

Sistemas de Proyección

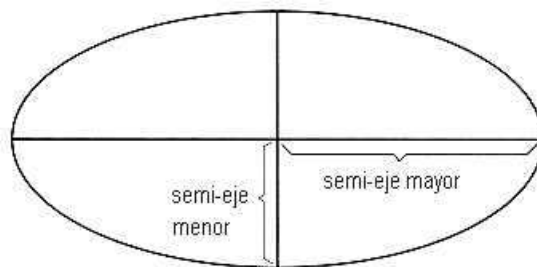
Los mapas son planos y la superficie terrestre es curva. La transformación de un espacio tridimensional en uno bidimensional es lo que se conoce como “proyección”. Las fórmulas de proyección son expresiones matemáticas que se utilizan para convertir los datos de posiciones geográficas (latitud y longitud) sobre una esfera o esferoide en posiciones sobre un plano. Este proceso distorsiona al menos una de las siguientes propiedades: forma, superficie, distancia o dirección. Debido a que es frecuente realizar mediciones de alguna de éstas propiedades, los usuarios de los mapas deberían saber que propiedades son afectadas por un sistema de proyección determinado y en que medida. En resumen, los mapas *conformes* conservan las formas locales, mapas *equivalentes* mantienen todas las áreas a la misma escala, mapas *equidistantes* conservan las distancias, y mapas de *dirección verdadera* contienen las direcciones geográficas en forma precisa.

1. La forma de la Tierra

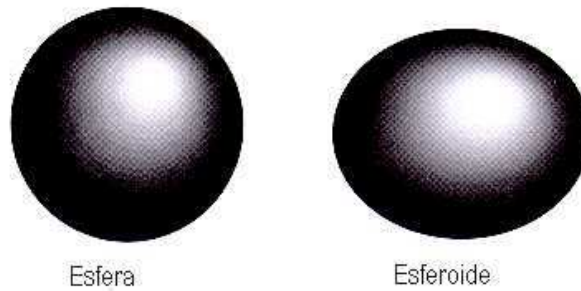
Aunque la tierra es realmente un esferoide muchas veces se trata como si fuera una esfera con el objetivo de facilitar los cálculos matemáticos. El radio de ésta esfera es de 6.370.997 metros. Suponer a la tierra como una esfera no tiene mayores inconvenientes en mapas de escala pequeña (menores a 1:5.000.000) debido a que no se detecta la diferencia entre una esfera y un esferoide. Sin embargo, para escalas grandes (1:1.000.000 o más) la tierra debe ser tratada como un esferoide para mantener la precisión de los mapas.

Al igual que una esfera se basa en un círculo, un esferoide (o elipsoide) esta basado en una elipse. La forma de una elipse esta definida por dos radios. Los respectivos radios de cada eje se denominan eje semi-menor eje y semi-mayor.

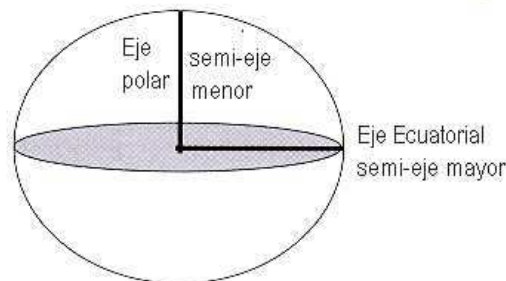
La diferencia de magnitud entre los dos ejes de una elipse pueden ser expresados como una fracción o como un decimal. Este valor es usado para definir su grado de elipticidad o aplanamiento.



Los valores de elipticidad pueden variar de cero a uno, donde una elipticidad de cero significa que los dos ejes son iguales y la elipse se transforma en un círculo. Una elipticidad de uno significa que la figura tendría solo un eje, apareciendo como una línea, cuya longitud sería igual al largo del eje mayor. Un elipsoide que se aproxima a una esfera es llamado esferoide, un elipsoide que se aproxima a la forma de la tierra puede ser formado por rotación sobre el eje menor.



La elipticidad de una esfera es cero, mientras que la elipticidad de la tierra es aproximadamente 0,003353. Un fenómeno de achatamiento es observado en los polos y una mayor curvatura ocurre en el Ecuador. De esta forma el semi-eje mayor describe el radio ecuatorial, y el semi-eje menor representa el radio polar.



Definición de diferentes esferoides para cartografía de precisión

La tierra ha sido cartografiada muchas veces para lograr un mejor entendimiento de los elementos sobre su superficie y sus peculiares irregularidades. De estos estudios se han definido muchos esferoides para representar la tierra. Los semi-ejes mayor y menor que mejor describen la forma de la tierra en una zona geográfica no son necesariamente los mismos para otra zona. Hasta hace poco los valores determinados por Clarke en 1866 fueron usados para describir el esferoide de mayor uso en Norteamérica, el cual es conocido como North American Datum 1927 (NAD27). El semi-eje mayor de este esferoide es de 6.378.206,4 metros, y el semi-eje menor ha sido calculado como 6.356.583,8 metros.

Debido a variaciones gravitacionales y variaciones en los elementos superficiales, la tierra no es ni una esfera perfecta, ni un esferoide perfecto. La tecnología satelital ha revelado la presencia de severas desviaciones elípticas. Por ejemplo el polo Sur está más cerca del Ecuador que el polo Norte. En los últimos años esferoides calculados usando tecnología satelital han reemplazado a esferoides calculados en tierra.

2. Mediciones del globo terráqueo

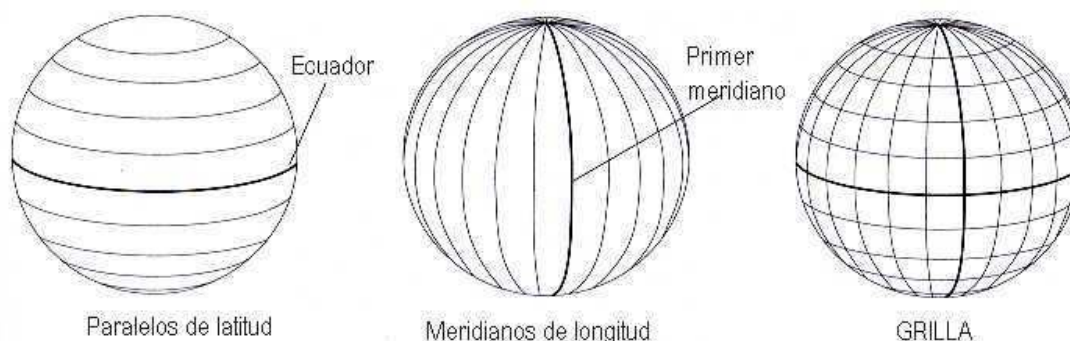
Aunque grado de latitud y de longitud pueden ser usados para localizar en forma exacta posiciones sobre el globo, no constituyen unidades uniformes de medida sobre la superficie terrestre, sólo alrededor del Ecuador la distancia representada por un grado de longitud es aproximadamente igual

a la distancia representada por un grado de latitud. Esto es debido a que el Ecuador es el único paralelo tan largo como un meridiano.

Los grados de latitud y longitud no están asociados a un largo estándar y por lo tanto no pueden ser usados para hacer mediciones precisas de las distancias. Además, debido a que es un sistema de referencia basado en ángulos medidos desde el centro de la tierra, y no mediciones de distancia sobre la superficie de ella, no es un sistema de coordenadas plano. De la misma forma, debido a que el sistema de coordenadas global es usado para representar la superficie curva de la tierra, no puede ser llamado un sistema de proyección. Sería más exacto decir que los valores de latitud y de longitud sirven como posiciones de referencia sobre la superficie de la tierra para todos los sistemas de proyección de mapas disponibles. Debido a esta habilidad de referenciar posiciones específicas, el sistema de coordenadas esféricas es también conocido como Sistema de Referencia Global (Global Reference System). Las unidades de grados, minutos, y segundos son usadas para georeferenciar puntos sobre los mapas base.

Mediciones Esféricas

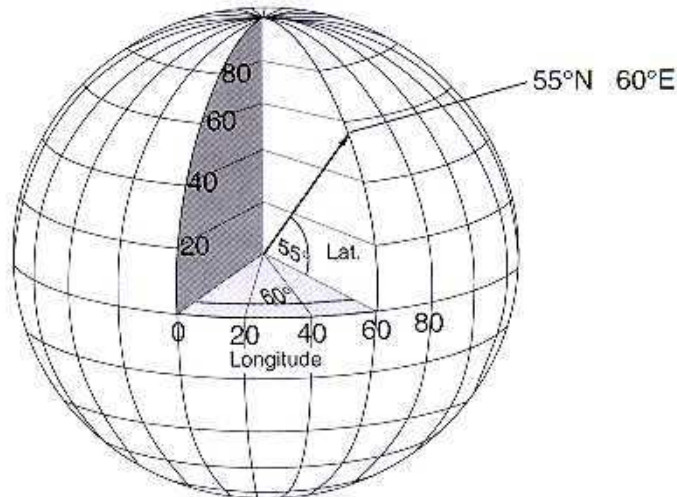
Aunque es fácil de conceptualizar la cartografía de superficies planas, o la geometría planar, la proyección de los sistemas de proyección comienza entendiendo la geometría esférica. En un sistema esférico todas las líneas horizontales son llamadas *latitudes* o *paralelos*. Las líneas verticales son llamadas *longitudes* o *meridianos*. Estas líneas envuelven el globo formando una grilla.



Por encima y debajo del Ecuador, los círculos que definen los paralelos se van reduciendo de tamaño en forma gradual hasta que se convierten en un único punto, el Polo Norte o el Polo Sur. Los polos son también el lugar donde los meridianos convergen. Dado que los meridianos convergen en estos puntos, la distancia representada por una grado de longitud va disminuyendo hasta que es igual a cero. En el esferoide de Clarke 1866, un grado de longitud en el Ecuador es igual a 111,321 Km., mientras que a una latitud de 60° es de sólo 55,802 Km.

Observando el Polo Norte arriba, el eje horizontal es llamado Ecuador y el eje vertical es llamado primer meridiano de Greenwich. El origen es definido por la intersección de ambos, y al igual que el sistema cartesiano sus coordenadas son (0,0). La esfera es entonces dividida en cuatro cuadrantes geográficos basado en las direcciones definidas por una brújula en el origen. Arriba y bajo el Ecuador son llamados Norte y Sur respectivamente, y a la derecha y a la izquierda del meridiano de Greenwich se les denominan Este y Oeste.

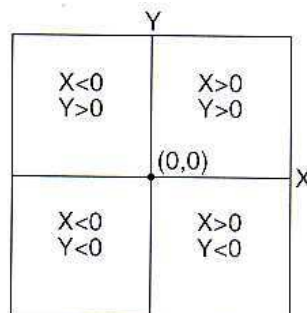
Latitud y longitud son ángulos medidos desde el centro de la tierra, los cuales definen la posición de puntos sobre el globo. Ellos corresponden al ángulo de una línea que se extiende desde el centro de la tierra hasta su superficie entendida como un sistema esférico de coordenadas.



Una círculo puede ser dividido en 360 unidades llamadas grados, cada grado puede ser subdividido en 60 minutos y cada minuto en 60 segundos. Latitud y longitud son tradicionalmente medidos en grados, minutos y segundos. Para la latitud, 0° está en el Ecuador, 90° en el Polo Norte, y -90° en el Polo Sur. Para la longitud, 0° es el meridiano de Greenwich (Inglaterra), comienza en el Polo Norte pasa por Greenwich, y termina en el Polo Sur. La longitud es medida en forma positiva hasta 180° , cuando se viaja desde Greenwich al Este, y en forma negativa hasta -180° cuando se viaja de Greenwich al Oeste. Por ejemplo, Australia está al Sur del Ecuador y al Este de Greenwich, tiene longitud positiva y latitud negativa.

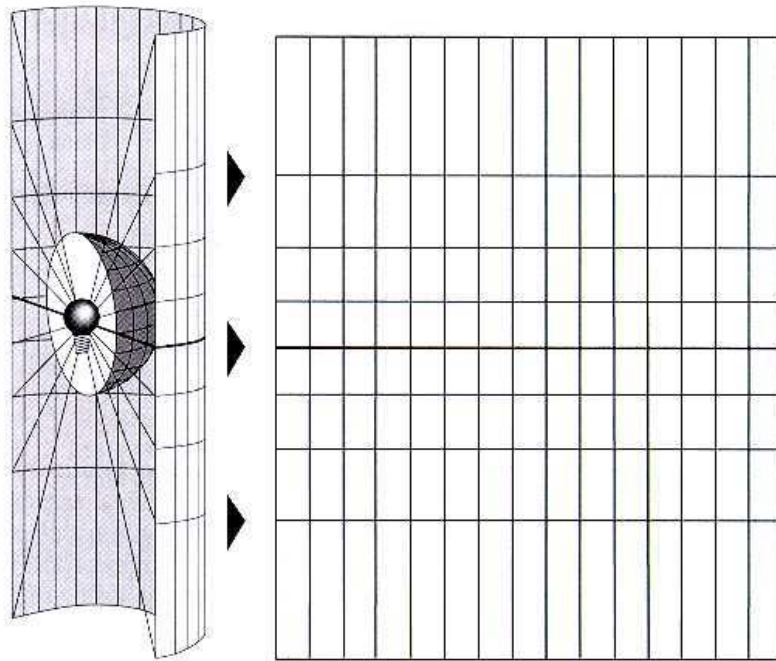
Mediciones en el plano

Debido a la dificultad de realizar mediciones en coordenadas esféricas, los datos geográficos son proyectados a un sistema de coordenadas plano. Una vez que la esfera, o una parte de ella, es proyectada sobre una superficie plana los valores esféricos cambian. Sobre un plano, las posiciones son indicadas por el par de coordenadas (x,y) sobre una grilla, con el origen en el centro de la misma. Cada posición tiene dos valores, uno indicando su posición horizontal (eje x) y el otro su posición vertical (eje y). Las coordenadas del centro son (0,0). La ventaja de un sistema planar, es que las medidas de largos, ángulos y áreas se mantienen constantes a lo largo de las dos direcciones.



Propiedades de los sistemas de proyecciones cartográficas

Ya sea que se trate a la tierra como una esfera o como un esferoide, se debe transformar su superficie tridimensional para crear un mapa plano. Esta transformación usualmente usando ecuaciones matemáticas, es conocida comúnmente con el nombre de sistemas de proyección. Una forma más fácil de entender como los sistemas de proyección alteran las propiedades espaciales es hacer una visualización de la proyección de un haz de luz a través de una superficie esférica (proyección superficial), tal como se observa en la siguiente figura.



La proyección de un mapa involucra el uso de coordenadas que son definidas por fórmulas de proyección. Las fórmulas pueden transformar una cobertura de origen en una cobertura de salida que luce similar, pero esta dibujada sobre una proyección completamente diferente. El resultado muestra que las intersecciones, entre meridianos y paralelos, se mantienen pero los ángulos en los que estas intersecciones ocurren son diferentes. El siguiente diagrama muestra como las características tridimensionales son comprimidas para que calcen sobre la superficie plana. También puede ocurrir un estiramiento.



Proyecciones conformes

Las proyecciones conformes preservan las formas locales. Las líneas de la grilla sobre el globo forman ángulos perpendiculares. Para preservar los ángulos individuales que describen las relaciones espaciales, una proyección conforme debe presentar una grilla de líneas que se intercepten en ángulos de 90° sobre el mapa. Esto se logra manteniendo todos los ángulos, incluyendo aquellos entre las intersecciones de los arcos. El problema es que el área encerrada por una serie de arcos será distorsionada en el proceso. No existe un sistema de proyección que pueda preservar la forma cuando se trabaja con grandes regiones.

Proyecciones de área equivalentes

Este tipo de proyecciones preservan el área con que los elementos son representados. Para ello, las propiedades de forma, ángulos, escala, o cualquier combinación de ellas será distorsionada en alguna medida. Así en este tipo de proyecciones los meridianos y los paralelos podrían no presentar ángulos rectos en sus intersecciones. En algunos casos, especialmente en mapa para pequeñas regiones, no será tan obvia la distorsión de la forma, y será difícil entre un sistema de proyección conforme y uno de área equivalente.

Proyecciones Equidistantes

Los mapas equidistantes preservan las distancias entre ciertos puntos. La escala no puede ser mantenida correctamente para la totalidad del mapa por ningún sistema de proyección. Sin embargo existen en algunos casos, una o más líneas sobre el mapa sobre las cuales la escala sí se mantiene correctamente. La mayoría de los sistemas de proyección tienen una o más líneas para las cuales su largo sobre el mapa es el mismo (a escala) que su línea de referencia sobre el globo, sin importar si es un círculo grande o pequeño, recto o curvo. Tales distancias son llamadas verdaderas.

Proyecciones de dirección verdadera

El camino más corto entre dos puntos sobre una superficie curva, como la de la tierra, es a lo largo del equivalente esférico de una línea recta sobre una superficie plana. Esto es, el círculo sobre el cual los dos puntos se encuentran. Los sistemas de proyección de distancia verdadera o acimutales se usan para rectificar alguno de los arcos de los círculos del globo, entregando la dirección o acimut de todos los puntos sobre el mapa correctamente con respecto al centro. Existen sistemas de proyección de este tipo que también son conformes, área equivalentes o equidistantes.

3. Tipos de Proyección

Debido a que los mapas son planos, algunos de los sistemas de proyección más simples se hacen sobre formas geométricas que pueden aplanar, sin estirar, sus superficies. Ejemplos comunes de formas que usan este criterio son conos, cilindros, y planos. En realidad, los cilindros y planos son formas limitadas de un cono. Una expresión matemática que proyecta sistemáticamente las posiciones de la superficie de una esfera para representarlas en un plano es llamada un *sistema de proyección*.

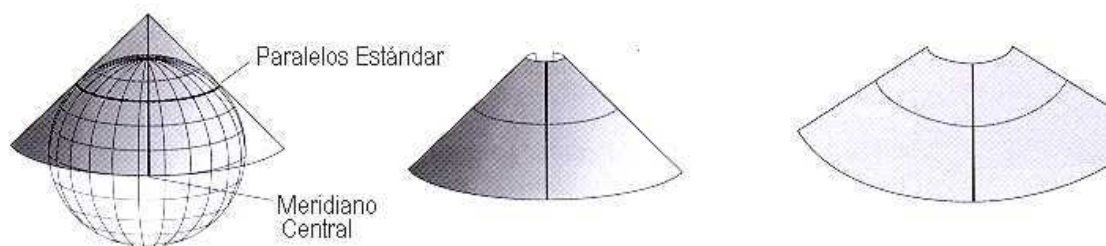
El primer paso para proyectar de una superficie a otra es crear uno o más *puntos de contacto*. Cada uno de estos puntos se denomina *punto de tangencia*. Como se observa en la figura, una proyección planar tiene sólo un punto de tangencia. Por otra parte, un cono o un cilindro tienen líneas

tangenciales sobre el globo. Si el plano de proyección intercepta al globo en vez de tocarlo tangencialmente, la proyección resultante involucra cálculos de secantes más que de tangentes. Ya sea que el contacto es secante o tangente, su localización es de importancia debido a que definen posiciones de distorsión nula. Estas líneas son de escala verdadera y se les conoce como *líneas estándar*. En general, la distorsión aumenta en forma proporcional a la distancia a éstas líneas de contacto.

La mayoría de los sistemas de proyección pueden ser clasificados de acuerdo al tipo de superficie de proyección a utilizar: cónica, cilíndrica y plana.

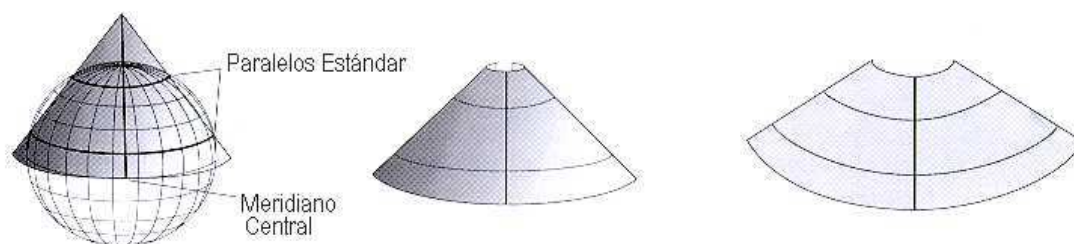
Proyecciones cónicas

La proyección cónica más simple es aquella en que el plano cónico es tangente al globo a lo largo de una línea de latitud. En una proyección dada esta línea es llamada *paralelo estándar*. Los meridianos se proyectan en la superficie y se unen en el ápice. Las líneas de paralelos se proyectan sobre la superficie cónica como anillos consecutivos. A continuación, se corta el plano del cono en un meridiano conocido, se abre, y se obtienen la proyección final, la cual tiene meridianos rectos que convergen y arcos de círculos concéntricos como paralelos. El meridiano opuesto a meridiano de corte se conoce como meridiano central.



En general, las distorsiones aumentan al norte y al sur del paralelo de tangencia. Por ello, truncando el cono se obtienen proyecciones más precisas. Ello puede ser logrado, al no incluir las regiones polares en la proyección.

Se pueden desarrollar Proyecciones más complejas si se tienen dos líneas de contacto para la superficie cónica. Éstas proyecciones son llamadas *secantes cónicas* y están definidas para dos *paralelos estándar*. La distorsión de las proyecciones secantes no es la misma para las regiones que se encuentran entre los paralelos estándar que para aquellas que están más allá de ellos. Pueden desarrollarse proyecciones cónicas más complejas en donde el eje del cono no está alineado con el eje polar, en cuyo caso se denominan *oblicuas*.

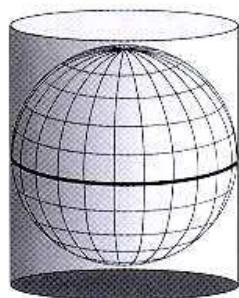


La representación de los parámetros geográficos depende de la separación entre líneas paralelas. Cuando están a igual distancia, la proyección es equidistante en la dirección Norte-Sur pero no es conformal ni área equivalente, como es el caso de la *Proyección Cónica Equidistante*. Para áreas pequeñas, la distorsión total es mínima. En la *Proyección Cónica de Lambert* los paralelos centrales están menos distanciados que los paralelos cercanos a los polos, y formas geográficas pequeñas se mantienen en mapas de escalas grandes y pequeñas. Finalmente, en la *Proyección Área Equivalente de Albers*, los paralelos cerca de los bordes del Sur están menos distanciados que los centrales, y la proyección resultará del tipo área equivalente.

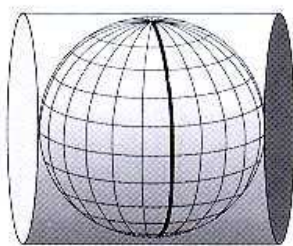
Proyecciones cilíndricas

Las proyecciones cilíndricas también pueden tener una línea de tangencia o dos líneas secantes alrededor del globo. La proyección de Mercator es una de las proyecciones cilíndricas más comunes, y el Ecuador es usualmente su línea de tangencia. Los meridianos son proyectados geoméricamente en la superficie del cilindro, produciendo un ángulo de 90° en las intersecciones con los paralelos. El cilindro puede ser “cortado” a lo largo de un meridiano, y abierto, para producir la proyección cilíndrica final. Los meridianos están equi-distanciados, mientras que el distanciamiento entre los paralelos disminuye hacia los polos. Esta proyección es de tipo conformal y representa direcciones verdaderas a lo largo de líneas rectas.

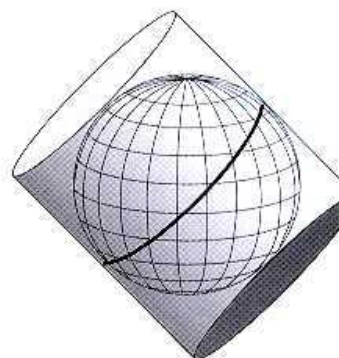
Cuando el cilindro se hace rotar se obtienen proyecciones cilíndricas más complejas, debido a que se cambian las líneas de tangencia o de secante. Proyecciones cilíndricas transversales tales como la *Transversal de Mercator* usan los meridianos, o líneas paralelas a ellos, como líneas de tangencia. Estas líneas corren de Norte a Sur y se representan a escala verdadera. Cilindros oblicuos son obtenidos por rotación a lo largo de un gran círculo sobre el globo localizado en cualquier punto sobre el Ecuador y los meridianos. En estos sistemas complejos, la mayoría de los meridianos y las líneas de latitud no son líneas rectas.



Normal



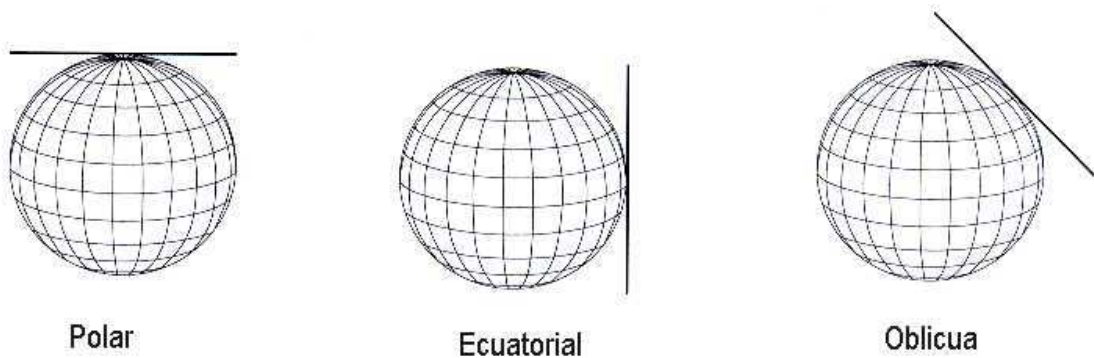
Transversal



En todas las proyecciones cilíndricas, las líneas de tangencia o de secante no tienen distorsión y de esta forma constituyen líneas de equidistancias. Las restantes propiedades geográficas varían dependiendo del tipo específico de proyección.

Proyecciones planas

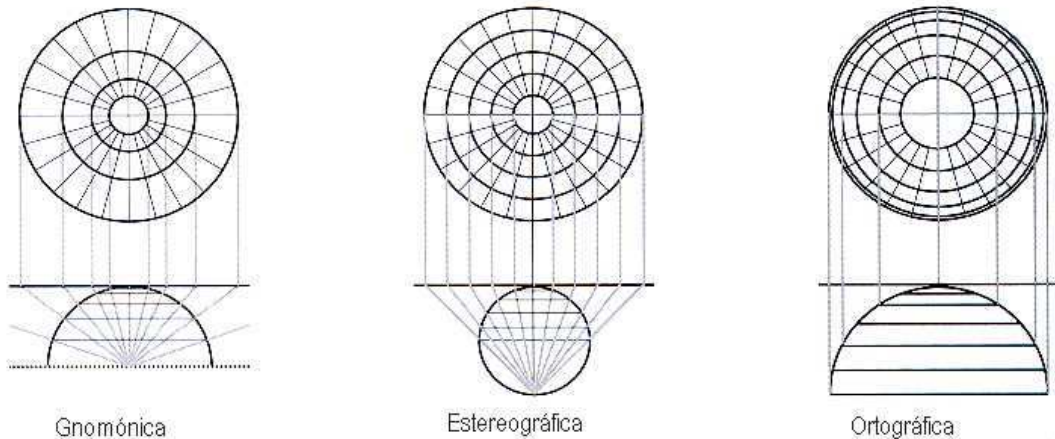
Las proyecciones de este tipo proyectan la información sobre superficies planas que tocan tangencialmente el globo. Una proyección planar es del mismo tipo que las proyecciones acimutales o las proyecciones cenitales. En esta clase de proyecciones se usan planos que son tangentes al globo sólo en un punto, pero también podrían ser de tipo secante. El punto de contacto puede ser el Polo Norte, el Polo Sur, un punto sobre el Ecuador, o algún punto intermedio. Este punto determina el foco de proyección que definirán la orientación y las funciones a utilizar. El foco se identifica por una longitud y latitudes centrales, y las orientaciones posibles son: *polar*, *ecuatorial* y *oblicua*.



Las orientaciones polares son las más sencillas. Los paralelos corresponden a círculos consecutivos a partir de los polos, y los meridianos corresponden a líneas rectas que se interceptan en el Polo con ángulos de intersección verdaderos. Para todas las orientaciones, la proyección planar tiene una grilla con ángulos de intersección rectos (90°) y las direcciones son precisas desde el foco (paralelo de mayor radio). Círculos sobre el globo que pasan por el foco están representadas por líneas rectas, así la distancia más corta entre desde un punto sobre el foco y cualquier otro punto es una línea recta sobre el plano proyectado. Los patrones de distorsión de área y de forma son de tipo circular cerca del foco. Por esta razón, las proyecciones acimutales se acomodan mejor para la representación de regiones polares. Las proyecciones planares son de uso frecuente en la cartografía de las regiones cercanas a los polos.

Algunas proyecciones planares visualizan la información a partir de un punto específico en el espacio. Este *punto de vista* determina el lugar sobre la superficie plana en donde se proyectarán los objetos sobre la superficie esférica. La perspectiva desde la cual todas las posiciones son observadas varía en los diferentes tipos de proyección acimutales. Los puntos de vista o de perspectiva pueden coincidir con el centro de la tierra, un punto sobre la superficie directamente opuesto al punto de tangencia, o a un punto externo, como si estuviera montado sobre un satélite o en otro planeta.

Las proyecciones acimutales son diferenciables entre ellas en parte a la utilización de diferentes focos, y en algunos casos por el punto de perspectiva. La siguiente figura compara tres tipos de proyecciones con orientación polar pero con diferentes puntos de perspectiva. La *Proyección Gnomónica*, proyecta la información desde el centro de la tierra. La *Proyección Estereográfica* proyecta la información desde un Polo hacia su opuesto. Por último, la proyección Ortográfica, proyecta la información desde un punto ubicado a una distancia infinita en el espacio. Observe como el tipo de punto de perspectiva determina la cantidad de distorsión alrededor del Ecuador.



Otras Proyecciones

Los sistemas de proyección presentados hasta ahora pueden, conceptualmente, ser creados proyectando una forma geométrica (una esfera) sobre otra (un cono, cilindro, o plano). Existen muchos otros sistemas que pueden ser relacionados de la forma anterior de forma fácil.

Las proyecciones *Modificadas* son versiones modificadas de algún tipo conocido. Por ejemplo: *Space Oblique Mercator* es una modificación de la Proyección de *Mercator*. Las modificaciones son incluidas para disminuir las distorsiones, y a menudo incluyen *líneas estándar* adicionales o patrones de distorsión diferentes.

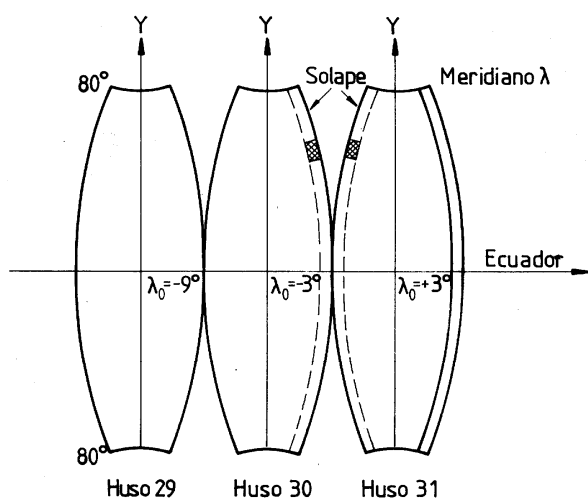
Las *Pseudo-Proyecciones* tienen sólo algunas características de algún tipo de proyección conocido.

Por ejemplo, la *Proyección Sinusoidal* es llamada Proyección Pseudo-cilíndrica debido a que todas las líneas paralelas y meridianas están igualmente espaciadas. Sin embargo, No es una proyección cilíndrica verdadera debido a que todas las líneas de meridianos, excepto la central, son curvas. Lo anterior resulta en una apariencia oval más que rectangular.

4. Universal transversal de Mercator (UTM)

La llamada UTM corresponde a un sistema de proyección cilíndrico transversal, con características de conformal a nivel local. En este sistema el globo se divide en 60 zonas o husos, cada una abarcando 6° de Longitud. Cada zona tiene su meridiano central. Los límites en el eje ordenado se establecen en 84° N y 80° S (ver figura).

En la práctica la UTM es un sistema secante con líneas (meridianos) de distancia verdadera a ambos lados del meridiano central (180 Km a cada lado).



La escala es 0.9996 en el meridiano central y a lo más 1.0004 en los bordes de la zona. Las coordenadas UTM están definidas en metros, y se fija la coordenada X del meridiano central en 500.000 m, y la coordenada del ecuador (eje Y) se fija en 10.000.000 m bajando hacia el Polo Sur (hemisferio sur). Típicamente las coordenadas UTM tienen 6 dígitos en el eje X y 7 dígitos en el eje Y. Por ejemplo, si consideramos el hemisferio sur para el caso de Chile, la coordenada (x, y) = (680.450 m, 5.306.560 m) significa que el punto en cuestión se encuentra 180.450 m al este del meridiano central (x=500.000 m) y 5.306.560 m al sur del Ecuador.

Preguntas:

- a) ¿Qué sistemas de coordenadas proyectadas se usan en Chile?, describa brevemente cada uno de ellos.
- b) ¿Qué husos de la UTM pueden ser usados en Chile?
- d) ¿Por qué es necesario más de un huso?
- d) ¿Cuáles son, en grados, los meridianos centrales de dichos husos?
- e) ¿De Norte a Sur, en qué rango de coordenadas UTM (eje Y) se encuentra Chile?
- f) Para la localidad de Teno, VII Región, ¿A qué distancia se encuentra del meridiano central y del Ecuador? Asuma el huso adecuado.

Referencias

ESRI. 1994. Map Projections. Georeferencing spatial data.

UTM y Coordenadas Geográficas (LAT / LONG) CHILE

En cada Huso la coordenada del Huso central es de 500.000 m

La línea del Ecuador tiene coordenada (Y) 10.000.000. Este eje va disminuyendo hacia el polo Sur.

Coordenadas UTM extremas (eje Y):

8.065.620 N (Borde con Perú)

3.738.099 N (Islas Diego Ramírez)

