la distancia, de 5000 Estadios, que separaba a las dos ciudades por 50, pudo obtenerse el valor de 250000 Estadios. Se considera que los Estadios eran griegos y no egipcios, y siendo su valor en metros equivalente a 157.5, los 250000 resultaban igual a 39375 km (Papp, 1996).



$$\alpha = 7.2^\circ$$

$$\alpha = \frac{360^\circ}{50}$$

Distancia Siena-Alejandría (d_{SA}):

$$d_{SA} = 5000 \text{ Estadios}$$

Circunferencia (C):

$$\frac{7.2^\circ}{360^\circ} = \frac{1}{50} = \frac{d_{SA}}{C} \rightarrow C = d_{SA} \times 50$$

$$C = d_{SA} \times 50 = 5000 \text{ Estadios} \times 50$$

$$C = 250000 \text{ Estadios}$$

Figura II-5: Procedimiento esquemático de la medición de Eratóstenes (Modificado de Ibáñez, 2011)

Para representar una superficie esférica en un plano, ideó sistemas de proyección para la elaboración de mapas, y entre ellas, proyectó una al estilo cónico con centro en el Polo Norte, paralelos como círculos, y los meridianos, como líneas rectas (Ibáñez, 2011). La Figura II-4 muestra el 'mapamundi' atribuido a Ptolomeo, donde se observa un sistema de paralelos y meridianos empleado en la representación.



Figura II-4: Mapamundi de Ptolomeo. Puede observarse la red de paralelos y meridianos empleados en la representación (Fuente: Prieto, 2016)

Sobre las determinaciones de latitud y longitud

La determinación de la latitud -era accesible porque- se realizaba, por ejemplo, mediante la utilización del gnomón⁽²⁾, y su cálculo estaba en función del pasaje del Sol. También, podía medirse durante la noche empleando, por ejemplo, -para el Hemisferio Norte- la estrella Polar, midiendo su altura mediante el uso de instrumentos tales como el astrolabio, cuadrante o ballestilla (Ibañez, 2011). Para el caso del Hemisferio Sur, se podía emplear la constelación de la Cruz del Sur. Así entonces, la observación astronómica era la herramienta que proporcionaba la solución para esa coordenada. Sin embargo, la determinación de la longitud ameritó un tiempo considerable para su resolución satisfactoria. En la travesía de Colón, quien zarpa en agosto de 1492 con destino hacia Asia incursionando por el océano Atlántico hacia el Oeste, según Ibañez, 2011, su dirección era "invariable", ya que se mantenía aproximadamente sobre la misma latitud, entre los paralelos 26° y 30°, puesto que era la -única- que podía determinar con lo que disponía. Illán García, 2015, enumera los instrumentos que ayudaban su 'orientación' en el recorrido. Éstos eran: una 'aguja de marear', un astrolabio, un cuadrante, ampolletas o relojes de arena, y un escandallo. La 'aguja de marear' era una terminología marina para hacer referencia a una brújula, que marcaba el norte magnético; el astrolabio, ayudaba a posicionarlos a partir de la observación del Sol y las estrellas; el cuadrante, permitía, observando el Sol, calcular la latitud; las ampolletas, para medir el tiempo; y el escandallo, consistía en una plomada, que habilitaba a obtener la profundidad por donde surcaba.

Con relación a la determinación de la longitud, Galileo, Newton, Halley, entre otros, estudiaron una solución al respecto. Por un lado planteaban su determinación astronómica, y por el otro, por diferencia horaria entre lugares de distinta longitud. Por diferencia horaria, considerando que el planeta realiza un giro completo de veinticuatro horas⁽³⁾, es decir, un giro de 360°, una hora de tiempo representaba 15°, 1 minuto de tiempo, una longitud angular de 15 minutos, y 4 segundos de tiempo, 1 minuto de longitud angular. Por estas equivalencias, surgía la importancia de determinar el tiempo con precisión. Frente a los intereses de aquellos que requerían una determinación satisfactoria de la longitud, por ejemplo, comerciantes ingleses marítimos, en los inicios del siglo XVIII, el Parlamento británico estableció un "Comité de longitud". Este Comité, para solucionar el problema, solicitó ayuda a Isaac Newton y Edmund Halley. Según Newton, estaba solucionado teóricamente pero no podía concretarse por los medios que se disponían en ese momento; por esta razón el Comité, fijó premios para aquellos que pudieran proponer posibilidades para su solución. Hubieron entonces propuestas tanto desde el punto de vista astronómico como horario. Respecto a este último, el reloj que se utilizara, debía no verse afectado por las perturbaciones provocadas por movimiento del navío, como así también por aquellas provenientes de temperatura, gravedad, entre otras. La solución definitiva provino de un relojero: John Harrison, quien proporcionó un "*reloj portátil de alta precisión*", y aunque Newton sostenía que la solución debía provenir desde el punto de vista astronómico, lo propuesto por Harrison cumplió con las exigencias que el Comité había establecido, y así recibió el premio convenido. Con el tiempo, este reloj - cronómetro - ideado por Harrison fue utilizado más asiduamente, demostrándose buenos resultados (Nagel, 1997).

⁽²⁾ Vara recta vertical que se utiliza marcando, en el suelo horizontal, su sombra durante una jornada completa.

⁽³⁾ Mientras Torres Bravo (2001), expresa que la división en horas del día se remonta a los pueblos babilonios y caldeos de la Mesopotamia, y que luego los egipcios fijaron una división en 24 horas, otros autores adjudican dicha división sólo a los pueblos de la Mesopotamia.

Orígenes de las latitudes y longitudes geográficas

Respecto a la latitud, tal como fuera mencionado con anterioridad, el círculo máximo de la aproximación esférica de la Tierra, es decir, el círculo máximo denominado Ecuador, fue considerado el paralelo origen para las latitudes geográficas.

Respecto a la longitud, recién en 1884 se propuso un meridiano origen que fuera globalmente consensuado y aceptado. A modo de ejemplos, respecto al mapa atribuido a Eratóstenes, el meridiano de referencia pasaba por la ciudad de Alejandría; Ptolomeo, tal como lo señala Papp, 1996, definía su meridiano de referencia en unas islas llamadas Afortunadas⁽⁴⁾, que se localizaban en el sector más occidental de lo que se conocía, y los siguientes meridianos los separaba regularmente cada cinco grados desde el Oeste hacia el Este. En 1884, fue el meridiano que pasaba por el Observatorio Real de Greenwich, Inglaterra, el que se propuso para ser meridiano cero, de referencia, para los ángulos longitudinales (Ibáñez, 2011). Esta propuesta resuelta por la Conferencia Internacional del Meridiano, realizada en Washington, no fue aceptada por Francia, que mantuvo como meridiano de referencia aquel que pasaba por el Observatorio de París. Esta situación se sostuvo hasta el año 1911, donde el 'meridiano de Greenwich' fue finalmente aceptado como referencia global (Nagel, 1997).

⁽⁴⁾Estas islas, actualmente se asocian a las islas Canarias (archipiélago autónomo español del Océano Atlántico) y Madeira (archipiélago perteneciente a Portugal).

II.2.2. Coordenadas cartesianas

Para definir las coordenadas cartesianas de un punto, necesitamos establecer un sistema de referencia, que comprende, para el caso bidimensional, un par de ejes a los cuales vincularse, asociados a una unidad de medida, perpendiculares entre sí, y un origen, al cual concurren ambos ejes. La abscisa x es la longitud desde el origen hasta la proyección perpendicular del punto al eje positivo de las x , o de las abscisas, mientras la ordenada y , se obtiene de manera análoga respecto al eje de las y positivas (Figura II-6 (a)). Así entonces, podemos determinar para un punto al cual llamamos P , sus coordenadas cartesianas x e y , es decir, P queda representado por x_P e y_P (Figura II-6 (b)). La Figura II-7 muestra el caso tridimensional.

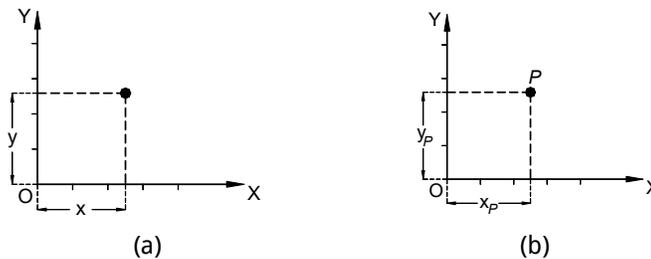


Figura II-6: (a) Coordenadas cartesianas, caso bidimensional. (b) Coordenadas cartesianas del punto P.

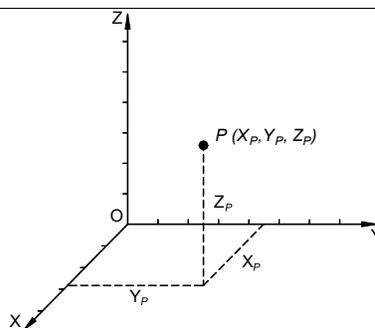


Figura II-7: Coordenadas cartesianas del punto P, caso tridimensional.

'Cartesianas', en referencia a "cartesius", que es la traducción de Descartes en latín. Por René Descartes así se llaman las coordenadas que habilitan la ubicación de un punto.

René Descartes, como así también Newton, Fermat, Harvey, Galileo, Copérnico, Kepler, y otros, pertenecen a un período que se caracterizó por los aportes científicos y metodológicos, contribuyendo así a un cambio paradigmático de la ciencia. Es un período que se separa del pensamiento precedente, asociado a los griegos y época medieval, evolucionando como una etapa transformadora (Ruiz Zúñiga, 2013).

Descartes, autor del libro "Discurso del método", donde manifiesta su filosofía racionalista (en latín 'Cogito ergo sum', que significa 'Pienso, luego existo'). Este libro cuenta con un apéndice denominado "Là Géométrie", cuyo aporte fue de importancia para las matemáticas, porque, entre otras, propone la posibilidad de encontrar la solución a un problema geométrico transformándolo en uno algebraico y a la inversa (Pérez García, 2013). Descartes aportó la paridad entre una ecuación y el lugar geométrico de un punto, representado por coordenadas (Papp, 1996); y empleaba las últimas letras del alfabeto para aquellos valores desconocidos, incógnitas, y de manera inversa para lo conocido, datos, de aquí la utilización de las letras x e y para las coordenadas de los puntos (Pérez García, 2013).

II.3. Observando nuestro presente. Sistemas y superficies de referencia

La aparición de los Sistemas de Posicionamiento Global a partir de satélites artificiales, ha evolucionado la obtención de coordenadas que identifican la posición espacial de cada punto de la superficie terrestre; y no sólo su obtención, sino la cobertura de las superficies sobre las cuales pueden adquirirse.

II.3.1. Sistemas de referencia. De extensiones locales a globales.

A modo de ejemplo: supongamos queremos realizar un mapa de una plaza, sita en una manzana determinada de la ciudad, que permita, dicha representación gráfica, identificar juegos para niños, como así también nos informe de eventuales desniveles en altura, con la finalidad de remodelarla y construir nuevas veredas y accesos diversos. La representación de lo que hay en la realidad, amerita conocer lo existente, y para ello, como ya fuera expresado, nos aproximaremos a la realidad, a través de la determinación espacial de aquellos puntos seleccionados que habiliten, en su conjunto, a cumplir con los requerimientos establecidos para la elaboración del mapa.

Así entonces, ¿cómo hacer para conocer la posición espacial de cada punto seleccionado? Podemos identificarlo mediante un juego de coordenadas, por ejemplo, las coordenadas cartesia-

nas tridimensionales (x, y, z) , y con la necesidad de relacionar los distintos puntos para efectuar la representación, sus coordenadas necesitan estar referidas a un mismo sistema de referencia, o dicho de otra manera, a un mismo sistema de ejes (tal como lo describe su definición). Por la reducida extensión de la superficie que se necesita conocer, trabajaremos con un sistema de referencia que denominaremos "local".

II.3.1.1. Sistema de referencia local.

Desde un punto de vista topográfico, las posibilidades de definir un sistema local, son diversas y todas admisibles, siempre y cuando los resultados que se obtengan sean coherentes y acordes a la finalidad que se establezca. En relación al ejemplo anteriormente mencionado, una manera podría ser emplear los cordones como "líneas de referencia", a los cuales medir los apartamientos de los puntos a representar, y así se solucionaría el caso de la localización 'horizontal', pero, ¿el conocimiento de las alturas?, ¿con qué referencia podría trabajarse?

De esta manera puede señalarse otra alternativa para definir un sistema local de referencia, el cual consiste en establecer un sistema cuyo eje z sea coincidente con una dirección que pueda ser materializable con simplicidad, y esa dirección corresponde a lo que conocemos como "vertical del lugar". La "vertical del lugar" es la denominación que se atribuye a la dirección que coincide con la del vector de gravedad, la cual puede materializarse a través de la dirección del hilo de una plomada gravitacional. Definido entonces el eje z, el origen del sistema se sitúa en un punto conveniente de la superficie terrestre, siendo este eje z, coincidente con la vertical de este punto origen, y el plano xy será perpendicular al mismo; de esta manera queda definido un sistema local al cual referir las coordenadas de los puntos a conocer (Figura II-8). Debido a la extensión considerada, en este caso reducida, puede admitirse para la zona que se estudia, una superficie 'plana' como referencia.

En una región acotada o relativamente pequeña: las verticales pueden ser consideradas paralelas entre sí, y las superficies, perpendiculares a ella, horizontales, planas (Figura II-9).

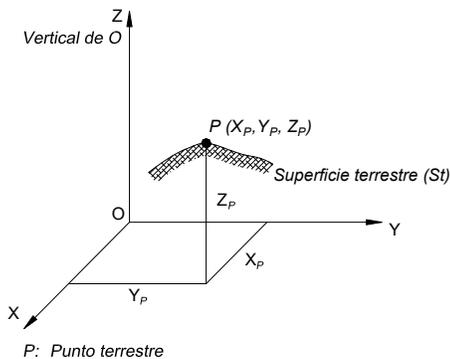


Figura II-8: Sistema de referencia local.

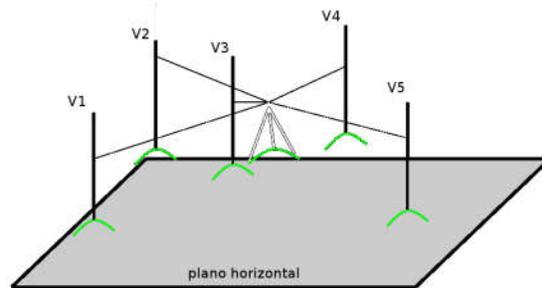


Figura II-9: Las verticales pueden ser consideradas paralelas para una región relativamente pequeña.

Ahora bien, ¿qué sucede si lo que queremos conocer se extiende a varias manzanas, o un pueblo, o una ciudad, una provincia, un país, un continente, o al planeta entero? La respuesta involucra la historia del desarrollo de varias ciencias, pero insistimos con preguntas: ¿qué sistema de referencia es acorde a grandes extensiones?, ¿qué coordenadas utilizamos?, ¿qué sucede con la curvatura terrestre?, ¿qué instrumentos de medición nos habilitan a conocer las coordenadas de los puntos con los cuales podemos aproximarnos a la realidad?, ¿qué procedimientos aplicamos para representar lo conocido?

II.3.1.2. Sistema de referencia global (único para todo el planeta).

Abordamos la elaboración de respuestas a ciertas preguntas planteadas, desde la "antípoda" de lo local, es decir, desde el enfoque global.

Al igual que el sistema local, el sistema global dispone de tres ejes y un origen, e implícitamente en ambos, una orientación. Para el caso global, la definición del sistema debe ser un acuerdo consensuado por su uso general. Ambos sistemas son fijos a la Tierra, es decir, solidarios con su movimiento de rotación.

Señalamos, lo que se conoce como el Sistema Internacional de Referencia Terrestre (sigla en inglés ITRS: International Terrestrial Reference System), que es una definición conceptual que comprende un conjunto de disposiciones y convenciones que habilitan definir el origen, orientación, escala y evolución del Sistema de Referencia Terrestre Convencional (sigla en inglés CTRS: Conventional Terrestrial Reference System).

El CTRS es una terna trirrectangular de mano derecha, fijo a Tierra, de ejes cartesianos x , y , z , cuyo origen coincide con el geocentro o centro de masas de la Tierra (incluyendo, las de la atmósfera e hidrósfera). El eje z se dirige hacia el polo convencional terrestre y coincide con el eje de rotación 'medio' de la Tierra, el plano ecuatorial medio forma el plano xy perpendicular al eje z , y el plano xz , se origina por el plano meridiano 'medio' de Greenwich, de cuya intersección con el plano ecuatorial, resulta el eje x . Cabe aclarar que el término 'medio' es a consecuencia de los cambios que se producen en el tiempo (Torge, 2001) (Figura II-10).

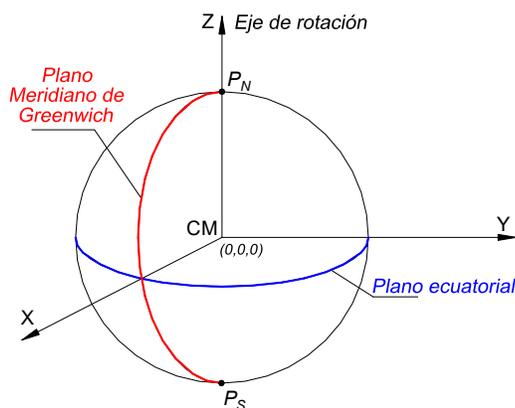


Figura II-10: Sistema de referencia terrestre convencional, adaptado a una aproximación esférica de la Tierra (Modificado de Torge, 2001).

La Figura II-11 nos ejemplifica relaciones entre sistemas locales y el global geocéntrico.

los vectores de la gravedad) concurren al centro, y las superficies horizontales (perpendiculares a las verticales), resultan esféricas (Figura II-12).

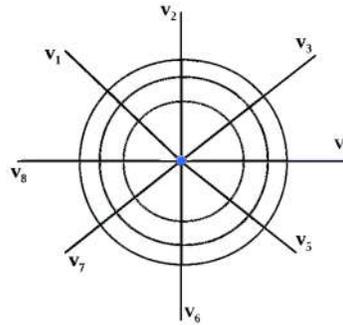


Figura II-12: Verticales concurrentes al centro y superficies horizontales esféricas.

Sin embargo, el desarrollo de la ciencia en la historia permitió arribar a la conclusión que la mejor aproximación al planeta, no es una esfera, sino una superficie acorde a un elipsoide, que surge como consecuencia de la rotación de una elipse alrededor de uno de sus ejes.

Arribar a esta aproximación 'elipsoidal del planeta', involucró múltiples debates e investigaciones científicas a lo largo de la historia, acompañados de cálculos pertinentes que posibilitaran demostrarlo. Ya mencionamos a Eratóstenes (siglo III a. C.), a quien se le atribuye la primera de las determinaciones fehacientes de las dimensiones del planeta, considerado éste como una esfera.

Durante la Edad Media, no hubo avances significativos, pero sí en el siglo XVI. En primera instancia, los procesos de medición se centraban en mejorar los valores que corroboraban la aproximación esférica del planeta, queriéndose encontrar el radio del cuerpo esférico, y su determinación era geométrica en función de la relación entre dicho radio y los arcos medidos sobre la superficie de la Tierra. Luego, Newton, a partir de su descubrimiento de la ley de gravitación universal, planteó la forma de elipsoide achatado en los polos para el planeta. Según Newton, en cada uno de los puntos del planeta resultaba una fuerza centrífuga, debido a la rotación alrededor de su eje, que a la vez provocaba un alargamiento del planeta en el Ecuador. Frente a esta nueva forma del planeta, surgió la necesidad de verificarlo. La verificación se haría mediante la medición de arcos de meridiano de un grado en distintas latitudes, una de ellas, cercana al Polo, y la restante, al Ecuador; si, el arco de meridiano de un grado medido cercano al Ecuador, fuese menor que al medido cercano al Polo, entonces la Tierra estaría achatada en los polos. Entre las verificaciones, en Francia, Cassini dedujo, a partir de sus mediciones, lo contrario a lo formulado por Newton, es decir, para él, la Tierra estaba alargada en sus polos. Para dilucidar esta controversia, planteada a nivel científico entre las escuelas inglesa y francesa, la Academia de Ciencias Francesa resolvió medir el arco de meridiano en dos lugares: (a) En –el virreinato de– Perú, cercano al Ecuador, medición efectuada entre los años 1735 a 1742; (b), entre los años 1736-1737, en Laponia, aproximadamente a los 66° de latitud norte. De los resultados obtenidos, pudo aseverarse lo propuesto por Newton (Zakatov, 1981).

Coordenadas elipsóidicas o geodésicas

La superficie del elipsoide, es una superficie matemáticamente regular, y en base a ello podemos definir para puntos de la superficie terrestre, coordenadas geográficas de latitud y longitud pero referidas a esta nueva superficie. Estas coordenadas referidas al elipsoide, son las conocidas como elipsóidicas o geodésicas, y se definen a partir de la dirección perpendicular a la su-

perficie de referencia del elipsoide, proyectada desde el punto, originando (Figura II-13):

- Latitud elipsoidal: ángulo formado entre la dirección de la normal y el plano del Ecuador.
- Longitud elipsoidal: ángulo formado entre el plano meridiano que contiene al punto (y su normal) y el plano del meridiano considerado de origen (Meridiano de Greenwich).
- Altura elipsoidal: distancia entre el punto considerado y la superficie de referencia del elipsoide.

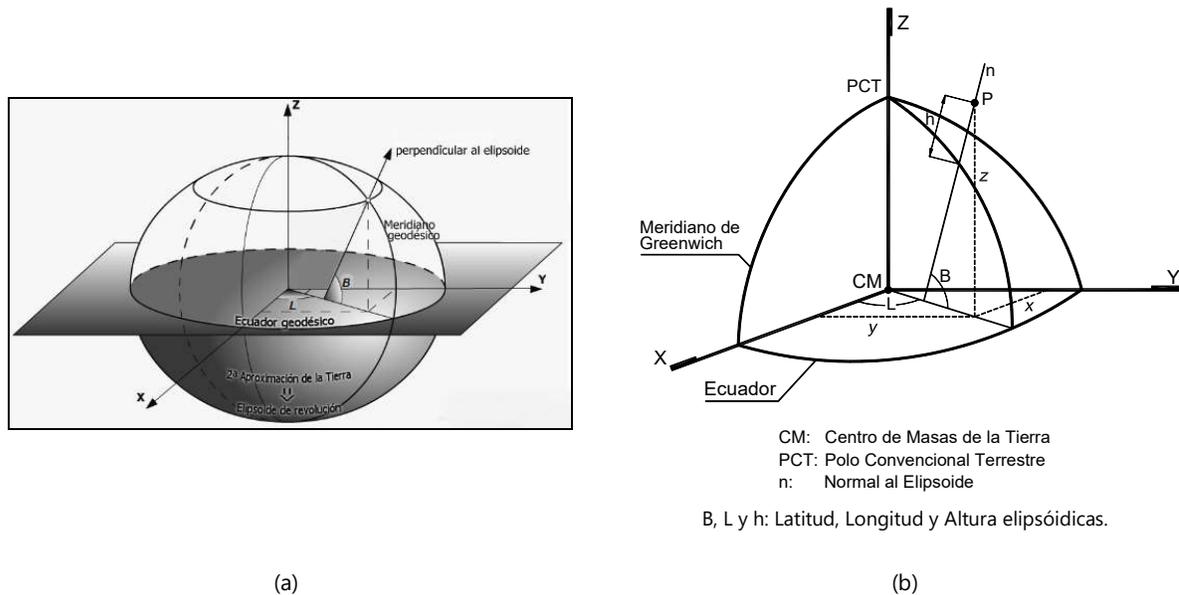


Figura II-13: (a) Aproximación elipsoidal del planeta y latitud (B) y longitud (L) elipsoidales (Modificado de Furones, 2010) – (b) Coordenadas elipsoidicas.

Cabe aclarar que la superficie regular del elipsoide se centra en el geocentro del planeta, y se vincula con el CTRS para así establecer la correspondencia entre coordenadas cartesianas y geodésicas. La conversión de unas a otras es posible mediante cálculos que contemplan los parámetros que definen al elipsoide empleado.

II.3.2.2. Geoide

Una vez corroborado que el elipsoide era una mejor aproximación que la esfera para la figura de la Tierra, los procedimientos de análisis y mediciones se centraron en encontrar el elipsoide más fidedigno. Sin embargo, cuando se compararon los resultados obtenidos, se evidenciaron entre ellos diferencias que no podían ser justificadas por errores de medición, y por esta razón se dedujo que el elipsoide era una mejor aproximación pero no reflejaba la forma "real" del planeta (Zakatov, 1981).

A partir de ello, surge una figura de la Tierra cuya superficie recibe el nombre de geoide (Figura II-14). La dirección de la fuerza de gravedad, o de la 'vertical' del lugar, o línea de la plomada, es perpendicular en todos sus puntos a esta superficie. El geoide es una de las infinitas superficies de nivel, u horizontales, que rodean al planeta. Se lo 'materializa' por la prolongación del nivel medio de los mares sin ningún tipo de perturbación. En palabras de Torge, 2001, "podría ser definido como la superficie equipotencial que mejor ajusta el nivel medio del mar en una cierta época, aplicando una condición de mínimo a las desviaciones entre el nivel medio del mar y el geoide".

Georreferenciación

El geode, por definición, es función de la densidad interna del planeta y su velocidad angular de rotación. Debido a la heterogeneidad de la densidad, el geode no resulta ser una superficie analítica, y por ello no puede ser empleada como superficie de referencia para la determinación de las posiciones espaciales de puntos, sin embargo, sí puede ser empleado como superficie de referencia para diferencias de potencial de la gravedad, o bien diferencias de alturas (conocidas éstas como alturas ortométricas) (Torge, 1983).

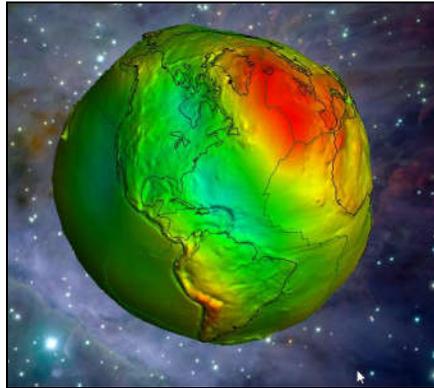
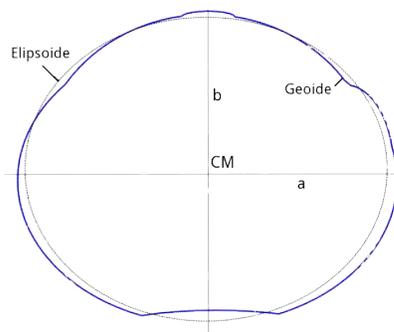


Figura II-14: Visualización tridimensional del geode
(Fuente: Barthelmes, F., Köhler, W., 2016)

La superficie del geode puede ser considerada como la figura "física", "real", de la Tierra, que se aproxima, para los cálculos, mediante el elipsoide. La Figura II-15 muestra el elipsoide de revolución terrestre en superposición con el geode.



Siendo a y b: semiejes mayor y menor del elipsoide respectivamente.

Del elipsoide conocido como GRS80:

a: 6378137 metros = 6378,137 km

b: 6356752, 31414 metros = 6356,75231414 km

CM: Centro de Masas de la Tierra, geocentro.

Figura II-15: Elipsoide de revolución y geode.

II.4. Coordenadas cartesianas y elipsóidicas. Aplicaciones.

Sean, a modo de ejemplo, las siguientes coordenadas cartesianas, que nos proporcionan nuestra ubicación en algún lugar de la superficie terrestre:

$$\begin{cases} x = 2627448.196\text{m} \\ y = -4668383.186\text{m} \\ z = -3450213.487\text{m} \end{cases}$$

¿Cómo podemos ubicarnos globalmente a partir de dichos valores numéricos? Este tipo de coordenadas, no nos habilita con claridad a visualizar nuestra ubicación en el planeta, sin embargo, emplear valores referidos a coordenadas elipsóidicas, tales como:

$$\begin{cases} B = -32^{\circ}57'33'' \\ L = -60^{\circ}37'42'' \\ h = 66.872\text{m} \end{cases}$$

Sí, nos proporciona una ubicación comprensible, pero estas coordenadas tienen la desventaja que, desde el punto de vista matemático, resultan complejas, a diferencia de las cartesianas, para la realización de cálculos (sin embargo también pueden ser utilizadas).

GNSS, emplea coordenadas cartesianas tridimensionales para sus cálculos, y los programas de conversión nos permiten visualizar la posición mediante las coordenadas geodésicas.

Aplicaciones. Sólo mencionamos dos casos:

(1) ¿Cuáles coordenadas empleamos para representar el territorio en un plano?

Si queremos representar una extensión considerable de la superficie terrestre, y disponemos de coordenadas geodésicas, ¿podemos emplear esas mismas coordenadas en el plano? La respuesta es no, necesitamos disponer de coordenadas acordes a una proyección en el plano, esto nos conlleva a la ciencia cartográfica, al estudio de qué tipo de proyección emplearemos para representar lo "real" en una superficie plana, evaluando las deformaciones que se produzcan. En este caso, habrá que transformar las coordenadas geodésicas a coordenadas en el plano, y nuevamente necesitaremos de expresiones matemáticas que habiliten dicha transformación.

(2) Los Sistemas de Información Geográfica (SIG), son una de las herramientas informáticas que proporcionan un enorme potencial para el análisis del espacio territorial desde diversas fuentes de información e interdisciplinariedad (Figura I-1). Permite relacionar, no sólo datos geométricos, sino cualitativos, y además, posibilitan la incorporación de imágenes diversas (analógicas, digitales). Para que esta herramienta pueda resultar satisfactoria en el análisis mencionado, la clave es que toda la información a vincular se encuentre georreferenciada, es decir, que las coordenadas de cada una de las fuentes incorporadas, estén referidas al mismo marco de referencia permitiendo así su interrelación.

Complemento: Marcos de Referencia

Un MR, tal como fuera expresado, es la materialización de un sistema de referencia (SR).

Las coordenadas de dos puntos serán correlacionables siempre que estén expresadas en el mismo MR.

Efecto gráfico (¡exagerado!) del uso de distintos marcos de referencia:

Terribles consecuencias de usar distintos
Marcos de Referencia



Figura II-16: Consecuencia exagerada y figurativa al utilizar diferentes marcos de referencia.

Geodesia moderna

- Nuevas técnicas espaciales dieron origen a observaciones que posibilitaron la realización de los **Marcos de Referencia Modernos**.
- Estos MR están materializados por un conjunto de puntos con **coordenadas geocéntricas tridimensionales y son de alcance global (ITRF)**.

En un pasado no lejano cada país (o incluso regiones dentro de un país) tenía un MR propio. La mayor parte de la cartografía impresa fue elaborada con los MR vigentes en su época y en su región.

En cambio, un marco de referencia global es, por ejemplo:

ITRF

- Véase <https://itrf.ign.fr/> o <https://www.iers.org>
- Materializado por cientos de estaciones.
- Distintas realizaciones han ido mejorando paulatinamente su precisión.
- ITRF 88/89/...../94/96/97/2000/2005/2008/2014/2020
- Elipsoide asociado: GRS80 (Geodetic Reference System 1980).

Época de un MR

La alta precisión alcanzada obliga a tener en cuenta los movimientos y deformaciones de las placas tectónicas, introduciendo un nuevo concepto:

Cada estación ITRF está caracterizada por las coordenadas (x, y, z) con sus respectivas velocidades (v_x, v_y, v_z) y una época de referencia t_0 . Esto se debe a que los puntos que materializan cada estación se están desplazando continuamente. Por ejemplo, en Rosario, el desplazamiento normal es próximo al centímetro por año, hacia el Norte.

SIRGAS: Sistema de Referencia Geodésico para las Américas⁽⁵⁾

*“(…) En 2020, la sigla SIRGAS cambió nuevamente a **Sistema de Referencia Geodésico para las Américas**, ya que los objetivos de SIRGAS se ampliaron a la determinación de un sistema de referencia físico unificado para gravimetría, alturas físicas y geoide.(…)”*

“SIRGAS como sistema de referencia se define idéntico al Sistema Internacional de Referencia Terrestre ITRS (International Terrestrial Reference System) y su realización es la densificación regional del marco global de referencia terrestre ITRF (International Terrestrial Reference Frame). Las coordenadas SIRGAS están asociadas a una época específica de referencia y su variación con el tiempo es tomada en cuenta ya sea por las velocidades individuales de las estaciones SIRGAS o mediante un modelo continuo de velocidades que cubre todo el continente. Las realizaciones o densificaciones de SIRGAS asociadas a diferentes épocas y referidas a diferentes soluciones del ITRF materializan el mismo sistema de referencia y sus coordenadas, reducidas a la misma época y al mismo marco de referencia (ITRF), son compatibles en el nivel milimétrico. La extensión del marco de referencia SIRGAS está dada a través de densificaciones nacionales, las cuales a su vez sirven de marcos de referencia local.

La conversión de coordenadas geocéntricas a coordenadas geográficas se adelanta utilizando los parámetros del elipsoide GRS80.(…)”

⁽⁵⁾ Extraído de Sirgas -<http://www.sirgas.org>- Fecha de consulta: 2022-04-30.

Red SIRGAS de operación continua⁽⁶⁾

En la actualidad, SIRGAS, se materializa por un conjunto –red- de estaciones GNSS, cuyo funcionamiento es continuo, sus coordenadas son de alta precisión (estando vinculadas a una época de referencia determinada), evidenciando los cambios temporales mediante las velocidades de cada una de las estaciones. Alrededor de cuatrocientas (400) estaciones conforman esta red, conocida como SIRGAS-CON, localizadas en América Latina (Figura II-17).

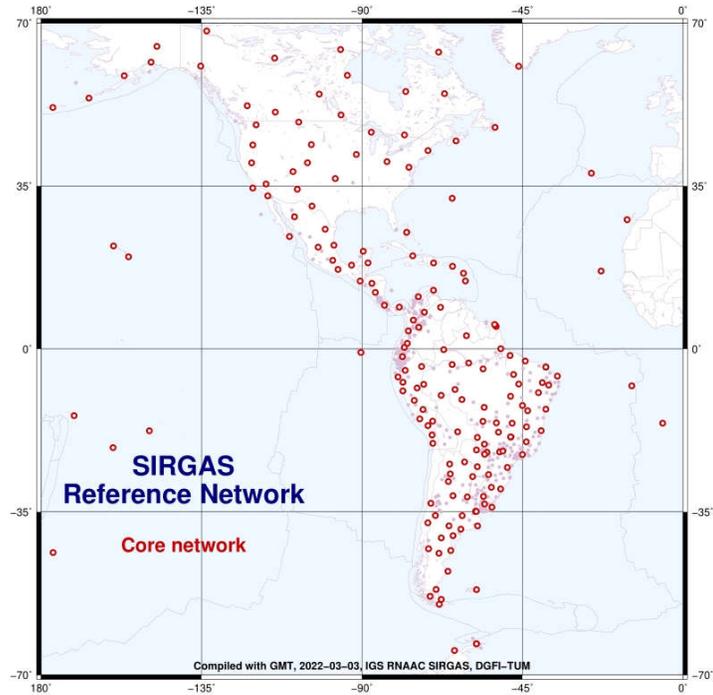
*“(…) red de estaciones GNSS de operación continua que es procesada semanalmente para la determinación de coordenadas semanales instantáneas y soluciones multianuales del marco de referencia. Las posiciones semanales de las estaciones y las soluciones multianuales se refieren a la versión del ITRF en uso cuando los datos GNSS son procesados. La precisión media de estas soluciones en la época de referencia es de alrededor de **± 1.2 mm en las componentes Norte y Este y de unos ± 2.5 mm en la altura**. La precisión media de las velocidades de las estaciones se estima en **± 0.7 mm/a en la componente Norte y Este y en ± 1.1 mm/a en altura**”.*

⁽⁶⁾ Extraído de Sirgas -<http://www.sirgas.org>- Fecha de consulta: 2022-04-30.

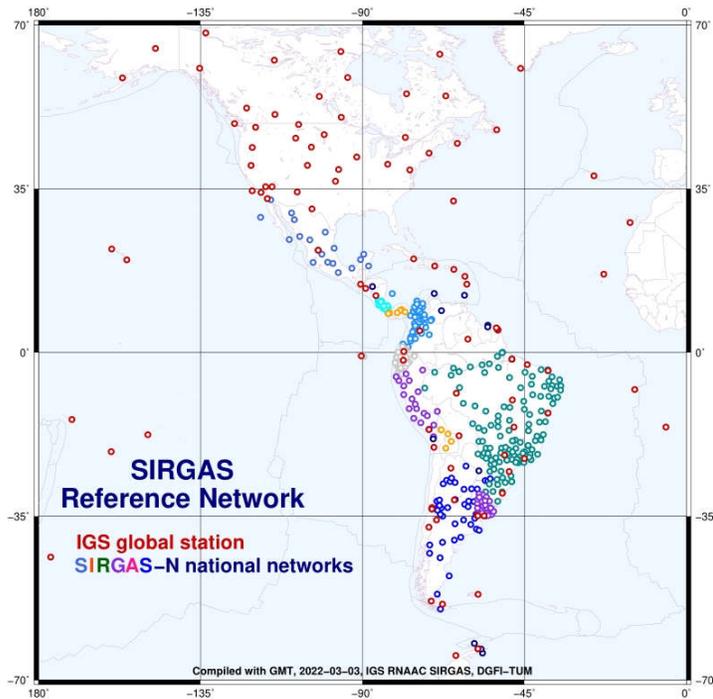
La red SIRGAS de operación continua se compone de:

- (a) SIRGAS-C (Figura II-17 (a)): remite a una red continental de estaciones estables, cuyo funcionamiento garantiza, en el tiempo, *“consistencia, perdurabilidad y precisión del MR”*.
- (b) SIRGAS-N (Figura II-17 (b)): remite a redes nacionales que habilitan, a los usuarios, acceder al MR local y nacional.

En cuanto a la densificación del ITRF, SIRGAS-C, constituye su *“densificación primaria”*, mientras que SIRGAS-N, lo efectiviza a nivel local y nacional densificando la red continental (SIRGAS, <http://www.sirgas.org> Fecha de consulta: 2022-04-30).



(a)



(b)

Figura II-17: Mapa de estaciones pertenecientes a la red SIRGAS de operación continua
(a) SIRGAS-C - (b) SIRGAS-N

(Fuente: Sirgas, <http://www.sirgas.org> Fecha de consulta: 2022-04-30)

Marcos de Referencia en la República Argentina

Campo Inchauspe 1969

(Figura II-18)

- Proveniente de la "Geodesia Clásica" (Oficial hasta el 08/05/1997).
- Materializado por más de 18000 puntos.
- Comparado con el actual POSGAR 2007 hay un desplazamiento del orden de los 200 metros.
- Precisión: 3 a 10 ppm o milímetros por kilómetro (ppm: partes por millón).

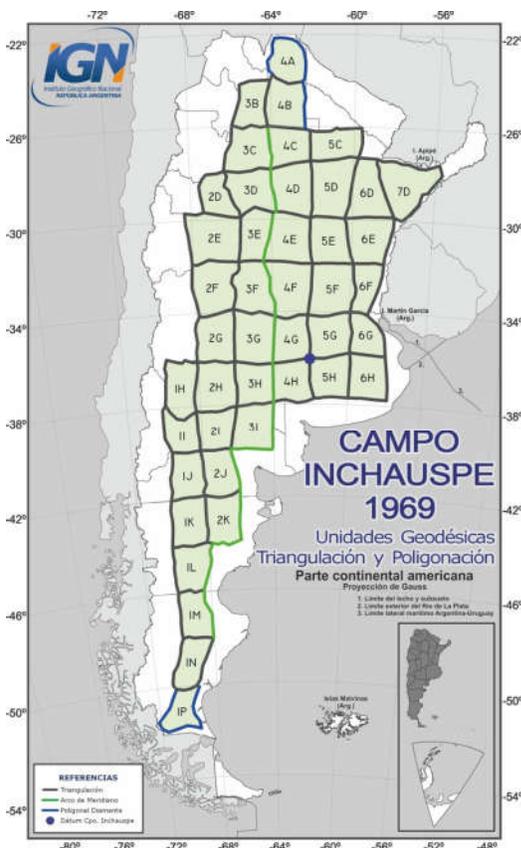


Figura II-18: Campo Inchauspe 1969

(Fuente: Instituto Geográfico Nacional, <https://www.ign.gov.ar/> Fecha de consulta: 2022-04-30)

POSGAR (Posiciones Geodésicas Argentinas)

- Actual: **POSGAR 2007** (Oficial desde 15/05/2009). (Figura II-19)
- Anteriores: POSGAR 94 (Oficial desde 08/05/1997 hasta 15/05/2009).
POSGAR 98 (Nunca fue oficial).
- Calculado en base a una remediación y densificación del original POSGAR 94.
- Materializado por 436 puntos.
- Precisión: 1 ppm o milímetro por kilómetro (ppm: partes por millón)

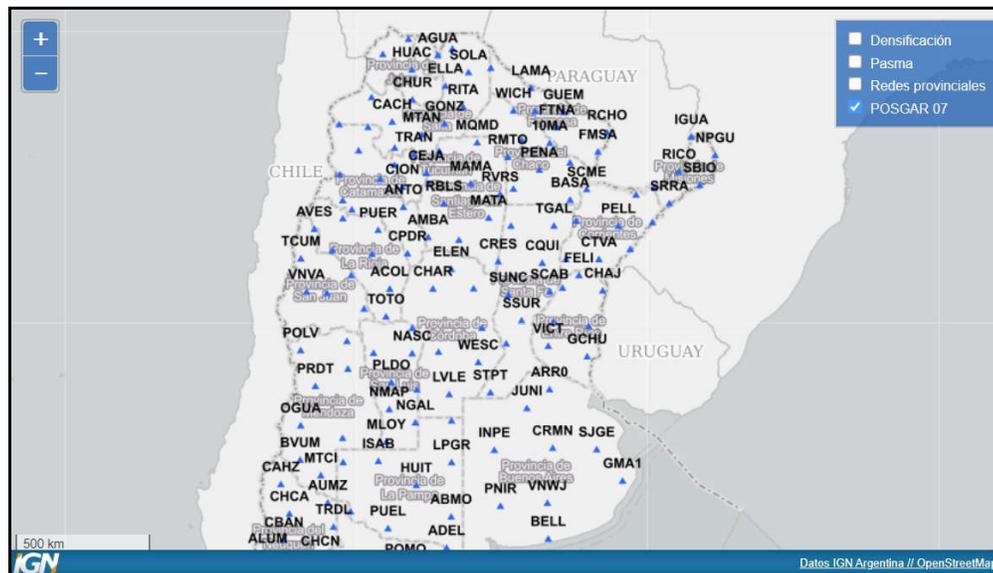


Figura II-19: Parte del MR POSGAR 2007.

(Fuente: Instituto Geográfico Nacional, <https://www.ign.gov.ar/> Fecha de consulta: 2022-04-30)

Red de Estaciones Permanentes RAMSAC

RAMSAC, acrónimo de “Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo”. La constituye un conjunto de estaciones que disponen de receptores GNSS de doble frecuencia, que funcionan en forma permanente, disponiendo de un sistema para el almacenamiento de las observaciones, las cuales pueden accederse a través de Internet. Esta red está bajo la administración del Instituto Geográfico Nacional (IGN) (Figura II-20).

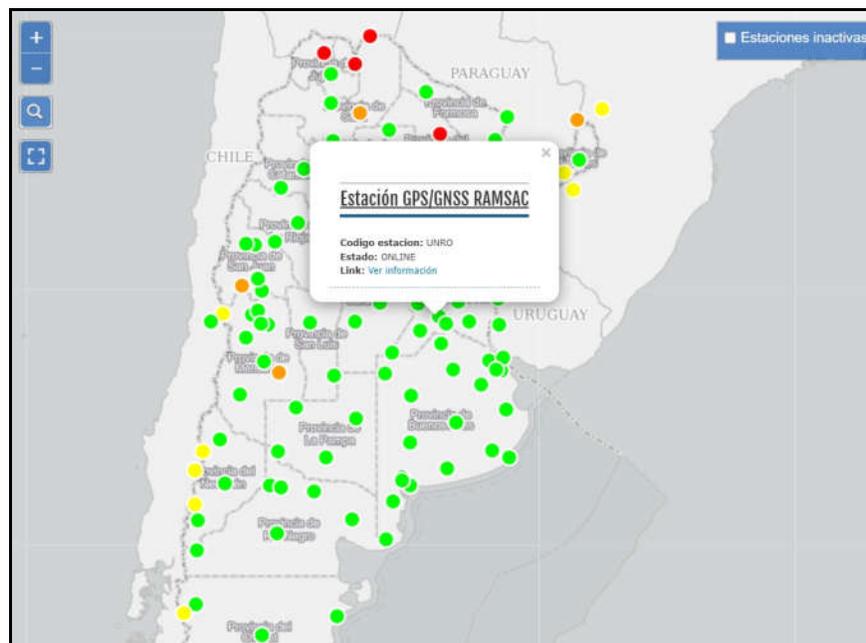


Figura II-20: Parte de la Red RAMSAC.

(Fuente: IGN, <https://www.ign.gov.ar/> Fecha de consulta: 2022-04-30)

III. Sistemas de Posicionamiento Global

Historia y descripción del Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Los satélites. El sistema de monitoreo y control desde Tierra. Los usuarios de GPS. La obtención de coordenadas. Descripción de diversos métodos y equipamientos. Información sobre la precisión. Otros sistemas similares al GPS: ruso (GLONASS), europeo (GALILEO) y chino (COMPASS). Estado actual y perspectiva. Sistema Satelital de Navegación Global (GNSS). Redes de Estaciones Permanentes GNSS. Las Estaciones Permanentes en nuestro país. Estación Permanente GNSS de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Propuesta para la Provincia de Santa Fe.

Cuando activamos un navegador GPS (como los incorporados en los teléfonos celulares p. ej.) lo que obtenemos son las coordenadas del punto en que está ubicado el receptor y la hora de esa determinación, más allá de que las mismas aparezcan o no en la pantalla.

Dependiendo del aparato utilizado pueden obtenerse otras informaciones como pueden ser: la ubicación en un mapa, velocidad (si nos estamos moviendo), la dirección al Norte o, por mencionar alguna, el restaurante más próximo; pero esas otras informaciones nada tienen que ver con el sistema GPS; son producto de información previamente cargada en el equipo o del cálculo que el mismo efectúa mediante software destinado a tal fin.

Para el funcionamiento del sistema GPS (o sus similares), es necesario apelar a conocimientos propios de la electrónica, la informática, la matemática u otras ciencias, lo que obviamente no es abordado en este curso.

Podríamos decir que así como aceptamos que al prender el radio recibimos señales que de alguna manera se convierten en sonido, o al encender el televisor recibimos otras que se convierten en imagen y sonido, cuando encendemos el receptor GPS, de alguna manera, las señales recibidas permiten obtener coordenadas y tiempo.

De todos modos intentaremos abordar, de un modo conceptual, los fundamentos y el funcionamiento del sistema GPS.

III.1. Historia

- El primer satélite artificial fue el Sputnik I, lanzado por la entonces Unión Soviética en octubre de 1957.
- Posteriormente surgió el sistema Transit, de origen norteamericano, destinado a obtener coordenadas de puntos terrestres.
- EEUU crea GPS, Sistema de Posicionamiento Global, cuyo primer satélite fue puesto en órbita en febrero de 1978 y se completó en diciembre de 1993. En la actualidad continúa con mejoras.
- GPS fue concebido para uso militar por el Departamento de Defensa de los EEUU.
- Objetivo: obtener coordenadas en cualquier lugar del planeta, en todo momento y condición.

III.2. Sistema GPS

Sintéticamente, el Sistema GPS tiene tres componentes:

- Satélites
- Estaciones de control
- Usuarios

Constelación de satélites

- La composición original era de 24 satélites.
- La constelación se completa actualmente con hasta 32 satélites operativos.
- Cada satélite se indentifica mediante un código específico llamado PRN (Pseudo Random Noise) y está dotado de reloj atómico.
- Los satélites giran en 6 planos orbitales.
- La altura aproximada es de 20200 km y tardan aproximadamente 12 hs en recorrer su órbita.
- Velocidad de desplazamiento de los satélites: 3.86 km/s ó 13900 km/h

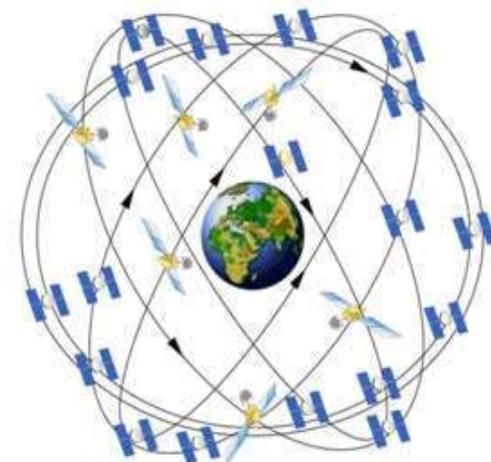


Figura III-1: Constelación de satélites.
(Fuente: Oficina de Coordinación Nacional de Posicionamiento, Navegación, y Cronometría por Satélite, Gobierno de EEUU, 2017)

Estaciones de control

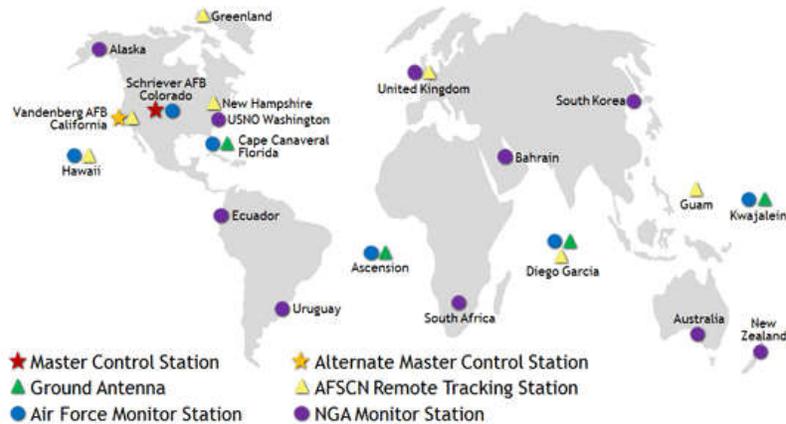


Figura III-2: Estaciones de Control.
(Fuente: Oficina de Coordinación Nacional de Posicionamiento, Navegación, y Cronometría por Satélite, Gobierno de EEUU, 2017)

Algunas de las funciones de las Estaciones de control son:

- Monitoreo permanente de los satélites.
- Determinación de órbitas, sincronización de los relojes.
- Transmisión a los satélites de la información procesada para reenvío a los usuarios.

Usuarios

Son todos quienes, de un modo u otro, utilizan el sistema.

Para ello, los receptores GPS están equipados mínimamente con:

- Antena.
- Procesador de señal.
- Reloj de cuarzo.
- Memoria para almacenamiento.
- Software para el cálculo de coordenadas.

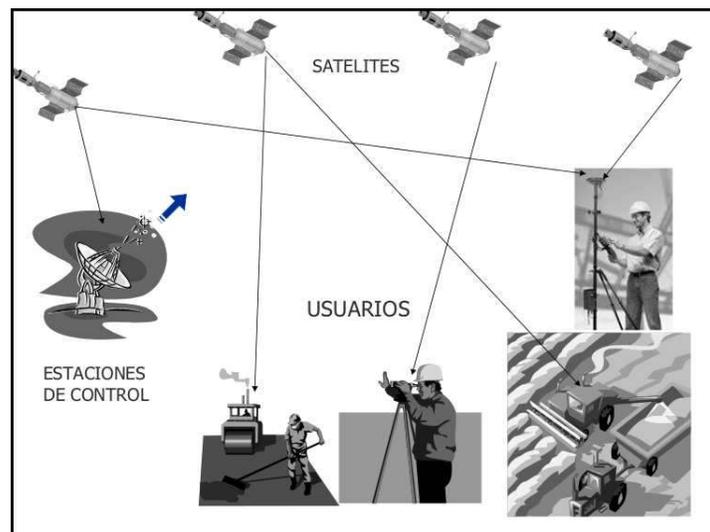


Figura III-3: Esquema de la relación entre las componentes del Sistema GPS.

III.3. Obtención de coordenadas

Se acude a lo que en matemática se llama intersección espacial inversa: para determinar la posición de un punto en el espacio se miden las distancias a tres puntos de coordenadas conocidas.

El punto en el espacio es aquel en el que está ubicado el receptor, indicado con la letra P en la Figura III-4, y los tres puntos de coordenadas conocidas son aquellos en que están ubicados (en un determinado instante), tres satélites indicados como S_1 , S_2 y S_3 .

Se obtiene la DISTANCIA entre el receptor y el satélite midiendo el TIEMPO que tarda la señal en recorrer el espacio que los separa

- Tiempo que tarda la señal en llegar desde el satélite al receptor: 0.067s aproximadamente (es decir, 67 milésimas de segundo).
- Un error de una milésima de segundo en la medición del tiempo significa un error de ¡300 km! en la medición de distancia.
- Apreciación posible con un buen reloj de cuarzo (el que poseen los receptores): 0,00000001 segundos (una centésima de microsegundo), equivalente a una incertidumbre de 3 metros.
- Precisión del reloj atómico en los satélites: 1 billonésimo de segundo o mejor aún.

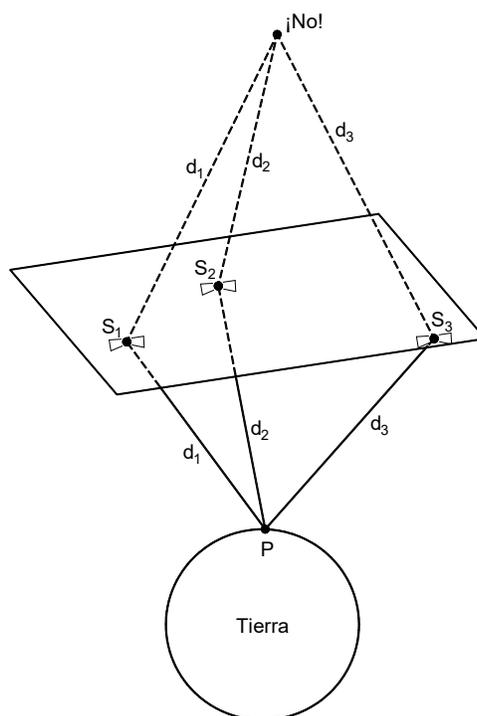


Figura III-4: Esquema de la intersección espacial inversa.

Si bien no es el objetivo central de este curso, indicamos a continuación alguna información muy somera sobre la técnica de medición de la distancia satélite-receptor. Las consideraciones siguientes son de particular importancia cuando lo que se pretende es obtener coordenadas con mejor precisión que las que brinda un navegador común.

Se obtiene el TIEMPO midiendo el retardo en la recepción de la señal

Medición de distancia usando el código de libre adquisición C/A.

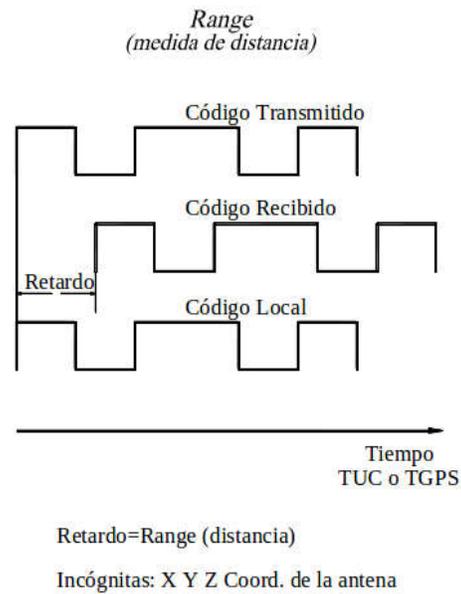


Figura III-5: Retardo en la recepción de la señal.

Todos los receptores tienen incorporado en su memoria los códigos característicos de todos los satélites. Eso permite:

- El reconocimiento del satélite.
- La generación en el receptor de una réplica.
- Producir la correlación (entre recibido y réplica) (Figura III-5).
- Medición del retardo.

PERO SE MIDEN PSEUDO-DISTANCIAS

Porque la sincronización de los relojes (el del satélite y el del receptor), no puede ser perfecta, tenemos otra incógnita, llamada δ_R (Figura III-6), que es el error de reloj del receptor que, como dijimos, es de inferior calidad que el del satélite.

Incógnitas

Por tanto hay 4 incógnitas (las coordenadas de los satélites son conocidas porque los mismos satélites se las transmiten a los receptores):

- 3 de posición del receptor (X_p, Y_p, Z_p)
- 1 de reloj del receptor δ_R

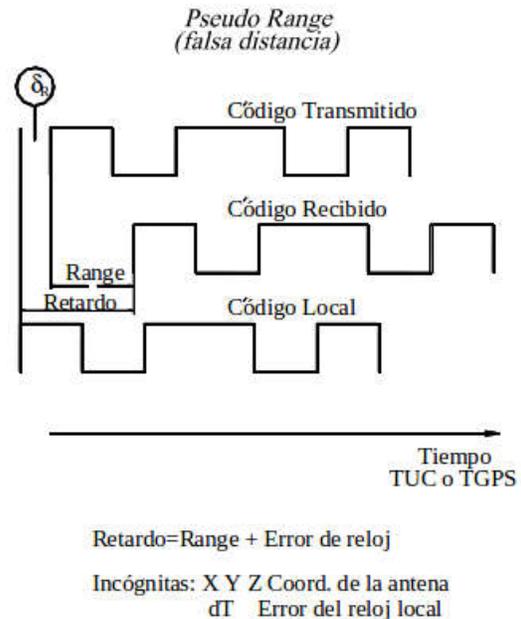


Figura III-6: Error de reloj del receptor δ_R .

Se obtiene el resultado deseado observando las distancias a 4 satélites, lo que permite obtener un sistema de cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas, cuya resolución **es una operación matemática relativamente simple** (en general se tienen observaciones a más de 4 satélites).

Para mayor información, se puede consultar el libro **"GPS Posicionamiento Satelital"** (Huerta, E. et al., 2005), Capítulo 3, en su versión digital en el sitio del GGSR: <http://www.fceia.unr.edu.ar/gps> en la sección *Publicaciones*.

Errores

La magnitud de los errores que se pueden producir al medir las distancias y calcular las coordenadas (no se trata de valores fijos sino del rango que pueden asumir esos errores) y la afectación que producen en las coordenadas, no necesariamente es su suma, hasta incluso pueden compensarse parcialmente, se muestra en la siguiente figura:

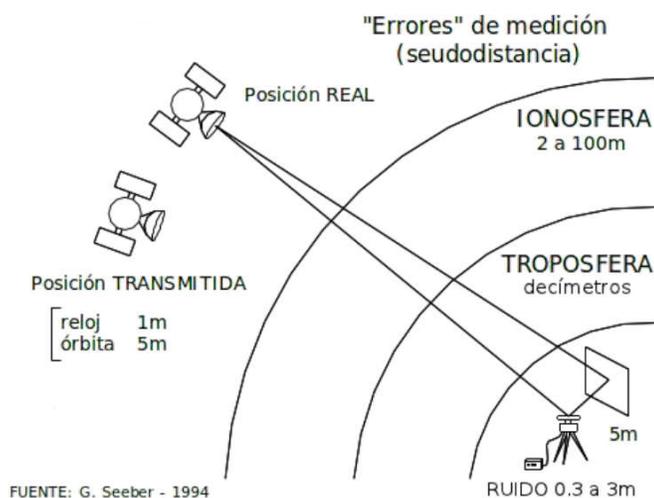


Figura III-7: Esquema de la influencia de algunos de los errores que afectan al proceso de medición.

Posibles causas de los llamados Errores sistemáticos

- Errores en las coordenadas de los satélites e incluso en sus relojes.
- Influencia de la atmósfera.
- Ondas reflejadas en superficies próximas al receptor.

Existen diversas maneras de reducir la influencia de estos errores, las que varían de acuerdo a los aparatos y los métodos operativos que se pueden aplicar.

Errores llamados accidentales

- Correlación de códigos, es decir imprecisión en lo que antes llamamos medición del "re-tardo" o lo que en la Figura III-7 se denomina "ruido"

Para disminuir su influencia se apela a la "sobrereabundancia" de observaciones y a la búsqueda del "valor más probable", mediante el cálculo matemático de ajuste.

Precisión

La precisión con que se obtienen las coordenadas del punto donde está ubicado el receptor depende de:

- La calidad de la medición.
- La sobreabundancia de datos.
- La configuración geométrica del sistema, es decir la forma en que se distribuyen en el cielo los satélites de los cuales se recibe señal. Por ejemplo si el receptor está encerrado entre tres paredes y recibe señales sólo de satélites agrupados en ese costado libre se verá afectada la precisión del resultado.

En definitiva, **se puede obtener una precisión del orden de los 15 metros, en posicionamiento 3D con un solo receptor, en forma instantánea y en el 95% de los casos.**

Si sólo se mide Latitud y Longitud, la precisión resulta mejor que 10 metros.

Dispersión horizontal en mediciones sucesivas

La Figura III-8 muestra un caso típico de la dispersión horizontal (Latitud y Longitud en metros) respecto de coordenadas consideradas como "verdaderas" o "exactas".

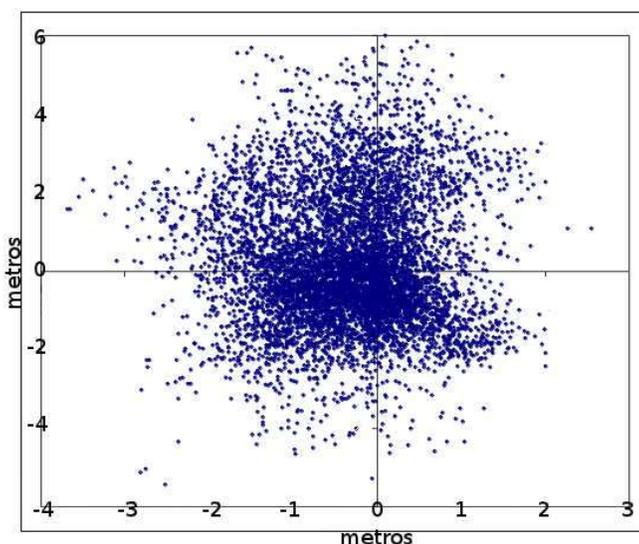


Figura III-8: Posiciones obtenidas con un receptor fijo, cada 30 segundos durante 24 horas.

III.4. Métodos de obtención de coordenadas

► Posicionamiento absoluto

Se denomina así a la obtención de coordenadas de uso más extendido, la que se efectúa con un solo receptor utilizando el código de libre adquisición C/A. Podemos citar como ejemplo el navegador que se emplea en un automóvil o un teléfono celular.

Georreferenciación

Se obtienen las **coordenadas de la ubicación del receptor en ese momento**, utilizando el método de intersección espacial antes descrito y a partir de la medición de distancias a los satélites (que transmiten sus propias coordenadas en la señal satelital).

Ejemplo de método ESTÁTICO

- Receptor estacionado sobre un punto.
- Calculando posición (reiteradamente y eventualmente efectuando un promedio).
- Solución en 3 Dimensiones (3D).

Ejemplo de método MÓVIL

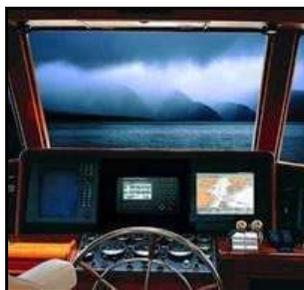
- Receptor en movimiento.
- Calculando posición, por ejemplo, cada 1 segundo.
- Solución en 3D, instantánea.
- Solución típica de navegación: 1 posición por segundo, describe la *trayectoria*.



(a)



(b)



Georreferenciación



Figura III-9: Ejemplos de receptores que usan los métodos descritos. (a) Navegadores de mano. (b) Navegadores para auto. (c) Navegadores de diseños específicos: transporte, navegación aérea, embarcaciones, práctica deportiva. (d) Celulares con receptor GPS incorporado

Estos receptores (Figura III-9) son configurables (con mayores o menores variantes), de manera de mostrar distinto tipos de coordenadas, recorridos, alturas, etc.

► **Posicionamiento relativo**

Es el que se utiliza cuando se quieren obtener mejores precisiones que la de varios metros y requiere el uso de al menos dos receptores.

Consideremos el caso de: DOS RECEPTORES, cercanos entre sí, rastreando los mismos satélites y obteniendo posiciones en el mismo momento.

Los errores que se generan en los satélites y en la propagación de la señal, afectan de forma "similar" a ambas estaciones (depende de su separación) (Figura III-10).

Georreferenciación

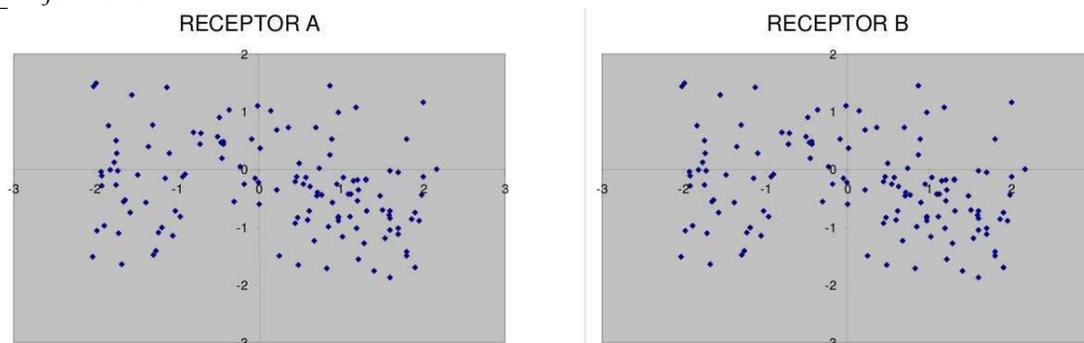


Figura III-10: Posiciones obtenidas en los dos receptores.

La Figura III-11 muestra un esquema del posicionamiento relativo:

- 2 receptores.
- Importante: se consideran sólo los satélites comunes.
- Uno de los receptores, fijo: ESTACIÓN BASE.
- El otro: RECEPTOR REMOTO.

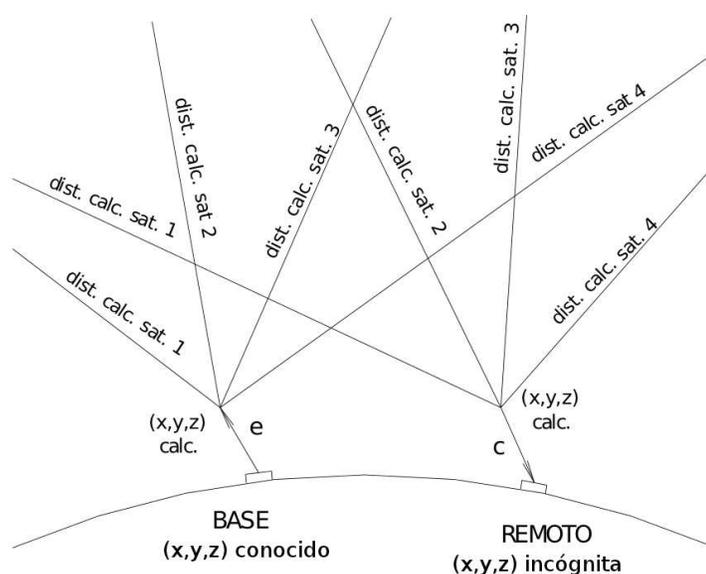


Figura III-11: Esquema del posicionamiento relativo entre dos receptores en un posicionamiento relativo.

Los errores propios del satélite y de la propagación de la señal afectan de manera similar a las 2 estaciones cuando están próximas entre sí.

La precisión del posicionamiento GPS mejora notablemente al aplicar corrección diferencial. Es decir al estacionar un receptor sobre un punto de coordenadas previamente conocidas llamado base, calcular el error de las coordenadas obtenidas y utilizar esa información para corregir las coordenadas obtenidas en el otro receptor llamado remoto, el que está estacionado sobre un punto de coordenadas desconocidas

ESTACIÓN BASE	RECEPTOR REMOTO	
Receptor estacionado sobre punto de coordenadas conocidas.	ESTÁTICO	MÓVIL
	<ul style="list-style-type: none"> • Receptor estacionado sobre el punto a relevar. • Se aplica corrección diferencial. • Solución final: promedio de las posiciones corregidas. • Obtención del resultado: en post-proceso o en tiempo real. 	<ul style="list-style-type: none"> • Receptor en movimiento. • Se aplica corrección diferencial. • Solución final: trayectoria. • Obtención del resultado: en post-proceso o en tiempo real.

Idea de las precisiones que se obtienen con GPS Diferencial (Código C/A)

OBSERVABLE	SEPARACIÓN ESTACIONES [km]	PRECISIÓN EN POSICIÓN	
		Instantánea [m]	Promedio de 3 Minutos de Observación [m]
Código C/A	10	8	4
	500	10	5
Código C/A suavizado	10	3	0.3
	500	7	4
C/A + L2C	500	< 3	< 1

Corrección en Tiempo Real

GPS Diferencial (DGPS): se transmiten las correcciones a las observaciones.

La Estación BASE calcula y transmite la corrección de distancias vía Link de Radio o Internet (formato RTCM-NTRIP).

La precisión varía en función de la distancia y el tiempo de actualización de la corrección.

Algunos navegadores tienen la posibilidad de recibir DGPS.

Ejemplos de receptores que usan estos métodos

- Navegadores con posibilidad de recibir DGPS (Figura III-12), corrigen en tiempo real.
- Los receptores para Cartografía (por ejemplo, Sistemas de Información Geográfica), tienen la posibilidad de almacenar las observaciones y corregir en post-proceso y algunos también en tiempo real.



Figura III-12: Receptores DGPS

► **Posicionamiento relativo con fase**

Cuando se quieren obtener coordenadas más precisas, no ya para cartografía, sino para otros fines, como pueden ser la construcción de obras, las redes geodésicas u otros, se utiliza el POSICIONAMIENTO RELATIVO CON FASE, para el cual se requieren receptores distintos a los mencionados, más sofisticados y de mayor costo, aptos para obtener la o las ondas portadoras de la señal emitida por los satélites, por lo que se los diferencia entre los de simple y doble frecuencia.

Al respecto sólo diremos lo siguiente:

- Método de medición: estático / móvil.
- Obtención del resultado: post-proceso / tiempo real.
- Precisiones: de los decímetros al centímetro, dependiendo de las variables anteriores y la distancia Base-Remoto.

► **Usos según las características de las señales que puede captar el receptor**

- Cartografía: navegadores (receptores de código de libre adquisición) o receptores de simple frecuencia (Figura III-13)
- Topografía y Geodesia: receptores de simple o doble frecuencia



Figura III-13: Ejemplo de receptor de simple frecuencia.

► **Coordenadas del punto BASE**

En cualquier tipo de levantamiento GPS RELATIVO, nos referimos a la ESTACIÓN BASE como un receptor estacionado sobre punto de "coordenadas conocidas".

¿Con qué precisión conocemos estas coordenadas? La precisión con que se conocen las coordenadas de la estación base debe ser una información previa, ya que no podrán obtenerse resultados con mejor precisión que aquella de la cual se parte.

Si las coordenadas de la base están referidas al Marco de Referencia Nacional, todas las coordenadas obtenidas estarán referidas a ese mismo marco.

III.5. Estación Permanente GPS (o bien GNSS)

Cuando decimos GNSS nos referimos al llamado Sistema Satelital de Navegación Global, diferenciación necesaria porque intervienen los satélites y la información de otros sistemas similares al GPS (GLONASS-GALILEO-COMPASS).

Concepto de Estación Permanente (EP): Receptor GPS/GNSS rastreando todos los satélites posibles, en forma continua, las 24 horas.

Por supuesto es necesario que las coordenadas del punto correspondiente a la EP sean conocidas así como la precisión que las caracteriza. Tanto esas coordenadas como la información que recibe la EP desde los satélites, deben ser accesibles, de alguna manera, por los usuarios de la EP. El sistema requiere de control y monitoreo para ser confiable.

Servicios prestados por las EP

1. Materialización del Marco de referencia.
2. Cálculo de coordenadas, velocidades, aporte a redes internacionales.
3. Base de los sistemas de mejoramiento de la precisión (internacionalmente llamados sistemas de aumentación).
4. Georreferenciación, usuarios profesionales.
5. La utilidad de la EP GNSS será en función de los equipos de los usuarios.

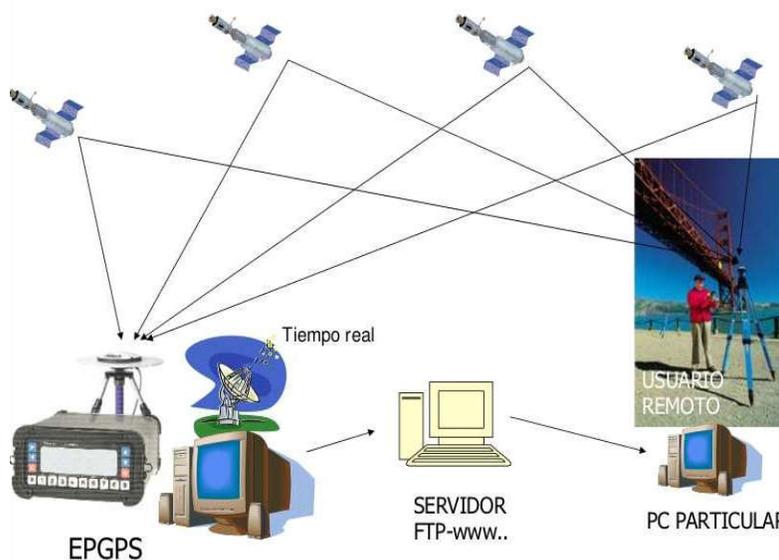


Figura III-14: Esquema de funcionamiento de una Estación Permanente GPS (EPGPS).

EP UNRO (Figura III-15)

Ubicada en la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura – Universidad Nacional de Rosario

Coordenadas Geodésicas (en el Marco de referencia POSGAR 07):

Latitud B	Longitud L	Altura elipsoidal h [m]	Cota SRVN16 [m]
32°57'33".67055 S	60°37'42".33075 W	66.872	49.649

En funcionamiento desde Marzo de 2002, integra la Red Nacional RAMSAC y la Internacional SIRGAS, presta un servicio público gratuito a todos los usuarios de GPS-GNSS, que pueden acceder a sus datos de observación a través de Internet (ya sea para postproceso o en tiempo real) en www.fceia.unr.edu.ar/gps y/o www.ign.gob.ar.



Figura III-15: Estación Permanente GNSS Rosario

Sistemas de mejoramiento de la precisión

Consiste en un conjunto de estaciones permanentes de rastreo que efectúan el monitoreo del funcionamiento de los satélites, el cálculo de correcciones y la transmisión de las mismas mediante otros satélites específicamente destinados a tal fin. Son sistemas de alcance regional.

Algunos de los sistemas son:

- WAAS - Wide Area Augmentation System (US).
- EGNOS - European Geostationary Navigation Overlay System.

Sistema Satelital de Navegación Global (GNSS)

Nos referimos con esta denominación al conjunto de sistemas de posicionamiento (GPS-GLONASS-GALILEO-COMPASS) y adicionando los sistemas de aumentación.

IV. Cartografía.

Documentos cartográficos, cartas, mapas y planos. Breve reseña histórica de la cartografía argentina. La representación en el plano y sus problemas. La proyección cartográfica Gauss-Krüger. Distintos tipos de cartas. Cartografía y georreferenciación

IV.1. Cartas, mapas y planos

Probablemente cuando mencionamos la palabra mapa aparecen recuerdos de la escuela primaria, cuando accedimos a los primeros mapas. Quizás también reaparecen clasificaciones: mapa mudo, mapa político, etc.

Cuando vemos un mapa nos sentimos invitados a viajar y, de algún modo, recorriendo un mapa "viajamos".

Mapas, cartas y planos constituyen documentos cartográficos. No existe una clasificación rigurosa que los diferencie. Suelen diferenciarse por la porción del territorio que abarcan y subsecuentemente por la escala que utilizan (recordemos entendemos por escala la relación entre la medida en el documento representativo y la medida en el espacio real).

En general, cuando hablamos de planos pensamos en una casa, un barrio, un campo; ya en las cartas se trata seguramente de decenas de kilómetros y en los mapas pensamos en provincias, países, continentes. Pero como dijimos esto no es riguroso. Por otra parte, es conocido que hay documentos cartográficos dedicados a usos específicos, es decir son de carácter temático.

IV.2. Breve reseña histórica de la cartografía argentina

La historia de la cartografía es poco menos antigua que la de la sociedad humana.

Actividades tan antiguas como el comercio o la conquista territorial fueron motor esencial del desarrollo de la cartografía.

El avance científico y tecnológico permite y a la vez requiere contar con cartografía adecuada. Ese avance, en lo que a cartografía se refiere, posibilita un perfeccionamiento y también un uso anteriormente inusitado.

La conjunción del posicionamiento satelital, brindando georreferenciación, y la informática como herramienta, replantean un uso cada vez más generalizado de la cartografía.

¿Podemos hablar de la popularización del uso del dato geográfico como un nuevo paradigma?

La cartografía argentina tiene una larga y riquísima historia. Su desarrollo es inmediatamente posterior a la Revolución de Mayo y tiene hitos particulares con la creación de la Oficina Topográfica Militar en 1879, su transformación en 1904 en Instituto Geográfico Militar (IGM) y la sanción de la Ley de la Carta en 1941 (reformada en 1983).

La producción cartográfica oficial ha sido extraordinaria pero durante mucho tiempo estuvo sujeta a una contradicción.

El caso es similar al del GPS. En éste, originalmente se degradaba la precisión librada al uso civil porque se la consideraba incompatible con el interés militar, hasta que en el año 2000 el gobierno de EEUU se vio obligado a eliminar esa restricción.

Esa misma concepción rigió durante mucho tiempo los destinos de la Cartografía Argentina. Vale la cita siguiente de un antiguo manual: "... *el valor de la cartografía a tal punto que podemos considerarla hoy, un medio más de combate. Ejército Argentino - Lectura de cartografía, 1973*"

La circulación de cartografía producida por el IGM era más bien restringida y era desestimulada la producción de cartografía por fuera del IGM.

Felizmente eso ha sido superado. El IGM se ha transformado en el Instituto Geográfico Nacional (IGN) a partir del año 2009 y se ha reorientado.

Por ejemplo, ya se ha llevado a cabo la actualización de varias cartas topográficas, en el caso de la Provincia de Santa Fe, trabajando conjuntamente entre el IGN y el Servicio de Catastro e Información Territorial de la Provincia (SCIT). La primera de ellas es la carta de Vera, la cual, simbólicamente, utilizamos en este curso.

En definitiva, en lo que se refiere a Geografía, y en particular a Cartografía, estamos frente a un cambio cultural. Su base tecnológica está constituida por la popularización del acceso a la informática y a la georreferenciación mediante posicionamiento satelital.

Ante ese cambio es necesario pensar qué nuevas posibilidades ofrece y qué nuevas exigencias impone, para la docencia, para la investigación, para las profesiones

A sólo título de ejemplo podemos decir que el impacto en la enseñanza de la geografía es inmediato, pero cabe la pregunta ¿ahí termina todo?

Estamos ante un desafío. Como siempre, la vocación por la docencia y la investigación nos moverá a resolverlo. Como siempre también habrá quienes busquen esquivarlo.

Mencionamos ya los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y sus posibilidades de aplicación en las más diversas ramas del conocimiento.

Desde luego que no todo es simple y fácil.

También, como siempre, están de por medio las condiciones materiales.

¿Hay coherencia entre las posibilidades tecnológicas mencionadas y los medios materiales que disponemos, es decir, laboratorios, computadoras, software, internet, salidas al terreno, etc.?

Sin embargo, no olvidemos que *"... lo esencial es invisible a los ojos"*, según dijo el Principito.

IV.3. La representación plana.

Estamos acostumbrados a la representación plana. Fotos, televisión, cine, son herramientas de representación de la realidad a través de expresiones planas.

La representación plana es "naturalmente" parte de nuestra cultura y es lógico que así sea porque estamos condicionados por los medios que disponemos, por el grado de desarrollo de los conocimientos y la tecnología.

No toda representación de la realidad es plana. Por ejemplo, el teatro no lo es, tampoco lo son las maquetas. Seguramente futuros desarrollos de la tecnología permitirán representaciones más aproximadas a lo holístico.

Pero cuanto más extensa es la realidad a representar más difícil es expresarla mediante la representación plana.

Cuando se representa una porción considerable de la superficie terrestre mediante una figura plana inevitablemente se producen deformaciones.

Veamos el típico caso del planisferio.

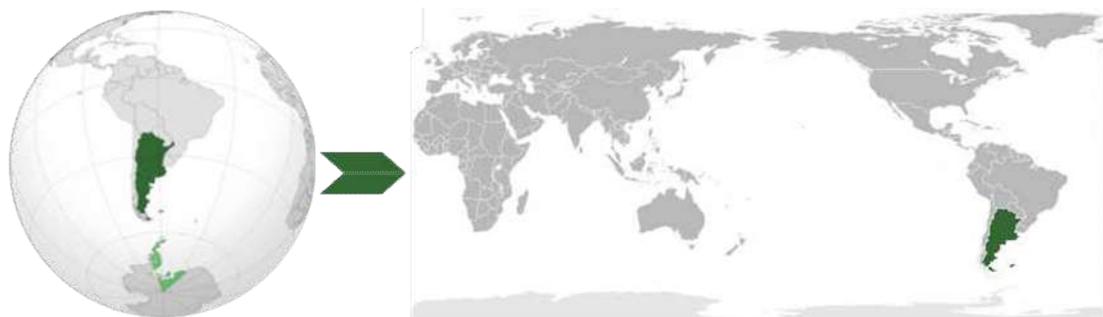


Figura sobre el elipsoide

Figura sobre el plano

Figura IV-1: Representación en el plano.

Quizá el ejemplo más significativo de la deformación es la representación del polo terrestre en un planisferio, que en la realidad es sólo un punto, pero se lo representa mediante una recta cuya longitud sería de 40.000 km si se considera la escala de representación.

Una pregunta interesante ¿a partir de qué extensión esa deformación comienza a ser importante?

La respuesta no es única. Depende qué se quiere representar de la superficie terrestre, para qué fines y qué método de representación se utiliza.

Resulta muy interesante el programa "EL VERDADERO TAMAÑO" para ver la variación de la representación plana al cambiar la latitud, siempre dentro del sistema de proyección utilizado por ese programa.

[https://www.thetruesize.com/#?borders=1~!MTU5MDI2ODA.NDI3MDExNw*Mjk4NDY2NTA\(NzY0NTQ3OA~!CONTIGUOUS_US*MTAwMjQwNzU.MjUwMjM1MTc\(MTc1\)MA~!IN*NTI2NDA1MQ.Nzg2MzQyMQ\)Mg~!CN*OTkyMTY5Nw.NzMxNDcwNQ\(MjI1\)MQ](https://www.thetruesize.com/#?borders=1~!MTU5MDI2ODA.NDI3MDExNw*Mjk4NDY2NTA(NzY0NTQ3OA~!CONTIGUOUS_US*MTAwMjQwNzU.MjUwMjM1MTc(MTc1)MA~!IN*NTI2NDA1MQ.Nzg2MzQyMQ)Mg~!CN*OTkyMTY5Nw.NzMxNDcwNQ(MjI1)MQ)

En cartografía existen una gran cantidad de sistemas de representación plana.

Se diferencian unos de otros por los fines a los cuales están destinados y consecuentemente con ello a qué variables prestan principal atención.

Ninguno puede evitar que haya deformaciones, pero sí puede evitar o minimizar algunas a expensas de sacrificar otras.

Es imposible describir aquí la amplísima variedad.

Desde luego que unos de otros se diferencian en los procedimientos matemáticos a los que apelan para lograr su fin.

Toda representación requiere usar escalas. Ya la hemos mencionado, que la escala es la expresión numérica que relaciona la medida del objeto real con la medida de su representación.

Cuando, por ejemplo, la escala es 1:10.000 significa que 1 metro representa a 10.000 metros.

En las cartas topográficas de nuestro país suele usarse la escala 1:50.000, donde una carta en papel cuya dimensión es del orden del metro está representando una parte de nuestro país del orden de los 50 kilómetros.

IV.4. Representación cartográfica Gauss-Krüger.

La representación cartográfica Gauss-Krüger es la adoptada oficialmente por la República Argentina.

Una de sus características es que las figuras conservan su forma, es decir los ángulos no varían entre la carta y la realidad (lo que en cartografía se llama proyección conforme).

Se adoptan siete "fajas" (Figura IV-2), cada una de las cuales se identifica por un meridiano llamado meridiano central. El ancho de cada faja es de 3° (1,5° a cada lado del meridiano central). Esta restricción se debe a que, a medida que la faja se ensancha, crece la deformación en sus costados.

Tan solo como ejemplo diremos que si un inmueble está ubicado en la zona rural próxima a la ciudad de Rufino (tomamos latitud -34° 24' y longitud -62° 54', en la punta de la bota santafesina), y se pretende representarlo en la faja con meridiano central 60°, en esa zona el módulo de deformación es 1.00087646, es decir que en 1000 m se produce una distorsión de 88 cm

Las coordenadas Gauss-Krüger indican la posición sobre la superficie de referencia (el elipsoide) nada dicen de la altura del punto considerado.

La coordenada X indica la distancia al Polo Sur. Para calcular la Y se considera la distancia desde el meridiano central al punto en cuestión, que se considera positiva si está al Este (a la derecha del meridiano central en la carta) y negativa si está al Oeste (a la izquierda) y se le suma un valor fijo llamado "falso Este", lo que permite identificar en qué faja se halla ubicado el punto (ver Tabla IV-1).

El pasaje de las coordenadas geográficas latitud y longitud a las X, Y correspondientes a la proyección Gauss-Krüger (y viceversa) se efectúa mediante cálculos matemáticos para lo cual existe software al efecto.

L_{mc} (Long. del meridiano central)	Y₀ (Falso Este) [m]	Faja
-72°	1500000	1
-69°	2500000	2
-66°	3500000	3
-63°	4500000	4
-60°	5500000	5
-57°	6500000	6
-54°	7500000	7

Tabla IV-1: Correspondencia entre números de faja, meridianos centrales y Falsos Este.

Husos cartográficos

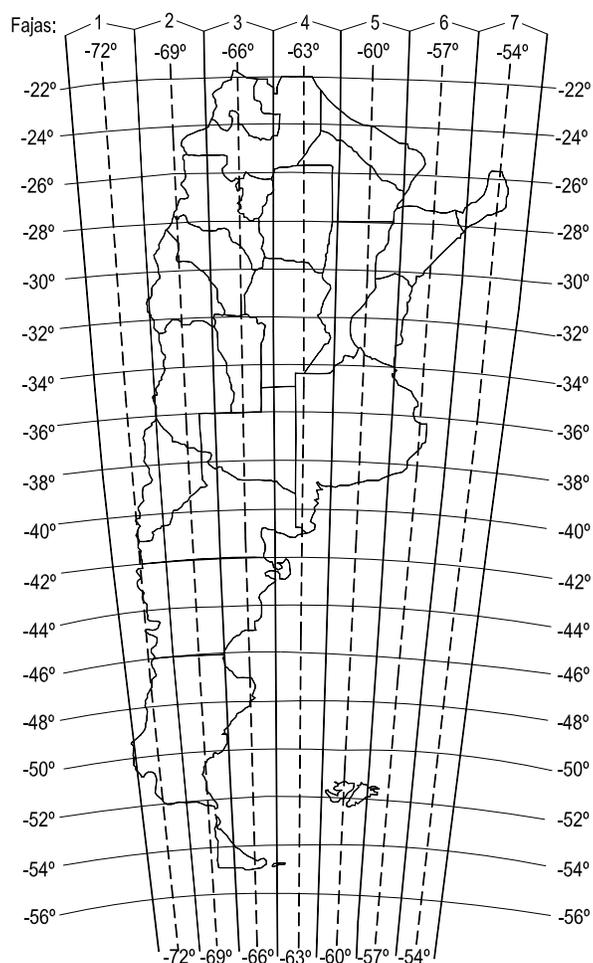


Figura IV-2: Husos cartográficos en la República Argentina.

Ejemplo de **coordenadas Gauss-Krüger (GK)** de la Estación Permanente UNRO:

Punto	Marco de Referencia	X [m]	Y [m]	L _{mc}
UNRO	POSGAR'07	6353550.31	5441244.25	-60°

Recordemos que las coordenadas de UNRO expresadas de otra manera son:

Geodésicas	Latitud B	Longitud L	h [m]
	-32°57'33".67055	-60°37'42".33075	66.872

IV.5. Cartografía y georreferenciación

Podemos afirmar que a esta altura del desarrollo de los conocimientos no existe cartografía sin georreferenciación. Una representación cartográfica, para ser tal, debe estar basada en la georreferenciación de los elementos representados. Debe ser posible conocer las coordenadas de cualquier elemento representado. De no ser así no estamos hablando de cartografía

Se tratará, en todo caso de planos, por más precisos que fueren, carecientes de referencia al sistema general, o bien de croquis ilustrativos

Por el contrario, puede haber georreferenciación sin cartografía. Un listado de coordenadas correspondientes a un conjunto de elementos es una forma de georreferenciación.

Para que ello derive en cartografía es necesario adoptar un sistema de proyección cartográfica, efectuar los cálculos correspondientes y proceder a la graficación.

IV.6. Distintos tipos de cartas

Existen muy variados tipos de cartas, tantos como las necesidades demanden.

Por citar algunas podemos mencionar cartas náuticas, cartas de suelo, cartas climáticas, etc.

Si bien todas tienen en común el carácter de representación plana eso no quiere significar la renuncia a representar el relieve, para lo cual se apela a distintos recursos.

Quizá el más ilustrativo, para entender el relieve incluso a primera vista, son las llamadas curvas de nivel.

La tecnología hoy disponible permite otro tipo de representaciones que exceden los alcances de este curso. Nos referimos a los modelos digitales de terreno. Obviamente los mismos no son posibles sino es a partir de la georreferenciación, es decir de las coordenadas.

IV-7. Cartografía digital

Si bien la cartografía impresa en soporte papel mantiene vigencia, la cartografía digital adquiere fundamental importancia.

La forma digital de la cartografía permite ampliar y extender su uso; facilita la popularización de la cartografía.

Mencionamos como ejemplo un programa de acceso público y gratuito (por eso mismo nos permitimos mencionarlo), "Google Earth", basado en imágenes satelitales, que tiene la particularidad de mostrar al usuario, además de la visión territorial, justamente las coordenadas correspondientes a cada uno de los puntos que se elija en la imagen. Es decir se trata de cartografía digital donde la georreferenciación es explícita.

Para decirlo de otra manera, ese programa nos permite obtener "el documento de identidad" (latitud y longitud) de cada punto visible en la imagen.

Obviamente es posible el procedimiento inverso: dadas un par de coordenadas "ver" a qué punto del mundo corresponden.

Y si hablamos de georreferenciación y cartografía digital es seguro que, en este momento, la mayoría de quienes estamos leyendo (si no todos), tengamos al alcance de la mano el más difundido de los aparatos que integran la georreferenciación (ya sea mediante satélites y/o antenas telefónicas), con cartografía digital, es decir los llamados "celulares".

V. Bibliografía

- Barthelmes, F., Köhler, W. (2016) International Centre for Global Earth Models (ICGEM) En: Drewes, H., Kuglitsch, F., Adám, J. et al., The Geodesists Handbook 2016, Journal of Geodesy (2016), 90(10), pp 907-1205, doi: 10.1007/s00190-016-0948-z. "Visualization of Gravity Field Models and their Differences". 'ICGEM' Recuperado de <http://icgem.gfz-potsdam.de/> (Fecha de visita: Abril de 2019)
- Doncel Domínguez, J.A. (2014) "Coordenadas geográficas: paralelos y meridianos, latitud y longitud". 'Las historias de Doncel. Blog didáctico de Historia y Geografía'. Recuperado de: <http://jadoncel.blogspot.com> (Fecha de visita: Marzo de 2019)
- Furones, A.M. (2010). "Sistema y marco de referencia terrestre. Sistemas de coordenadas". Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría Universidad Politécnica de Valencia.
- Huerta, E., Mangiaterra, A., Noguera, G. (2005). "GPS. Posicionamiento Satelital". UNR Editora. ISBN 950-673-488-7. Recuperado de <http://www.fceia.unr.edu.ar/gps>.
- Ibáñez, R. (2011) "El sueño del mapa perfecto. Cartografía y matemáticas" Realización: Editec.
- Illán García, L. (2015) "Colón a través de sus instrumentos de viaje". Artículo de "La Nueva España" Recuperado de www.lne.es (Fecha de visita: Abril de 2019).
- Instituto Geográfico Nacional (s.f) "Mapa de la Red". 'Instituto Geográfico Nacional'. Recuperado de <http://www.ign.gob.ar> (Fecha de visita: Abril de 2019).
- Nagel, H. (1997) "Latitud y longitud terrestre. Sus historias anecdóticas" Reportaje para la Revista de Marina. Recuperado de <https://revistamarina.cl/> (Fecha de visita: Abril de 2019).
- Oficina de Coordinación Nacional de Posicionamiento, Navegación, y Cronometría por Satélite, Gobierno de EEUU (2017) "Control Segment". 'Sistema de Posicionamiento Global al Servicio del Mundo'. Recuperado de <http://www.gps.gov/systems/gps/> (Fecha de visita: Abril de 2019)
- Oficina de Coordinación Nacional de Posicionamiento, Navegación, y Cronometría por Satélite, Gobierno de EEUU (2017) "Space Segment". 'Sistema de Posicionamiento Global al Servicio del Mundo'. Recuperado de <http://www.gps.gov/systems/gps/> (Fecha de visita: Abril de 2019)
- Papp, D. (1996) "Historia de las ciencias. Desde la antigüedad a nuestros días" Editorial Andrés Bello.
- Pérez García, M.A. (2013) "Una historia de las matemáticas: retos y conquistas a través de sus personajes" Editorial Visión Libros.
- Pérez Sepúlveda, J.A., Paniagua Castrillón; J.G. (2016) "Geometría analítica e introducción al cálculo vectorial" Instituto Tecnológico Metropolitano.
- Prieto, G. (2016) "La historia de la cartografía a través de los mapas". 'Geografía infinita'. Recuperado de <https://www.geografiainfinita.com> (Fecha de visita: Marzo 2019)
- Ruiz Zúñiga, Á. (2013) "Historia y Filosofía de las Matemáticas" Editorial Universidad Estatal de Educación a Distancia.
- Schlögel, K. (2007) "En el espacio leemos el tiempo: sobre historia de la civilización y geopolítica". Ediciones Siruela.
- Servicio Transfronterizo de Información Geográfica (STIG) (s.f) "¿Qué es un SIG?". Universidad de Salamanca. Recuperado de <http://www.stig.usal.es>. (Fecha de visita: Abril de 2019)
- Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (s.f) "Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas SIRGAS". Recuperado de: <http://www.sirgas.org> (Fecha de visita: Abril de 2019)
- Torge, W. (1983) "Geodesia" Editorial Diana.
- Torge, W. (2001) "Geodesy" Third Edition Walter de Gruyter.
- Torres Bravo, P.A. (2001) "Enseñanza del tiempo histórico. Historia, Kairós y Cronos". Una unidad didáctica para el aula de Eso. Ediciones de la Torre. Proyecto didáctico Quirón. Madrid.
- Zakatov, P.S. (1981) "Curso de Geodesia Superior" Editorial Mir.

Anexo A: Agricultura de precisión

Mapa de rendimiento de una parcela agrícola

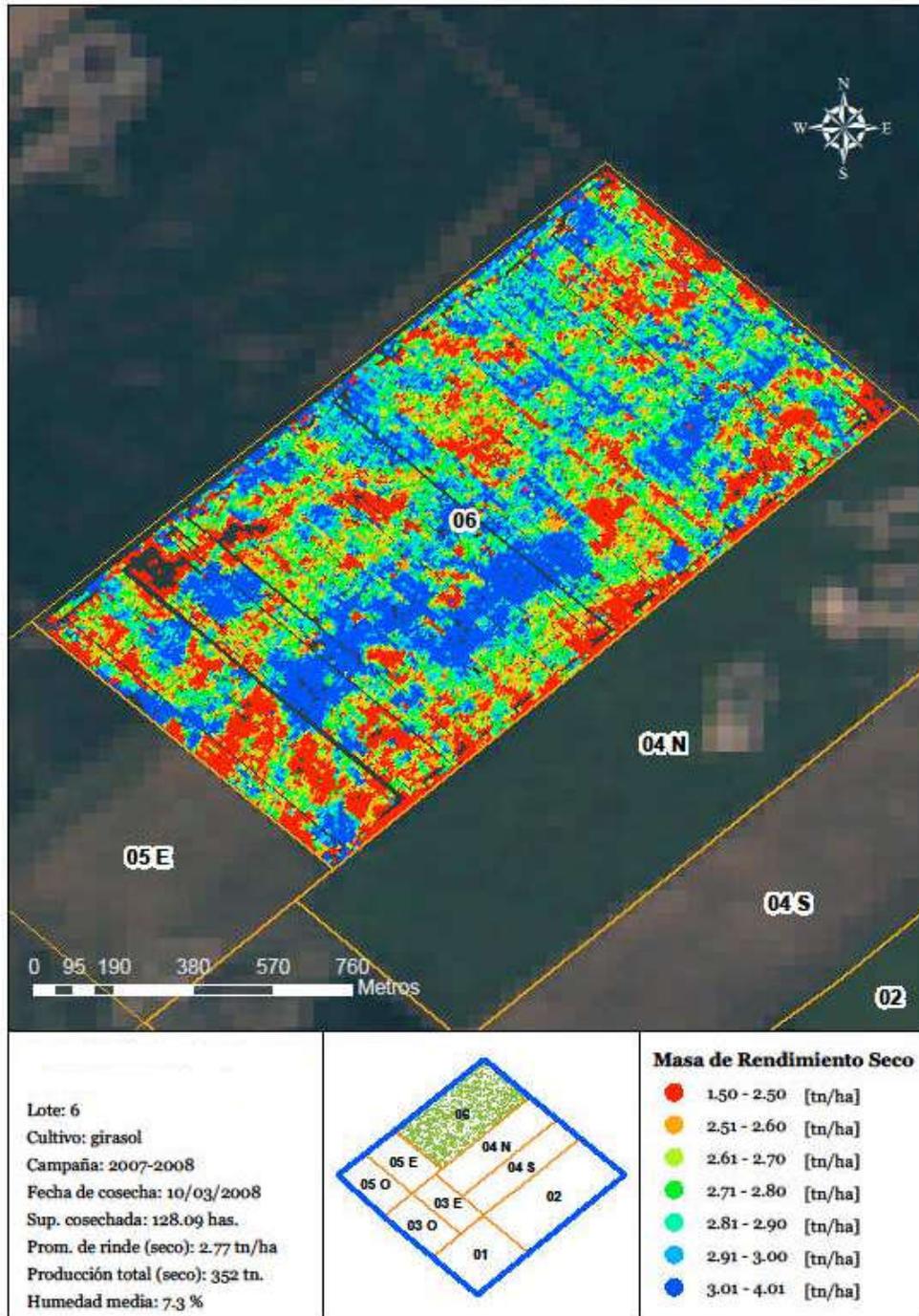


Figura A-1: Mapa de rendimiento.