

2008

**UNIVERSIDAD NACIONAL
ESCUELA DE CIENCIAS
AMBIENTALES**

PROYECCIONES CARTOGRÁFICAS Y DATUM



Jorge Fallas

Jfallas56@gmail.com

08/04/2008

Índice

Proyecciones cartográficas: Representando el globo terráqueo en dos dimensiones.....	1
Forma y tamaño: Compromiso entre equivalencia y conformalidad	4
Las proyecciones y su clasificación	5
Sistema Universal Transversal de Mercator (UTM).....	6
Direcciones: ubicándonos en la Tierra	7
Georeferenciación	11
Datum clásico (no geocéntrico o local) y geocéntrico	14
Datum geodésico u horizontal	15
Datum vertical.....	15
Proyecciones y datums de Costa Rica.....	17
Proyección Transversal de Mercator para Costa Rica (CRTM05).....	17
Proyección Lambert conforme cónica de Costa Rica.....	18
Proyección Transversal de Mercator para Costa Rica (CRTM98).....	20
Relación espacial entre sistemas de referencia de Costa Rica.....	21
Transformación de coordenadas entre Sistemas de Referencia de Costa Rica.....	21
Bibliografía	23
Anexo 1: ¿Que hace la extensión cr_proy_datum_2008.avx?	25
Anexo 2: Proyecciones y transformación de datum en Costa Rica	25
Anexo 3: Sus mapas en Google Earth.....	26
Anexo 4: Conversión de elevaciones ortométricas (equivalentes al nivel medio del mar) y elevaciones sobre el elipsoide.	26
Anexo 5: Configurando su receptor de posicionamiento global para trabajar con la cartografía de Costa Rica.....	27
Anexo 6: Cartografía digital y estándares horizontales	30

Ingeniería en Ciencias Forestales
 Escuela de Ciencias Ambientales <http://www.edeca.una.ac.cr/>
 Facultad de Ciencias Tierra y Mar <http://www.tierraymar.una.ac.cr/>
 Universidad Nacional <http://www.una.ac.cr/>
 Heredia, Costa Rica
 Teléfono (506) 2 277 3290 • Fax (506) 2 277 32

Proyecciones cartográficas: Representando el globo terráqueo en dos dimensiones

La forma del planeta Tierra puede representarse utilizando un globo o esfera como puede apreciarse en la figura 1. El globo es capaz de mantener las relaciones geométricas entre latitud y longitud, ecuador y polo, continentes y océanos y por lo tanto puede mostrar direcciones, distancias y áreas sin distorsiones. La latitud (paralelos) representa líneas imaginarias que se desplazan desde el Ecuador en sentido Norte y Sur alrededor de la Tierra (Fig.1). Por su misma naturaleza nunca se juntan y por lo tanto la distancia entre líneas de latitud es prácticamente constante (Cuadro1). La longitud (meridianos) representa líneas imaginarias pero orientadas hacia el Este y Oeste que convergen en los polos (Fig. 1). Por esta razón 1° de longitud representa una distancia diferente en el ecuador y en los polos (Cuadro 1).

A pesar de sus ventajas geométricas el globo es poco práctico para estudiar los atributos de la superficie terrestre. Los mapas son más prácticos y versátiles y por esta razón su uso ha prevalecido sobre los globos o esferas en muy diversas aplicaciones. Sin embargo, como veremos, los mapas sacrifican la exactitud geométrica en aras de su practicidad. El reto del cartógrafo es ¿cómo combinar la exactitud geométrica del globo con la versatilidad de los mapas?. Esto se logra a través de las proyecciones cartográficas, tema que discutimos a continuación. La proyección cartográfica permite representar una superficie esférica como la Tierra en una lámina de papel plana (Bugayevskiy y Snyder; 1995; ESRI,1994). Una proyección cartográfica es una representación sistemática de los paralelos y meridianos de

una superficie tridimensional en una superficie bidimensional (Fig.2). Dado que una superficie plana (Ej. lámina de papel) no puede ajustarse a una esfera sin estirarse o encogerse tampoco es posible representar atributos de un globo (Ej. meridianos, paralelos, límites entre países, etc.) en un mapa sin causar distorsiones (Defense Mapping Agency, 1989).

Existen diversas proyecciones y cada una de ellas trata de minimizar las distorsiones. Por ejemplo, el cartógrafo puede diseñar una cuadrícula sobre la superficie terrestre de tal forma que una o más de sus propiedades geométricas se mantengan o de tal forma que las áreas de mayor distorsión se ubiquen en zonas de menor importancia para el uso que se le dará al mapa (Ej. mantener la geometría de los continentes a expensas de la geometría de los océanos).

Las proyecciones que se utilizan en la actualidad se han derivado a partir de modelos matemáticos del globo terrestre y todas ellas comparten la misma característica: mostrar la posición correcta de las líneas de longitud y latitud del Planeta (Fig. 3). En otras palabras, cada proyección es solamente un reordenamiento de los meridianos y paralelos trasladados del Globo Terrestre a un mapa. Dado que no es posible eliminar los errores geométricos cuando se traslada una superficie curva (Tierra) a una superficie plana (mapa) ninguna proyección es geoméricamente perfecta.

En síntesis, cada proyección es desarrollada a partir de una figura geométrica con un propósito particular y por ende tiene sus propias virtudes y limitaciones (Fig. 4.).

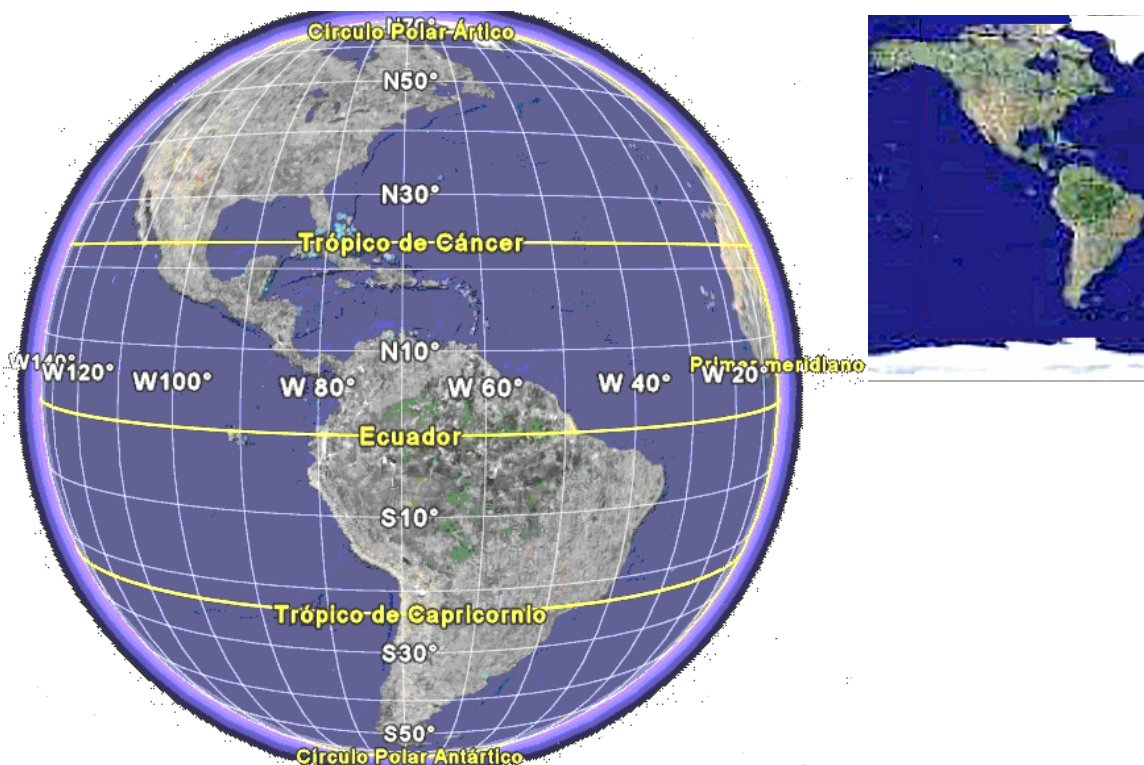
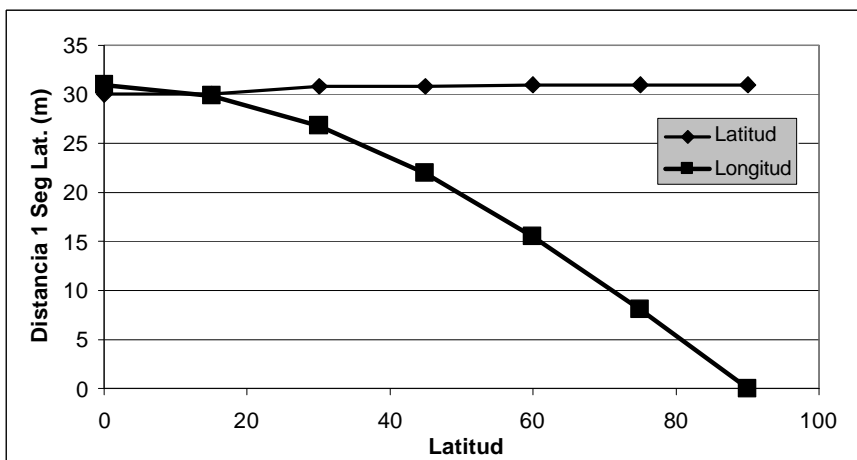


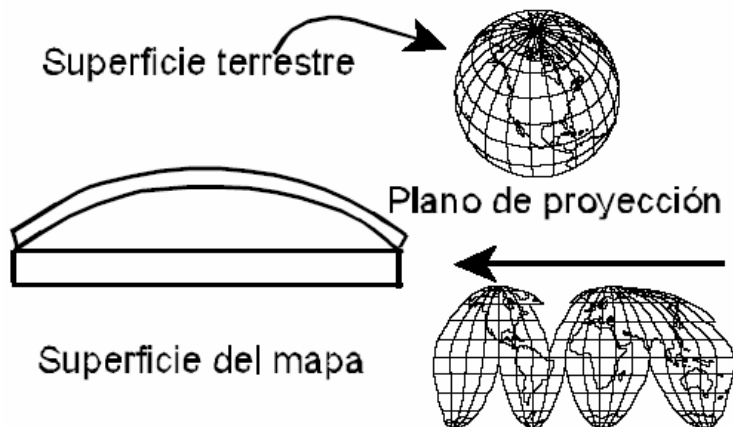
Figura 1.: El Globo terráqueo es un esferoide oblatado. Los paralelos y meridianos nos permiten ubicarnos en la Tierra. Fuente: Basado en Google Earth.

Cuadro 1 : Distancia representada por 1 segundo de latitud y de longitud en la Tierra.

Latitud, Grados	Distancia de 1" de Latitud (m)	Distancia de 1" de Longitud (m)
0	30.071	30.922
15	30.073	29.875
30	30.792	26.803
45	30.869	21.903
60	30.950	15.5
75	31.005	8.028
90	31.027	0.0



El cambio en la distancia representada por un segundo es mínimo en Latitud sin embargo conforme nos alejamos del Ecuador el valor de un segundo de Longitud se reduce hasta llegar a cero en los polos (punto de confluencia de los meridianos).



La proyección cartográfica distorciona el área, la distancia, la forma o la dirección de la superficie terrestre.

Figura 2: El concepto de proyección cartográfica.

¿COMO SE CREA UNA PROYECCIÓN?

Imaginémonos que tenemos un globo transparente con un bombillo en su interior. Sobre el globo dibujamos paralelos, meridianos y la silueta de los continentes. Luego cubrimos el globo con una hoja de papel con forma de cilindro o de cono (Fig.3), encendemos el bombillo y trazamos sobre el papel los meridianos, paralelos y la silueta de los continentes. Finalmente, extendemos el papel y obtenemos de esta manera el mapa proyectado de de la superficie del globo.

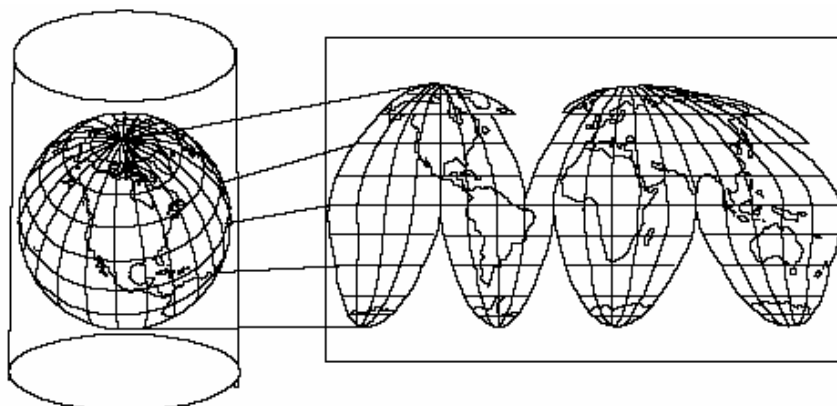


Figura 3: Derivación de una proyección cartográfica a partir de un cilindro.

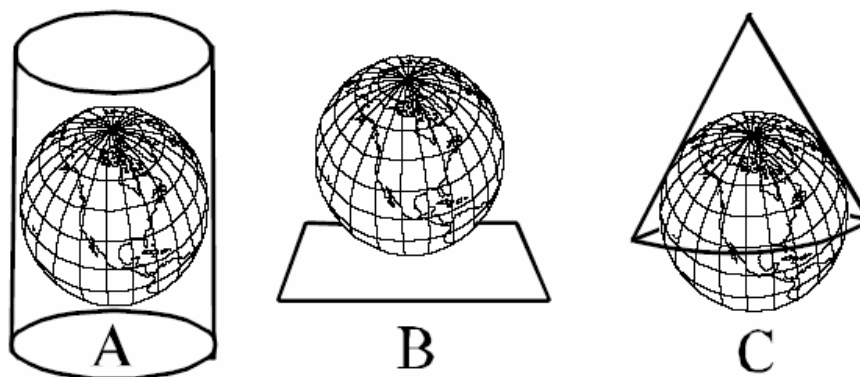


Figura 4 Desarrollo de una proyección cartográfica a partir de un cilindro, un plano y un cono.

Forma y tamaño: Compromiso entre equivalencia y conformalidad

Para proveer una representación correcta de la forma y el tamaño de los objetos en la superficie terrestre el mapa debe mostrar la distancia y la dirección de dichos objetos sin distorsiones (Muehrcke and Muehrcke, 1992). Sin embargo hasta la fecha esto no es posible y las diferentes proyecciones enfatizan uno de los dos atributos: *tamaño* ó *forma* (Bugayevskiy and Snyder, 1995).

Proyecciones equivalentes

Las proyecciones de tipo *equivalente* se caracterizan por su capacidad de mantener una razón constante de superficie a lo largo y ancho del mapa. En otras palabras el tamaño de un objeto en la superficie terrestre no es afectado por su posición en el mapa.

Esta proyección es útil para mostrar la distribución de variables geográficas ya que el tamaño de la superficie es independiente de su posición en el mapa y por lo tanto elimina errores cuando comparamos áreas de diferentes dimensiones en diferentes partes del Planeta. Por ejemplo, en un mapa de una proyección equivalente 1cm² representa la misma área en los Estados Unidos, Argentina, Siberia y Costa Rica. Sin embargo la exactitud en tamaño se logra a expensas de una distorsión en las formas de los objetos o superficies (Fig. 5.).

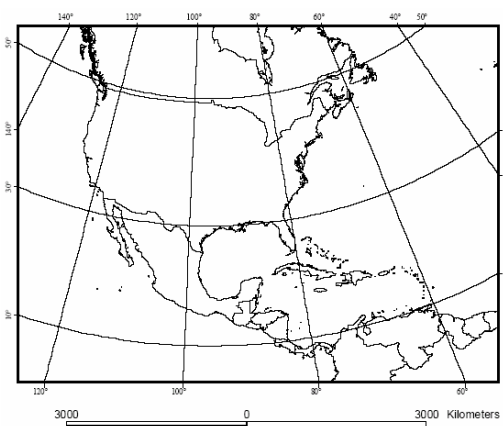


Figura 5: Proyección Albers de igual área

Proyecciones conformes

La proyección conforme se caracteriza por mantener la forma de los objetos o superficies que se muestran en el mapa. En esta proyección las relaciones angulares no son distorsionadas y por lo tanto los objetos o superficies mantienen en el mapa la forma que tienen en la superficie terrestre. Las proyecciones de tipo conforme tienen meridianos y paralelos que se cruzan en ángulo recto, tal y como sucede en el globo terráqueo. La desventaja de las proyecciones de tipo conforme es que distorsionan fuertemente el tamaño de las superficies cartografiadas y como consecuencia la escala no es constante a lo largo y ancho del mapa. Por ejemplo, en un mapa mundi las superficies en altas latitudes se muestran más grandes de lo que realmente son. Por ejemplo, en la proyección de Mercator Groenlandia aparece mucho más grande que África, Australia y América del Sur. Sin embargo en la realidad África es 14 veces más grande que Groenlandia, América del sur 9 veces más grande y Australia 3.5 veces más grande (Fig.6).

Las propiedades de equivalencia y conformidad son mutuamente excluyentes, excepto para mapas de gran escala (Ej. áreas muy pequeñas). En la práctica, los mapas se hacen utilizando una de las dos propiedades.

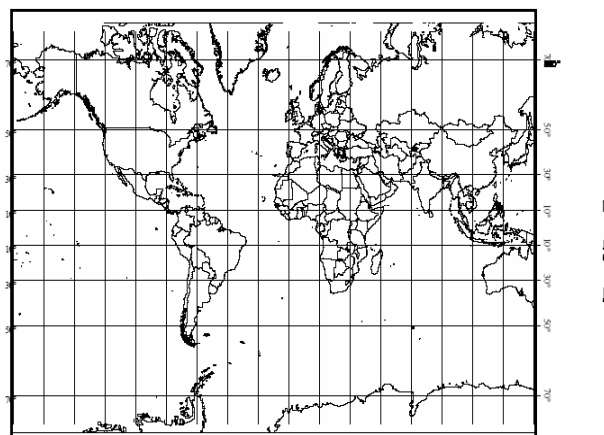


Figura 6: Proyección de Mercator.

Las proyecciones y su clasificación

Aun cuando existen más de mil proyecciones diferentes en el mundo, la gran mayoría pueden agruparse en unas cuantas familias basadas en su derivación (Cuadro 2). Las proyecciones de una misma familia comparten las mismas distorsiones y propiedades. A continuación presentamos cuatro de las familias de proyecciones más comunes (Robinson and Morrizon, 1978).

Cuadro 2: Algunas familias de proyecciones. Basado en McKnight, 1984.

CILÍNDRICA

Mercator, Cilíndrica de perspectiva central, Lambert cilíndrica de igual área, Equirectangular

CÓNICA

Cónica simple, Lambert conforme cónica Policónica, Albert cónica de igual área

ELIPTICA

Sinusoidal, Mollweide, Denayer Semielíptica

AZIMUTAL (PLANA)

Ortográfica, Estereográfica, Lambert de igual área

Proyecciones elípticas u ovals

Las proyecciones **elípticas** u **ovales** son representadas por un conjunto de proyecciones con forma de balón de

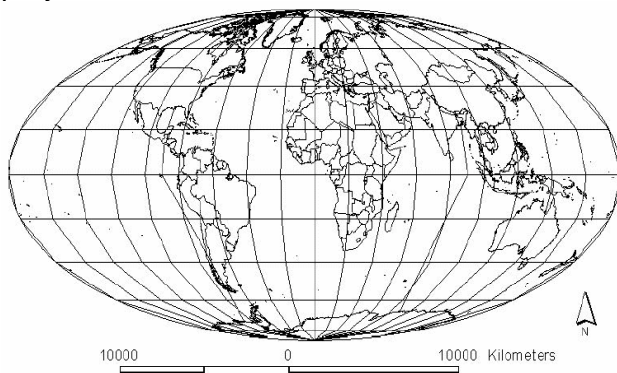


Figura 7: Proyección de Mollweide.

balompié (Fig. 7). Con frecuencia en estas proyecciones un paralelo central (normalmente el ecuador) y un meridiano central (normalmente del meridiano principal) se cruzan en ángulo recto en el centro del mapa, el cual representa un punto de no distorsión. Las distorsiones en estas proyecciones aumentan conforme nos acercamos al margen del mapa. Los paralelos mantienen sus propiedades geométricas sin embargo los meridianos se transforman en curvas (excepto en el meridiano central).

Proyecciones acimutales

Las proyecciones **acimutales** también conocidas como **planas** o cenitales son derivadas a partir de una grilla o cuadrícula geográfica del Globo expresada como un plano que es tangente en algún punto a dicho Globo (Fig. 8). Teóricamente el punto de tangencia puede ser cualquier punto en el Planeta, sin embargo con frecuencia se utiliza para tal fin el Polo Norte, el Polo Sur ó algún punto en el Ecuador. La proyección mantiene sus propiedades geométricas alrededor del punto de tangencia y las distorsiones aumentan conforme nos alejamos de su punto de origen. En esta proyección sólo es posible mostrar un hemisferio.

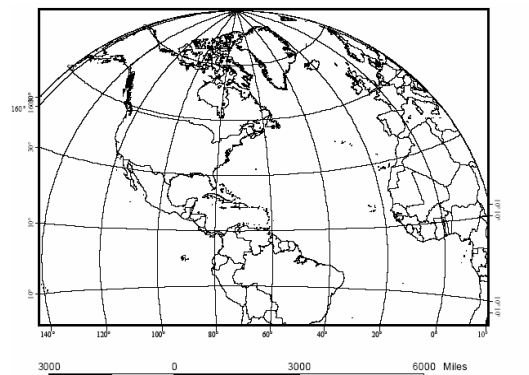


Figura 8: Proyección equidistante azimutal.

Proyecciones cónicas

En esta familia de proyecciones uno o más conos son ubicados tangentes a ó de tal forma que intersepen una porción del Globo y la cuadrícula geográfica es proyectada en dicho cono(s) (Fig. 9). Normalmente el ápice (ápex) del cono es ubicado sobre uno de los polos de tal forma que el círculo de tangencia coincida con uno de los paralelos, el cual se convierte en el **paralelo estándar** de la proyección. Las distorsiones son mínimas en los alrededores del paralelo estándar y aumentan conforme nos alejamos de dicho paralelo. Por las características de la proyección sólo se puede cartografiar un semi hemisferio o sea una cuarta parte de la Tierra. La proyección es especialmente apropiada para cartografiar áreas pequeñas (Ej. Costa Rica).

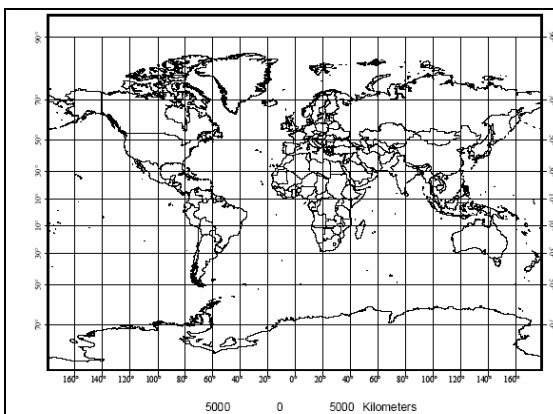


Figura 9: Proyección Lambert conforme cónica.

Proyecciones cilíndricas

La proyección cilíndrica se deriva al proyectar el globo terráqueo en un papel con forma de cilindro que es tangente a, o que se intercepta con dicho globo (Fig. 10). La mayoría de las proyecciones cilíndricas se derivan de tal forma que el cilindro toque al globo en el ecuador (punto de tangencia). En un mapa rectangular los meridianos y los paralelos se cruzan en ángulo recto y no existe distorsión en el punto de tangencia con el globo. Las distorsiones aumentan conforme nos alejamos de dicha línea. La proyección de Mercator es un buen ejemplo de estas distorsiones. Las proyecciones cilíndricas son utilizadas para mapas mundi.

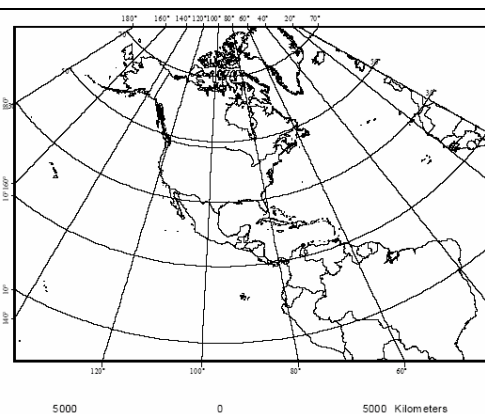


Figura 10: Proyección de Miller.

Sistema Universal Transversal de Mercator (UTM)

Esta no es una proyección en sí misma sino más bien un sistema de coordenadas planas basado en la proyección Transversal de Mercator. Meridianos centrales son establecidos cada 6° de longitud en el ámbito 84° norte y -80° sur. Esto define 60 zonas que se extienden 3° de longitud a ambos lados del meridiano central. Cada zona es designada con una letra del alfabeto, etiquetando de sur a norte. Por ejemplo, Costa Rica se encuentra entre las zonas 16P y 17P (Fig.11).

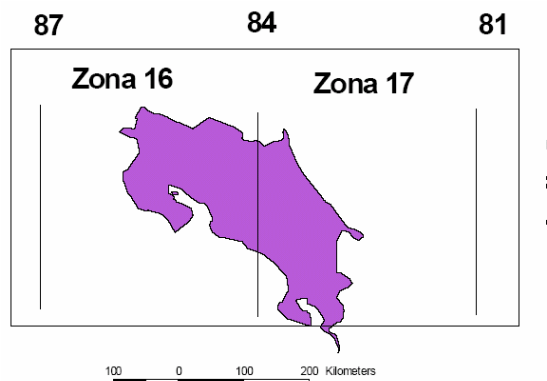


Figura 11: Sistema Universal Transversal de Mercator (UTM). Costa Rica está ubicada entre las Zonas 16 y 17.

Las propiedades del sistema son (ESRI, 1994; Defense Mapping Agency, 1989):

Forma: Es conforme y por lo tanto representa con exactitud áreas pequeñas. La distorsión de áreas grandes es mínima en cada zona.

Área: La distorsión es mínima en cada zona.

Dirección: Ángulos locales son verdaderos.

Distancia: La escala es constante a lo largo del meridiano central. Se aplica un factor de escala de 0.9996 para reducir la distorsión lateral dentro de cada zona. Este factor de escala permite que las líneas ubicadas a 180Km hacia el este o el oeste y paralelas al meridiano central tengan un factor de escala de 1.

En cada zona se sobrepone un cuadrículado rectangular y las coordenadas se expresan en metros con respecto al Ecuador y al este de un eje de referencia. Para reducir la distorsión en la escala se aplica un factor de corrección de 0,9996 a lo largo del meridiano central de cada zona.

Para determinar posiciones en el Hemisferio Norte se le asigna al meridiano central un falso este de 500.000 metros (para mantener valores positivos en la zona) y un falso norte de 0. Para mediciones en el Hemisferio Sur se asigna un falso este de 500.000 metros y un falso norte de 10.000.000 de metros. Las coordenadas este, norte y el número de zona definen la posición de cualquier punto en la superficie terrestre en el sistema UTM. Las zonas polares no son consideradas por el sistema UTM.

Utilice la siguiente fórmula para determinar el límite este de cualquier zona UTM: $(\text{zona} * 6) - 180$. Para obtener el límite oeste de la Zona, reste al valor anterior 6 grados.

Límite este de la zona 17

$$\text{Zona 17} = (17 * 6) - 180 = -78 \text{ grados}$$

Límite este de la zona 16

$$\text{Zona 16} = (16 * 6) - 180 = -84 \text{ grados}$$

En Costa Rica no se utiliza el sistema UTM; sin embargo si usted desea proyectar mapas de Lambert a UTM recuerde que cada sistema utiliza un datum diferente y por lo tanto el cambio de proyección implica también una transformación de datum. El proceso de transformación involucra usualmente convertir primero sus datos a latitud, longitud; cambiar de datum y luego proyectarlos a UTM.

Direcciones: ubicándonos en la Tierra

Para dibujar en un mapa ó un plano la posición de elementos ubicados sobre la superficie de la Tierra es necesario utilizar un sistema de referencia o de coordenadas. Una vez ubicados dos o más elementos en dicho sistema es posible navegar entre ellos utilizando distancias y acimutes (ángulo medido desde el punto cardinal norte en sentido horario de 0° a 360°). Por ejemplo, en el Sistemas Estándar Tico (SETico) una dirección se brindaría de la siguiente manera: “de la iglesia de la Merced, 200 metros norte y 100 al oeste”. Sin embargo otra persona le podría brindar la misma dirección utilizando como punto de referencia el Parque Central. Para evitar este uso “personalizado” del sistema de referencia es necesario crear un sistema único o común. La cartografía oficial de un país cumple esta función. Utilizando dicha cartografía todos utilizaríamos el mismo sistema de referencia.

Las direcciones en la Tierra son arbitrarias (el globo terráqueo no tiene inicio ni fin ni arriba ni abajo). Sin embargo para ubicarnos se utiliza la siguiente convención: la dirección norte-sur es representada por un meridiano y la dirección este-oeste por un paralelo. Esto permite crear una graticula con líneas perpendiculares entre sí, excepto en los polos. Al desplazarnos de un punto a

otro se pueden utilizar las siguientes direcciones:

Dirección geográfica o verdadera: es la dirección medida con respecto al polo norte. El norte-sur y el este-oeste son verdaderos.

Dirección de cuadrícula: Es la dirección medida con respecto a la cuadrícula orientada al norte de un mapa proyectado.

Dirección magnética: Es la dirección medida con respecto a la ubicación del polo norte magnético. Con frecuencia se cree que la aguja de la brújula apunta directamente hacia el norte magnético; sin embargo esto es cierto sólo en términos generales. La dirección norte de la brújula variará de localidad en localidad y por tanto la línea que une su posición con la del Polo Norte magnético no es una recta sino más bien una línea con ondulaciones. El norte magnético no es un punto en el Polo Norte, sino más bien un área en la cual se desplaza la ubicación del polo norte magnético. La diferencia entre el norte magnético y el norte verdadero es de aproximadamente 11 grados en los polos. Según el Servicio Geológico de Canadá, el Polo Norte Magnético se ha desplazado a una velocidad de aproximadamente 41km al noroeste entre 2001 y 2005. (<http://gsc.nrcan.gc.ca/>) (Fig. 12).

Las hojas topográfica de Costa Rica muestran en su parte inferior un diagrama que ilustra la ubicación del norte de cuadrícula (NC), el norte magnético (bandera) y el norte geográfico o verdadero (estrella). El ángulo entre el norte magnético y el norte verdadero se denomina declinación magnética (Fig. 13). Utilizando este diagrama es posible convertir un acimut entre los diferentes nortes (Fig. 14).

Acimut. El acimut es la desviación angular horizontal (0-360°) de una línea medida en el sentido de las agujas del reloj con respecto a una línea que representa el norte (Fig. 15 y 16). El cuadro 2 muestra algunos acimutes de uso frecuente al brindar

direcciones. Si usted tiene ArcView GIS puede utilizar las siguientes extensiones para determinar el acimut en sus mapas proyectados: Line Direction Tool, v. 2.1 (line_dir.avx) y Shape Geometry (SG10.avx), <http://arcscripts.esri.com/>

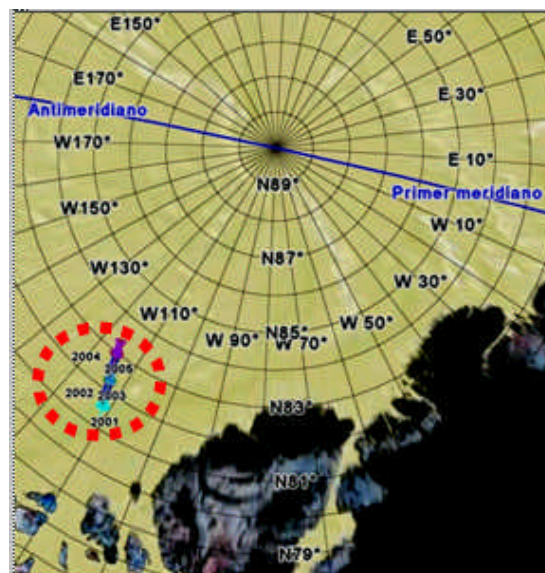
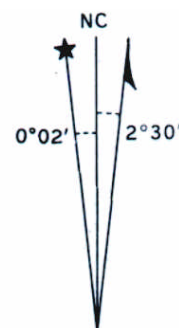


Figura 12: Ubicación del Polo Norte magnético entre 2001 y 2005. Fuente: Basado en datos de Canadian Geologic Survey. <http://gsc.nrcan.gc.ca/>



DECLINACION MEDIA APROXIMADA. AL DE ENERO DE 1989. PARA EL CENTRO DE LA HOJA VARIACION MAGNETICA ANUAL 7' AL OESTE

Use el diagrama únicamente para obtener los valores numéricos. Para determinar la línea del Norte magnético, únase el punto "P" de rotación, trazado en el margen Sur del mapa, con el valor del ángulo entre el NORTE DE CUADRICULA y el NORTE MAGNETICO consignado en grados en la escala que aparece en el margen Norte del mapa.

Figura 13: El diagrama de declinación muestra la diferencia entre norte magnético (bandera), norte verdadero (estrella) y norte de cuadrícula (NC). Hoja Abra (hoja 3345 I, edición 3 de 1989). IGN-CR.

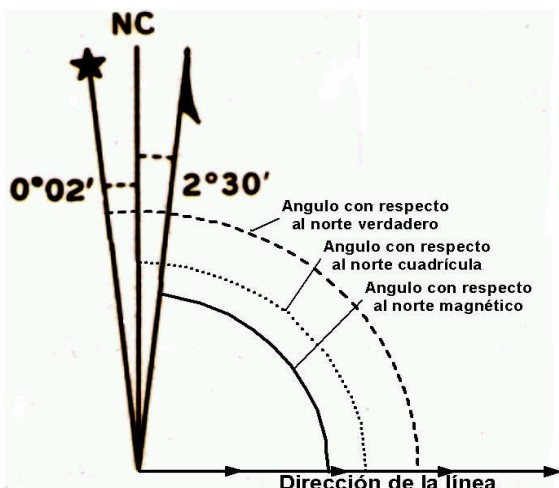


Figura 14: Relación entre norte de cuadrícula, magnético y verdadero para la hoja Abra (hoja 3345 I, edición 3 de 1989). IGN-CR.

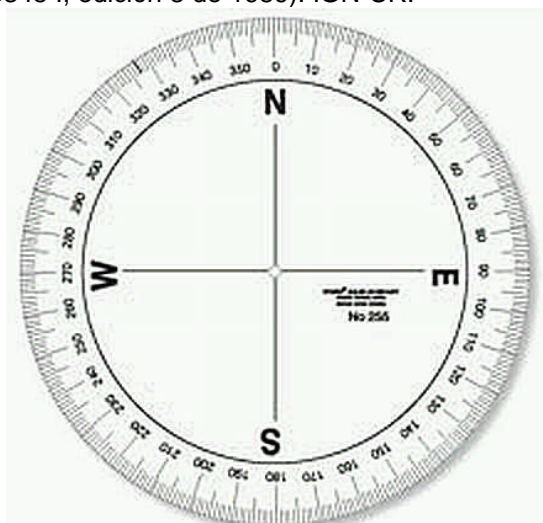


Figura 15: Compás o rosa de los vientos. El círculo se divide en 360 grados, cada grado tiene 60 minutos y cada minuto tiene 60 segundos. El acimut es cualquier lectura realizada con respecto al Norte (0°).

Cuadro 2 : Acimutes de uso frecuente.

Desde el Norte			
Norte	0° ó 360°	Sur	180°
Noreste	45°	Suroeste	225°
Este	90°	Oeste	270°
Sureste	135°	Noroeste	315°

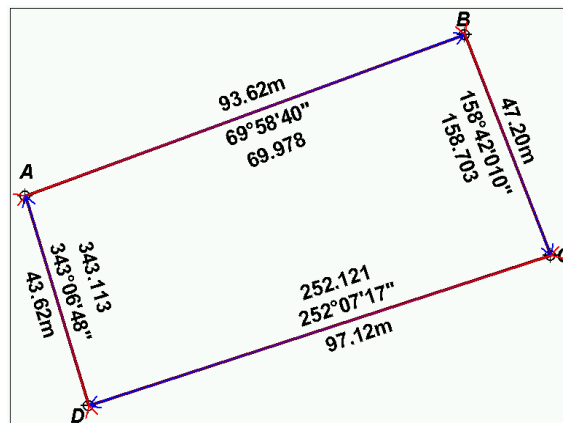


Figura 16: Medición de acimut elipsoidal proyectado y distancia. La poligonal se desplaza de A-B, B-C, C-D y D-E. Valores en grados, minutos, segundos y grados decimales.

Rumbo:

El rumbo es otra medición angular que se realiza con la brújula y al igual que en el acimut las lecturas se expresan como grados horizontales. Sin embargo se diferencian del acimut en que los ángulos no utilizan los 360° del círculo sino que se restringen a cuadrantes de 0-90°.

El rumbo puede medirse en el sentido de las manecillas del reloj (hacia el este) o en dirección inversa (hacia el oeste) con respecto a la línea sur ó norte de referencia. La medición se hace con respecto a la línea norte-sur más cerca a la línea de medición. Toda lectura de rumbo incluye la dirección angular, la dirección de la línea (norte-sur) y una orientación (este-oeste) (Fig. 17) como se ilustra a continuación: N45°E (noreste), S45°E (sureste), S45°W (suroeste), N45°W (noroeste). Si usted tiene ArcView GIS puede utilizar las siguientes extensiones para determinar el rumbo en sus mapas proyectados: Bearing (Bearing.avx) y reversecogo (reversecogo.avx).

<http://arcscripts.esri.com/>.

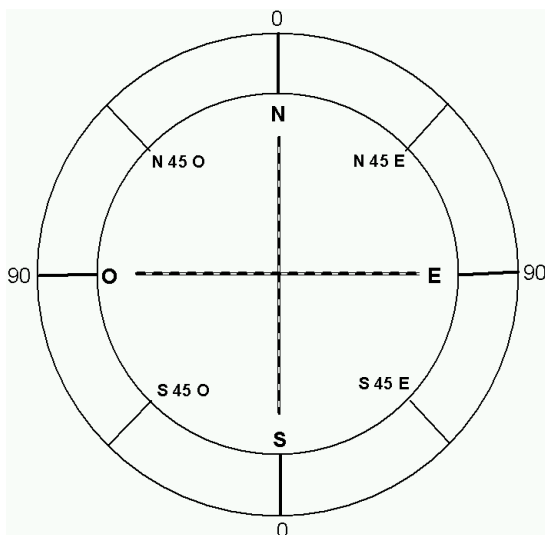


Figura 17: Rumbos.

Brújula: medición de acimutes y rumbos

La brújula es un instrumento de navegación utilizado para medir acimutes y rumbos en la Tierra. Este aparato, posiblemente inventado en China alrededor de 1044 (Fig.18), posee una aguja magnetizada que apunta al norte magnético de la Tierra (Fig. 19). Técnicamente apunta al componente horizontal del norte magnético y por lo tanto la dirección norte de la brújula variará de localidad en localidad. Sin embargo cuando se utiliza para navegar en espacios reducidos y con fines de orientación esta variación no es crítica para el usuario(a).



Figura 18: Modelo primitivo de instrumento que apuntaba al sur de la dinastía Han, China (206 BC – 220 AD). Fuente: http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Model_Si_Nan_of_Han_Dynasty.jpg



Figura 19: Brújulas. El instrumento superior permite medir direcciones (acimut-rumbo) con una precisión de 0.25 grados (15 minutos).

En la actualidad también pueden adquirirse brújulas electrónicas, las cuales determinan la ubicación del norte magnético sin utilizar partes móviles. Algunos receptores del Sistema de Posicionamiento Global Satelital (GPS, por sus siglas en Inglés) poseen una brújula electrónica. Sin

embargo los usuarios de dichos receptores deben tener cuidado ya que no todos los receptores tienen esta capacidad; y en aquellos que la tienen es necesario calibrar el aparato antes de utilizarlo para medir acimutes y rumbos. En la mayoría de los receptores la pantalla de la rosa de los vientos no está orientada al norte magnético.

Georeferenciación

La **georeferenciación** es el proceso matemático utilizado para relacionar la posición de un objeto o superficie en un plano (analógico, raster ó vectorial) con su posición homologa en la superficie terrestre. Para georeferenciar un objeto es necesario definir un datum geodésico. La geodesia es la rama de la ciencia que estudia lo referente a la medición del tamaño, forma y posición de los objetos en la superficie de la Tierra. La medición de distancia es afectada por la irregularidad de la superficie terrestre y por lo tanto es necesario definir una superficie de referencia sobre la cual se harán las mediciones. La localización (posición de los objetos en la Tierra) es una función de distancias y direcciones con respecto a un sistema de referencia. De no contarse con una superficie de referencia tanto las distancias como los acimutes serían ambiguos (Fig. 20).



Figura 20: El concepto de distancia y dirección en la tierra. La distancia entre los puntos A y B es diferente de la distancia entre los puntos C y D. La diferencia en distancias es el efecto de la irregularidad del terreno.

Para solucionar el problema de la irregularidad de la superficie terrestre se utilizó inicialmente el **geoide** como superficie de referencia. Para fines prácticos podemos definir el geoide como una figura geométrica que representa el nivel medio del mar en la superficie terrestre si el agua pudiera fluir bajo los continentes (Fig. 21). Técnicamente se define como una superficie donde la dirección de la gravedad (**g**) es perpendicular en todos los lugares y que corresponde a la gravedad del nivel medio del mar.

El movimiento de rotación de la Tierra produce dos fuerzas opuestas: la centrífuga y la centrípeta. Estas fuerzas a su vez modifican la forma del geoide, el cual es ligeramente abultado en el ecuador y ligeramente achatado en los polos (diámetro de la Tierra en el ecuador es 12757Km en tanto que el diámetro polar es 12714Km).

La superficie del geoide es irregular debido a la distribución no uniforme de la masa terrestre y por tanto no coincide con la figura del elipsoide. La separación entre estas dos figuras se denomina ondulaciones del geoide, elevaciones del geoide o simplemente separación del geoide (Fig. 21 y 23).

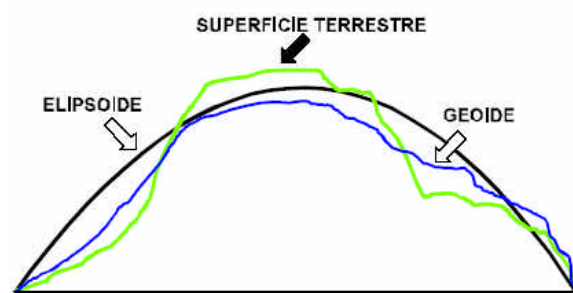


Figura 21: El geoide y el elipsoide: modelos de la forma de la Tierra.

La ventaja del geoide como superficie de referencia es que puede interpretarse en función de leyes físicas y además puede observarse en las costas (nivel medio del mar). Una desventaja del geoide es que es ligeramente irregular como resultado de los

diferentes materiales conforman la Tierra (Ej. montañas, desbalances isostáticos, materiales de mayor densidad en el fondo de los océanos, etc., Fig.23). Esto introduce ambigüedades en la medición de distancias y por lo tanto en la localización de objetos en la superficie terrestre.

Elipsoide de referencia

Debido a las irregularidades propias del geode en la cartografía se utiliza una superficie de referencia abstracta que aproxime la forma del geode pero sin sus irregularidades; esta figura se denomina **elipsoide** (Fig. 22). La ventaja del elipsoide es que su forma es independiente del material que forma la tierra y por lo tanto es una superficie sin irregularidades que puede definirse utilizando ecuaciones matemáticas. Al eliminarse las irregularidades también eliminamos los problemas de ambigüedad en la medición de distancias. Actualmente existen una gran cantidad de elipsoides en uso y cada uno de ellos responde a condiciones específicas de la zona para la cual fue diseñado. La existencia de múltiples elipsoides es un indicativo de que sólo son una aproximación al geode y que por lo tanto no representan con igual exactitud a todos los puntos sobre la superficie terrestre. Cada elipsoide está definido por (Fig. 22):

- Longitud de sus semi-ejes mayor (a) y menor (b) ó,
- Longitud de su semi-eje mayor y su factor de achatamiento $f = (a-b)/a$.

En donde **a** es el semieje mayor o ecuatorial y **b** el semi-eje menor o polar; el factor de achatamiento se expresa normalmente como $1/f$.

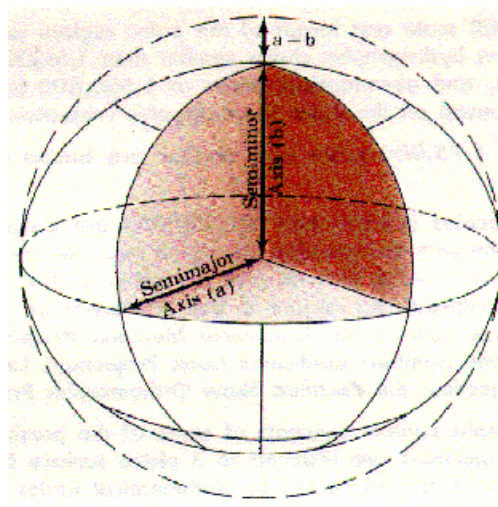


Figura 22: El elipsoide y sus semi-ejes mayor (a) y menor (b).

El ángulo entre la línea de una plomada perpendicular al geode y la perpendicular al elipsoide se denomina deflexión de la vertical (Fig.24).

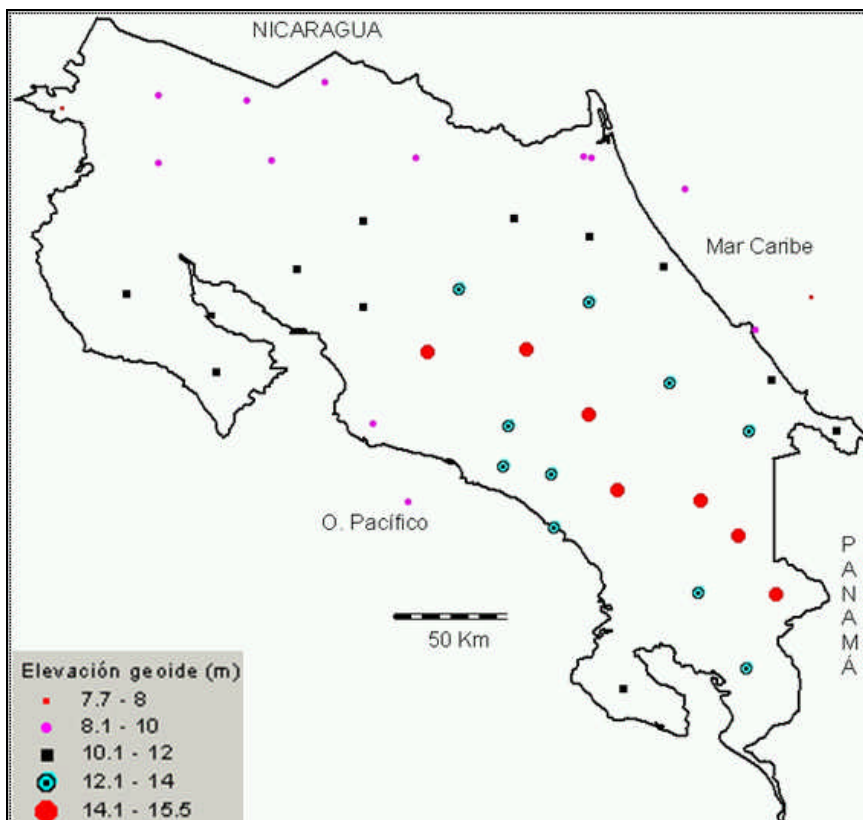


Figura 23: Altura sobre el geoida calculadas por el programa "Geoid Height Calculator" utilizando el modelo NGA EGM96 y WGS84.

<http://sps.unavco.org/geoid/>

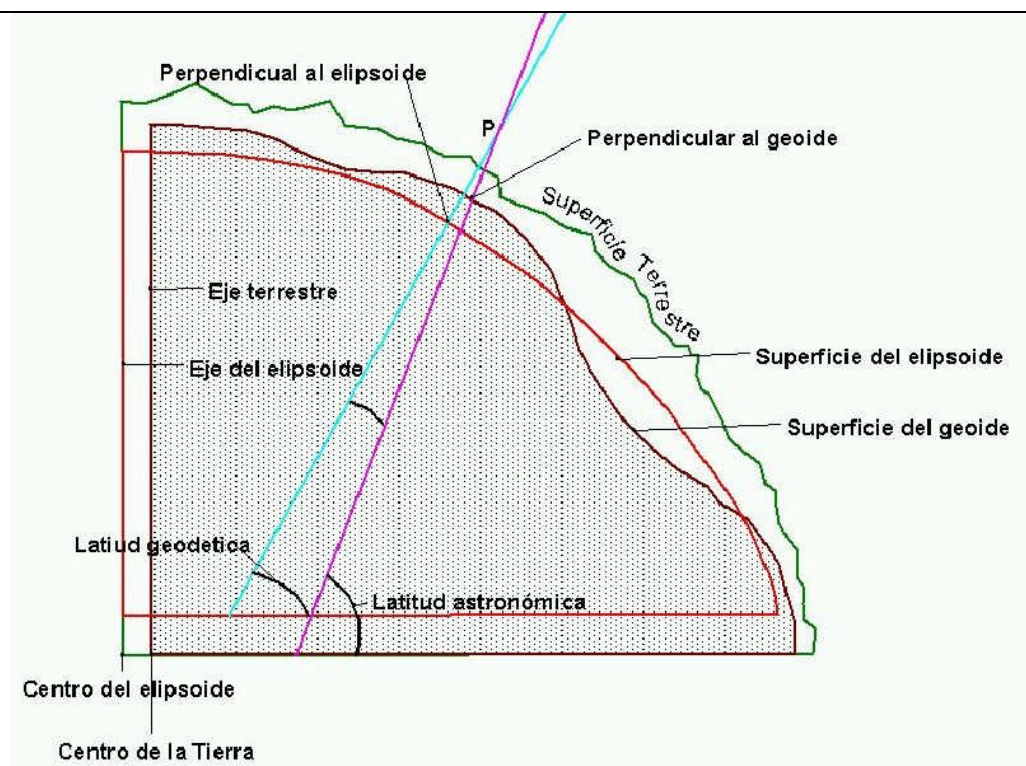


Figura 24: El ángulo entre la línea de una plomada perpendicular al geoida y la perpendicular al elipsoide se denomina deflexión de la vertical. Fuente: DMA TR 80-003, 1984.

Datum clásico (no geocéntrico o local) y geocéntrico

El datum es una cantidad geométrica o numérica ó un conjunto de dichas cantidades que se utilizan como referencia o base para otras cantidades (DMA TR 80003, 1984). Por ejemplo, la medición de coordenadas geodésicas y el posterior cálculo de redes de triangulación se sustentan en la definición previa del datum horizontal que considera la curvatura de la Tierra y del datum vertical. El primero sirve como un referente horizontal y el segundo como un referente vertical.

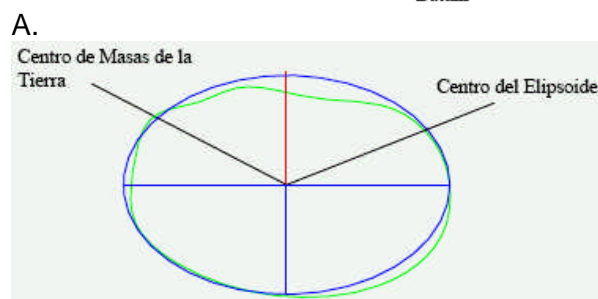
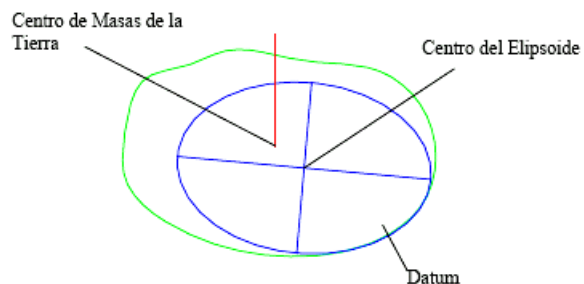
EL datum no geocéntrico está definido por (DMA TR 80-003, 1984) (Fig. 25):

- Valores de longitud y latitud de un punto inicial o de origen (usualmente la estación central en la red de triangulación),
- Un azimut (dirección) de la línea que conecta el punto inicial con otra estación en la red de triangulación,
- El radio y factor de achatamiento del elipsoide seleccionado, y
- La separación entre el elipsoide y el geoide en el punto de origen.

Una vez definido un sistema geodésico de referencia es posible calcular con exactitud posiciones y relacionarlas entre sí (Ej. calculo distancias, direcciones). Por esta razón cualquier cambio en los parámetros del datum horizontal afectará la posición de los puntos en dicho sistema.

Algunos datums de uso común son el NAD27 (North American Datum de 1927), el cual es utilizado en la cartografía de América Central (exceptuando Costa Rica) y su nueva versión NAD83 (North American Datum de 1983), utilizado en los Estados Unidos y el WGS84 (World Geodetic Datum de 1984), el cual es válido para cualquier posición en el planeta Tierra.

El datum geocéntrico satelital no está asociado a un punto particular sobre la superficie de la Tierra sino que es paralelo al eje medio de rotación de la Tierra. Es un sistema de referencia inercial y su punto de referencia es el centro de masa de la Tierra. La precisión de las mediciones obtenidas con métodos de posicionamiento satelital son muy superiores a las obtenidas por los métodos clásicos de la geodesia.



B.
Figura 25: A. Datum no geocéntrico o local y B. datum geocéntrico.

Discrepancia entre dos Datums

Un país puede contar con cartografía basada en diferentes datums. Las mediciones y cálculos realizados en cada uno de ellos son válidas y confiables; sin embargo no es posible combinarlas directamente. Por ejemplo, no es posible registrar datos en WGS84, proyectarlos a Lambert Norte y utilizarlos con la cartografía Lambert de Costa Rica cuyo datum es Ocotepique.

Dada una posición (lat,long) y dos datums, la discrepancia en posición entre los dos sets de datos dependerá de diversos factores tales como el elipsoide utilizado, la diferencia en la orientación del punto central de cada elipsoide con

respecto al centro de la Tierra, diferencias en escala del control horizontal y la rotación relativa entre los sistema debido a los errores de deflexión en los valores de azimut (Fig. 26) (DMA Technical Manual TR80003B).

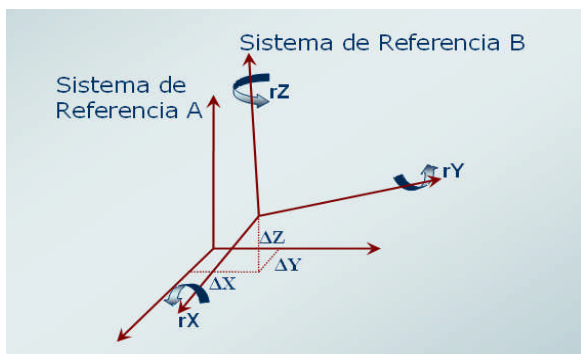


Figura 26: Discrepancia entre Datum A y B.

Datum geodésico u horizontal

El datum geodésico u horizontal es un conjunto de al menos cinco mediciones que definen la posición (dos elementos), la orientación de la red (un elemento) y los parámetros del elipsoide de referencia (DMA TR 80003, 1984; National Geospatial Intelligence). Por lo tanto el datum define los siguientes aspectos del sistema de referencia de la cartografía:

- Elipsoide
- La ubicación (posición inicial) y orientación del norte (acimut inicial) y
- La distancia entre el geoide y el elipsoide en la ubicación inicial.

El Sistema Geodésico Mundial (WGS, por sus siglas en Inglés) no está referido a un datum puntual particular sino que representa un elipsoide cuya ubicación, orientación y dimensiones se ajusta mejor a la superficie equipotencial de la Tierra, la cual coincide con el geoide. Existen varios elipsoides asociados al WGS (Ej. WGS60, WGS66, WGS72, WGS84), de los cuales el WGS84 es el que se utiliza en la actualidad (National Geospatial Intelligence). El sistema provee un marco de referencia mundial, el cual permite relacionar la

posición en puntos ubicados en cualquier parte del planeta Tierra.

El método más simple para transformar coordenadas de un datum local a WGS84 y viceversa es utilizar las constantes de transformación de Molodenskiy (delta X, delta Y, delta Z, delta a, y delta f). Un método más elaborado y preciso es el uso de la transformación de 7 parámetros de Helmert o Bursa-Wolf (National Geospatial Intelligence).

Datum vertical

Existen diversas técnicas e instrumentos para medir la elevación de un punto sobre la superficie terrestre y por lo tanto es posible que cada uno de ellos brinde un resultado diferente. Es muy probable que aunque los mapas del IGN-CR indiquen que la altura está medida con respecto al nivel medio del mar (msnm), los equipos de medición no siempre brindarán los mismos resultados.

Por ejemplo, usted se encuentra muestreando arena en la playa de Puntarenas y decide utilizar su receptor de GPS submétrico para determinar la altura de su sitio de muestreo. Después de varios minutos de promediar su posición en 3D el aparato le indica que la elevación es -10 m.

Obviamente usted no se encuentra sumergido en el océano y su mapa topográfico le indica que la elevación debe ser cerca de 0 metros. ¿Qué está pasando?. Una posible respuesta es que su aparato está dañado; otra que requiera de mayor tiempo para promediar su estimación de altura y la tercera que el receptor está calculando la elevación utilizando un nivel cero diferente al utilizada por el mapa.

En el ejemplo anterior, es posible que la diferencia en altura pueda explicarse por las diferencias entre la superficie topográfica, la superficie elipsoidal y altura sobre el geoide (Fig. 27). El receptor de GPS normalmente calcula la elevación sobre el elipsoide.

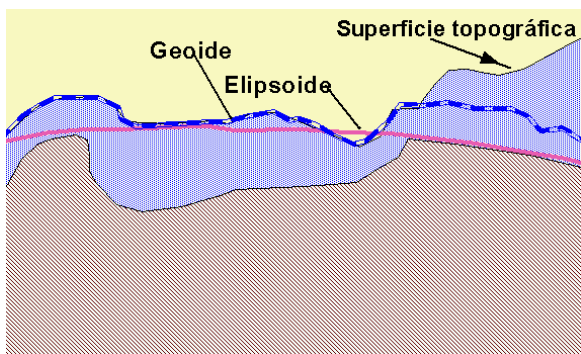


Figura 27: Datum vertical: referencia para la medición de elevación. Elipsoide (modelo geométrico), Geoide (modelo físico) aproximado por el nivel medio del mar.

La **superficie topográfica** (Fig. 28) es la que usted puede visualizar sobre la superficie de la Tierra (Ej. montañas, valles, cañadas, riscos, etc.). Dado que esta superficie es muy compleja, la representación de posiciones en un mapa se hace seleccionando una superficie más simple denominada **elipsoide**; el cual es un modelo matemático que representa el tamaño y forma de la Tierra (ver figs. 21 y 22).



Figura 28: Superficie topográfica.

La superficie del geoide está definida por la fuerza de gravedad de la Tierra; sin embargo en los mapas es aproximada por el nivel medio del mar. Diferentes aplicaciones pueden utilizar diferentes niveles de referencia (nivel cero) para medir la elevación. Por ejemplo, un receptor de GPS utiliza el elipsoide, el geoide y el centro de la Tierra para estimar la altura media sobre el

nivel del mar. La relación entre las diferentes estimaciones de altura se muestra en la figura 29 (<http://earth-info.nga.mil/>).

- **Nivel medio del mar (H):** Elevación aproximadamente equivalente a la altura ortométrica (H) y técnicamente corresponde a la altura con respecto al geoide.
- **Altura sobre el geoide (N):** es la diferencia entre la altura del elipsoide y el geoide. Su valor puede ser negativo ó positivo.
- **Altura sobre el elipsoide (h):** es la distancia vertical sobre o por debajo del elipsoide de referencia utilizado en la cartografía.

La relación entre las tres elevaciones es la siguiente:

$$h + \text{Error}_h = (H + \text{Error}_H) + (N + \text{Error}_N)$$

en donde Error indica el sesgo asociado a la estimación de cada componente.

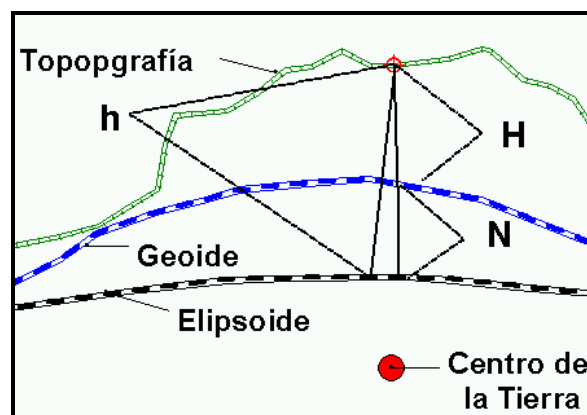


Figura 29: Relación entre altura ortométrica (sobre el nivel medio del mar), altura sobre el elipsoide (aproximadamente N+H) y altura sobre el Geoide.

¿Cuan precisa es la estimación nivel medio del mar?

Si usted observa los mapas del Instituto Geográfico Nacional de Costa Rica notará en su parte inferior una leyenda que dice "cotas referidas al nivel medio del mar". Sin embargo ¿qué significa eso exactamente?.

En el caso de Costa Rica se refiere al nivel medio del mar determinado por técnicas de topografía convencionales y fundamentado en observaciones mareográficas entre 1940 y 1960 (Gobierno de Costa Rica, 2007).

Debido a las diferencias en gravedad, el geode presenta ondulaciones parecidas a la topografía de la tierra; aunque mucho mas pequeñas. Dependiendo del sitio donde se realicen las mediciones, el nivel medio del mar estará mas cerca ó más lejos del centro de la Tierra. Por esta razón en nivel cero en Costa Rica puede ser diferente al nivel cero de Guatemala ó de Perú. Normalmente, el cero del geode difiere del cero del nivel medio del mar por varios metros (ver fig. 23). En la actualidad se cuenta con geoides de gran exactitud como el desarrollado por el “National Geospatial Intelligence Agency” (NGA) de los Estados Unidos de América; el cual tiene una exactitud inferior a un metro (Kenyon and Factor, 2007, <http://earth-info.nga.mil/>).

GEOID es una aplicación computacional para ambiente Windows creada para estimar la altura del geode con respecto al elipsoide WGS84 a nivel mundial. Los datos deben ingresarse en coordinas geográficas y en el datum WGS84 (ver anexo 4) (<http://earth-info.nga.mil/GandG/geotrans/index.html>).

Proyecciones y datums de Costa Rica

En Costa Rica se utilizan geodatos en los siguientes sistemas de referencia: Lambert Norte (CRLN), Lambert Sur(CRLS), Costa Rica Transversal de Mercator 1998 (CRTM98) y Costa Rica Transversal de Mercator 2005 (CRTM05). A partir de junio del 2005 el sistema de referencia oficial es CRTM05.

Proyección Transversal de Mercator para Costa Rica (CRTM05)

El decreto N° 33797-MJ-MOPT del treinta de marzo del 2007 (La Gaceta N° 108 — Miércoles 6 de junio del 2007) establece

que la proyección oficial para la cartografía de Costa Rica es la Transversal de Mercator para Costa Rica (CRTM05) (Gobierno de Costa Rica, 2007), con los siguientes parámetros (Fig. 30):

- Meridiano central 84° Oeste,
- Paralelo central 0°,
- Coordenada norte del origen 0 metros,
- Coordenada este del origen 500000 metros, y
- Factor de escala 0,9999

El mismo decreto establece que el datum horizontal oficial para Costa Rica es el CR05, enlazado al Marco Internacional de Referencia Terrestre (ITRF2000) del Servicio Internacional de Rotación de la Tierra (IERS) para la época de medición 2005.83, asociado al elipsoide del Sistema Geodésico Mundial (WGS84); el cual tiene las siguientes características:

Semieje mayor: 6378137.0 m
 Semieje menor: 6356752.31 m
 Factor de achatamiento:
 $1/f = 298.257223563$
 $f = 1/298.25722 = 0.00335281$

El datum vertical o nivel de referencia vertical continua siendo el nivel medio del mar según observaciones mareográficas realizadas entre 1940 y 1960.

¿Es obligatorio el uso del nuevo sistema de referencia?

Aun cuando el decreto estable como oficial la proyección CRTM05 con el datum horizontal WGS84, las instituciones y los profesionales no están obligados a utilizarla hasta tanto el ING no publique cartografía oficial para una determinada zona del país. El decreto establece en su transitorio I que “el Instituto Geográfico Nacional tendrá un período de nuevo (9) años, contados a partir de la promulgación del Decreto, para la implementación completa del nuevo sistema oficial de coordenadas en la cartografía básica oficial”. Por otro lado, el transitorio III establece que “una vez publicada y

oficializada la cartografía en el sistema de proyección cartográfica CRTM05 para una determinada zona del país, para esa zona se dará un plazo máximo de tres (3) años,

prorrogables a dos (2) períodos iguales, para que todos los trabajos geodésicos y cartográficos oficiales, puedan trasladarse al nuevo sistema”.

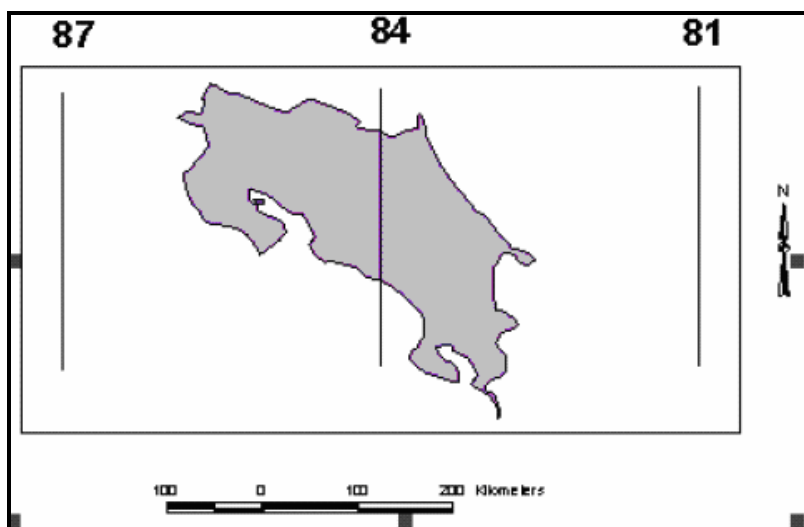


Figura 30: Proyección Transversal de Mercator de Costa Rica (CRTM05). EL meridiano central es $84^{\circ} 00' 00''$ y el paralelo central $0^{\circ} 00' 00''$. La diferencia entre CRTM05 y CRTM98 es el factor de escala (0,9999 y 0.9996, respectivamente).

¿Quién debe transformar los antiguos geodatos al nuevo sistema de referencia?

El transitorio II del decreto establece que “es responsabilidad de cada dependencia pública, la transformación de datos referenciados atinentes a sus tareas de competencia institucional en los anteriores sistemas de proyección cartográfica Lambert Costa Rica Norte y Lambert Costa Rica Sur, al nuevo sistema de proyección cartográfica CRTM05”.

Proyección Lambert conforme cónica de Costa Rica

Hasta el mes de junio del 2005, la proyección oficial de Costa Rica era la conforme cónica de Lambert, con dos cuadrículas: Norte (CRLN) y Sur (CRLS). Esta proyección fue desarrollada a partir de un cono cuya forma está determinada por los dos paralelos estándares. Los paralelos estándares son escogidos de tal forma que dos terceras partes del ámbito norte-sur de la proyección se encuentran entre ellos, un sexto se encuentra al norte del paralelo

estándar superior y un sexto al sur del paralelo estándar inferior. Sólo una zona de la proyección puede incluirse en un cono particular (Barrantes, 1989).

En esta proyección los meridianos son líneas rectas y los paralelos de latitud son arcos concéntricos. La proyección puede extenderse en el sentido este-oeste pero no en la dirección norte-sur sin incurrir en fuertes errores. La distorsión de escala depende solamente de la latitud. Esto hace que la proyección cónica de Lambert sea apropiada para áreas que se extienden en dirección este-oeste. Las coordenadas “x”, “y” son medidas en metros. El falso norte y el falso este representan coordenadas “x” y “y”, respectivamente, en un sistema de coordenadas planas. Para minimizar las distorsiones de la proyección, las cuales aumentan conforme nos alejamos del paralelo estándar, el país fue dividido en dos cuadrículas: *Lambert Norte* y *Lambert Sur* (Fig. 31). Los parámetros para la proyección Lambert de Costa Rica son (Inter-American Geodetic Survey, 1950):

LAMBERT NORTE

Latitud del primer paralelo estándar
 (paralelo sur) : 9° 56' N (9.933334)
 Latitud del segundo paralelo estándar
 (paralelo norte): 11° 00' N (11.00000)
 Longitud del meridiano central o de origen,
 Lambda (eje X): 84° 20' W (-84.333334)
 Latitud de origen de la proyección, Phi (eje
 Y): 10° 28' N (10.466667)
 Falso este (eje X): 500 000 metros
 Falso norte (eje Y): 271820.522 metros
 R0 +FN: 34 800 000 metros
 Factor de escala en el origen: 0.99995696

LAMBERT SUR

Latitud del primer paralelo estándar
 (paralelo sur) : 8° 28' N (8.4666667)
 Latitud del segundo paralelo estándar
 (paralelo norte): 9° 32' N (9.533334)
 Longitud del meridiano central o de origen,
 Lambda (eje X): 83° 40' W (-83.666667)
 Latitud de origen de la proyección, Phi (eje
 Y): 9° 00' N (9.00000)
 Falso este (eje X): 500000 metros
 Falso norte (eje Y): 327987.436 metros
 R0 +FN: 40 600 000 metros
 Factor de escala en el origen: 0.99995696

Ambas proyecciones utilizan el elipsoide de Clark 1866 cuyos parámetros son:

Semieje mayor (a): 6378206.40 m Semieje
 menor (b): 6356583.80 m
 Achatamiento $Df = (a-b)/a = 0.003390075$ y
 $1/f = 294.978698$
 Factor de excentricidad: $e^2 =$
 0,006768657997291

Los valores elegidos para el falso este y norte en ambas cuadrículas (norte y sur) aseguran que no existan valores negativos en el eje X. Las propiedades de la proyección Lambert son (Robison, Sale and Morrison, 1978; ESRI, 1994).

Forma: Es conforme y por lo tanto representa con exactitud áreas pequeñas.

Área: La distorsión es mínima cerca de los paralelos estándar. La escala se reduce

entre los paralelos estándares e incrementa al alejarnos de ellos.

Dirección: Ángulos locales son verdaderos.

Distancia: La escala es correcta a lo largo de los paralelos estándares. La escala se reduce entre los paralelos estándares e incrementa al alejarnos de ellos

Datum horizontal y vertical

El datum horizontal de la proyección Lambert de Costa Rica es **Ocotepeque** y fue establecido en diciembre de 1934. La base norte del datum está ubicada en el departamento de Ocotepeque, Honduras, a una altura sobre el nivel del mar de 807 metros. Los datos astronómicos de base norte son (Inter-American Geodetic Survey, 1950):

Elipsoide: Clarke 1866
 Latitud 14° 26' 13.73"
 Longitud 89° 11' 39.67"
 Azimuth 358° 54' 20.16"

Los datos geodésicos preliminares de base norte son:

Latitud 14° 26' 13.80"
 Longitud 89° 11' 39.63"
 Azimuth 358° 54' 20.16"

El punto de partida inicial del datum de base norte es:

Latitud 14° 26' 20.168"
 Longitud 89° 11' 33.964"
 Azimut Laplace 358° 54' 21.79"

El datum vertical o nivel de referencia vertical es el nivel medio del mar según observaciones mareográficas realizadas entre 1940 y 1960.

Las coordenadas referidas al sistema WGS84 pueden trasladarse al datum local de Costa Rica (Ocotepeque) utilizando la extensión cr_proy_datun_2008.avx (Fallas, 2008). La mayoría de los programas de SIG permiten proyectar los datos; sin embargo

esto no implica una transformación automática de datum. Recuerde que el datum debe transformarse previo a la proyección de los datos.

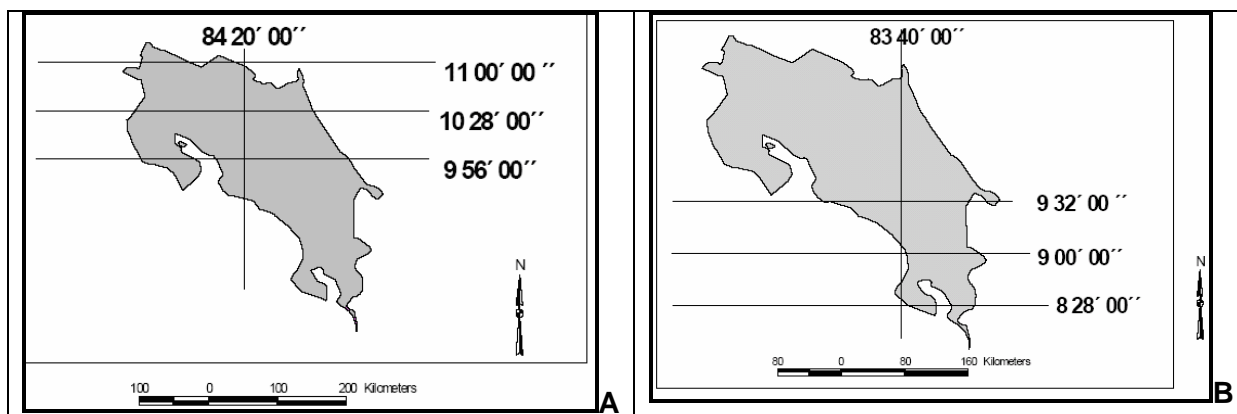


Figura 31: Proyección Lambert Norte (A) y Sur (B) de Costa Rica. Cada cuadrícula está diseñada para minimizar el error en el eje Y (latitud).

Proyección Transversal de Mercator para Costa Rica (CRTM98)

La proyección Transversal de Mercator utiliza un cilindro para proyectar los elementos de la superficie terrestre. El cilindro está orientado en sentido este-oeste y la proyección representa sin distorsión la curvatura de la Tierra en sentido norte-sur pero no en dirección este-oeste. Esta proyección es apropiada para países cuyo eje mayor se extiende en sentido Norte-Sur. Los parámetros de CRTM98 son los siguientes (MINAE-RECOPE, 1997) (Fig. 32):

Longitud del meridiano central o de origen,
 Lambda (eje X): $84^{\circ} 00' 00''$ W (84.0000)
 Latitud de origen $0^{\circ} 00' 00''$ N (0.0000)
 Falso este (eje X): 500 000 metros
 Falso norte (eje Y): 0 metros
 Factor de escala en el meridiano central
 0.9996

Los valores seleccionados para el falso este y norte aseguran valores positivos para todo el país. Las propiedades de la proyección son (ESRI, 1994):

Forma: Es conforme y por lo tanto representa con exactitud áreas pequeñas.

La distorsión de áreas grandes incrementa al alejarse del meridiano central.

Área: La distorsión incrementa al alejarse del meridiano central.

Dirección: Ángulos locales son verdaderos.

Distancia: La escala es constante a lo largo del meridiano central cuando el factor de escala es 1.0. Si el factor de escala es menor que 1 (como el propuesto para Costa Rica) entonces existen dos rectas con escalas constantes a ambos lados del meridiano central.

Datum horizontal y vertical

La cartografía CRTM98 utiliza el datum WGS84 y su elipsoide asociado, el cual posee las siguientes características:

Semieje mayor: 6378137.0 m
 Semieje menor: 6356752.31 m
 Factor de achatamiento: $1/f = 298.257223563$; $f = 1/298.25722 = 0.00335281$

El datum vertical o nivel de referencia vertical es el nivel medio del mar.

Relación espacial entre sistemas de referencia de Costa Rica

Al utilizar el material cartográfico de Costa Rica debemos recordar que cada uno utiliza un sistema de referencia particular. Otro aspecto a considerar es que no todos utilizan el mismo datum. Por esta razón la posición de un determinado lugar en el territorio costarricense dependerá del sistema de referencia utilizado (Fig. 33). La diferencia en localización entre dos datums puede ser de hasta 300 metros. La selección correcta del datum es especialmente crítica cuando utilizemos receptores del sistema de posicionamiento global (GPS), los cuales registran su posición en latitud-longitud y utilizan WGS84 como datum.

Transformación de coordenadas entre Sistemas de Referencia de Costa Rica

Las coordenadas planas pueden transformarse de un sistema de referencia a otro, por ejemplo de Lambert Norte ó Sur a CRTM98 ó CRTM05. Para esta transformación se recomienda convertir primero las coordenadas planas a coordenadas geográficas y luego proyectarlas al otro sistema de coordenadas planas. Recuerde que este procedimiento no cambia el datum y por lo tanto debe utilizarse con sistemas de coordenadas que utilicen el mismo datum. Si desea proyectar geodatos entre Lambert y CRTM98 ó CRTM05 puede utilizar la extensión `cr_proy_datum_2008` para ArcView GIS (Fallas, 2008) (ver anexo 1).

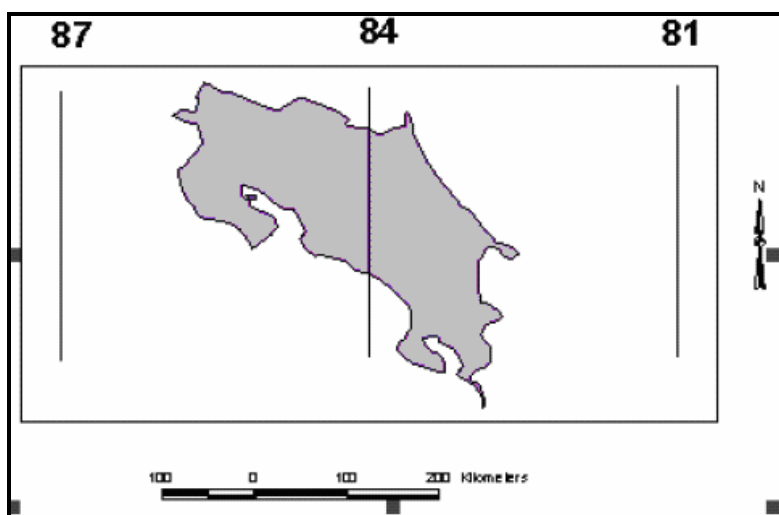


Figura 32: Proyección Transversal de Mercator de Costa Rica (CRTM). EL meridiano central es $84^{\circ} 00' 00''$ y la latitud de origen el Ecuador $0^{\circ} 00' 00''$. La diferencia entre CRTM98 y CRTM05 es el factor de escala (0,9996 y 0,9999, respectivamente).

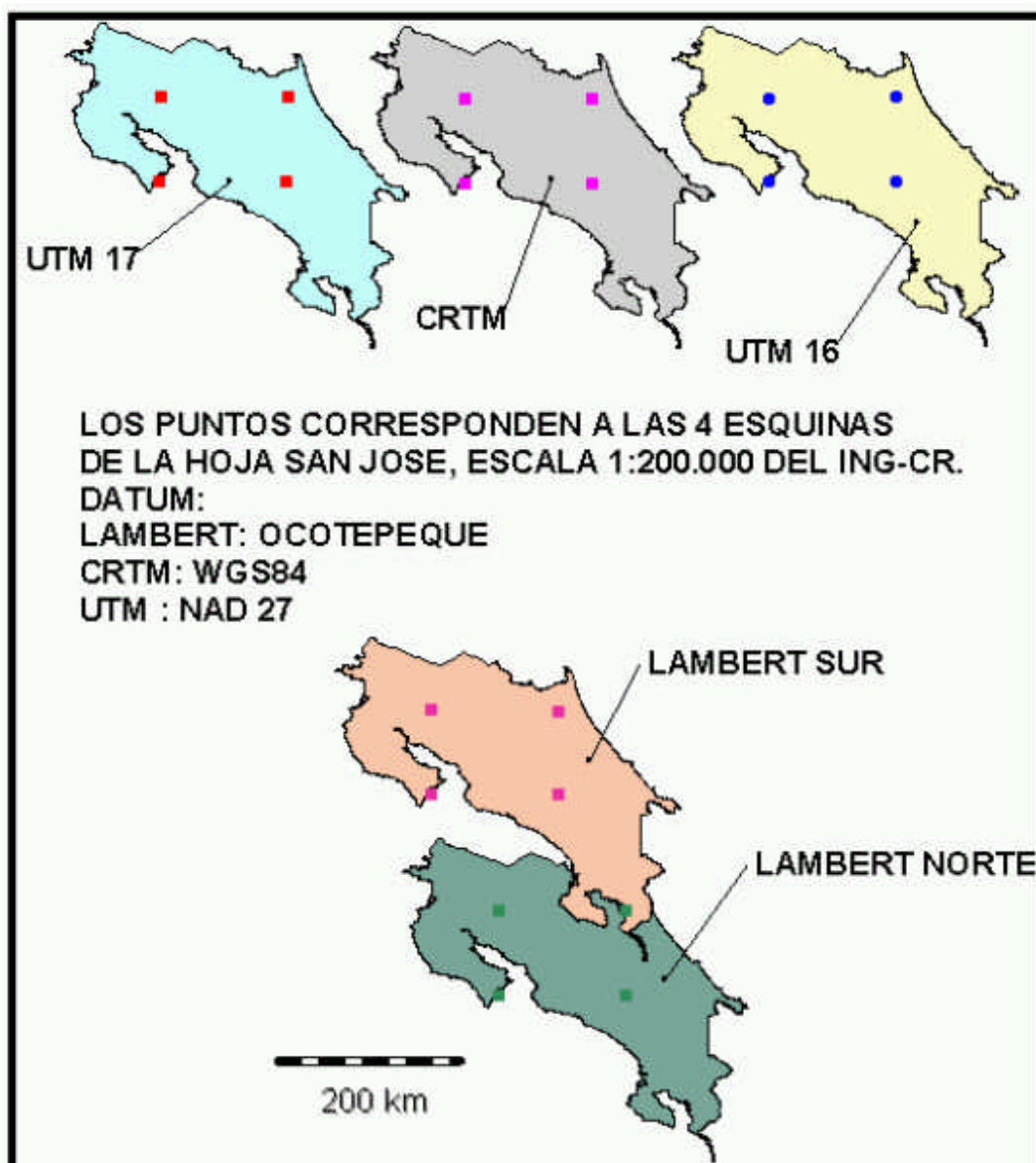


Figura 33: Comparación de las proyecciones Lambert (Norte y Sur), UTM16, UTM17 y CRTM (98-05). Transformaciones realizadas con la extensión cr_proy_datum_2008.avx.

Bibliografía

- Barrantes Ferreo, Mario. 1966. El mapa básico de Costa Rica. Ministerio de Transportes. Instituto Geográfico de Costa Rica. 18p.
- Bugayevskiy, L. M. and Snyder, J. P. 1995. Map projections. A Reference Manual. Taylor & Francis. UK. 328p.
- Defense Mapping Agency. 1991. Error Theory as Applied to Mapping, Charting, and Geodesy.. USA DMA TR 8400.1. 109p. http://earth-info.nga.mil/GandG/publications/tr8400_1.pdf
- National Geospatial Intelligence Agency. 1990. Datums, Ellipsoids, Grids, And Grid Reference Systems. DMA Technical Manual 8358.1. <http://earth-info.nga.mil/GandG/publications/tm8358.1/toc.html>.
- Defense Mapping Agency. 1984. Geodesy for the Layman. TR80003. Defense Mapping Agency. Building 56 U S Naval Observatory DMA TR 80003. Washington D C 20305. <http://earth-info.nga.mil/GandG/publications/>
- ESRI. 1994. Map Projections. Georeferencing spatial data. Redlands, CA. USA. ESRI. 1993.
- Fallas, Jorge. 2008. Cr_proy_datum_2008.avx: Transformación de datum y proyecciones de Costa Rica (CRLN, CRLS, CRTM98 y CRTM05) utilizando ArcView GIS. 20p.
- Fallas, Jorge. 2003. Evaluación del error esperado al configurar los receptores Garmin para trabajar con las cuadrículas Lambert Norte y Sur de Costa Rica. TELESIG. Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. 10p. Disponible en: http://www.mapealo.com/Costaricageodigital/Documentos/alfabetizacion/error_gps_ls_in.pdf
- Greenwalt, C. R and Shultz, M. E. Principles of Error Theory and Cartographic Applications. 1962. ACIC Technical Report No. 96. United States Air Force. <http://earth-info.nga.mil/GandG/publications/tr96.pdf>
- Gobierno de Costa Rica. 2007. Decreto N° 33797-MJ-MOPT. La Gaceta N° 108, Miércoles 6 de junio del 2007.
- Inter-American Geodetic Survey. 1950. Proyección Lambert para Costa Rica. Army Map Service, Washington, D.C. USA. 25p.
- Kenyon, Steve and John Factor. Towards the next earth gravitational model. National Geospatial-Intelligence Agency (NGA). Nikolaos Pavlis and Simon Holmes, SGT Inc. Paper presented at the Society of Exploration Geophysicists 77th Annual Meeting 2007. SEG 2007. San Antonio, Texas, USA. September 23-28, 2007. http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/new_egm/EGM08_papers/EGM-2007-final.pdf
- Lemoine, F. G., S. C. Kenyon, J. K. Factor, R.G. Trimmer, N. K. Pavlis, D. S. Chinn, C. M. Cox, S. M. Klosko, S. B. Luthcke, M. H. Torrence, Y. M. Wang, R. G. Williamson, E. C. Pavlis, R. H. Rapp and T. R. Olson. The Development of the Joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA). Geopotential Model EGM96 NASA/TP-1998-206861. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, 20771 USA, July 1998. <http://cddis.gsfc.nasa.gov/926/egm96/TOC.HTML>
- MINAE y RECOPE. 1998. Cartografía Digital: Coordenadas Costa Rica Transversal Mercator (CRTM). México. Esc 1:25 000.
- Muehrcke, P.C. and Muehrcke, J. O. 1992. Map Use. Reading, analysis interpretation. Third Ed. Madison, Wisconsin, USA. 631p.
- National Geospatial Intelligence Agency. Standard Molodensky Transformations. <http://earth-info.nga.mil/GandG/coordsys/datums/standardmolodensky.html>
- National Geospatial Intelligence Agency. Helmert Transformations. NATO Geodesy and Geophysics Working Group. <http://earth-info.nga.mil/GandG/coordsys/datums/helmert.html>
- National Geospatial Intelligence Agency. Origins of Selected Geodetic Datums. <http://earth-info.nga.mil/GandG/coordsys/datums/datumorigins.html>

- National Geospatial Intelligence. Datums, ellipsoids, grids, and grid reference systems. DMA Technical Manual 8358.1. <http://earth-info.nga.mil/GandG/publications/tm8358.1/toc.html>
- National Geospatial Intelligence Agency. Geographic Translator (GEOTRANS). Version 2.4.1 added May 30, 2007. <http://earth-info.nga.mil/GandG/geotrans/index.html>
- National Geospatial Intelligence Agency. The UTM system. <http://earth-info.nga.mil/GandG/coordsys/grids>
- National Geospatial Intelligence Agency. Vertical Datums, Elevations and Heights. <http://earth-info.nga.mil/GandG/publications/vertdatum.html>
- NIMA. Department of Defence World Geodetic System 1984, Its Definition and Relationships With Local Geodetic Systems, Third Edition, 4 July 1997 (updated 23 June 2004). <http://earth-info.nga.mil/GandG/publications/tr8350.2/wgs84fn.pdf>
- Pavlis, N.K. ; S.A. Holmes; S.C. Kenyon; D. Schmidt, and R. Trimmer. 2004. A Preliminary Gravitational Model to Degree 2160. Paper presented at the IAG International Symposium on Gravity, Geoid and Space Missions 2004. GGSM2004. Porto, Portugal. August 30 - September 3, 4, 2004. http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/new_egm/EGM08_papers/PGM2004A_paper_final.pdf
- Rapp, R. H. 1996. Use of Potential Coefficient Models for Geoid Undulation Determination Using a Spherical Harmonic Representation of the Height Anomaly/Geoid Undulation Difference. *Journal of Geodesy*.
- Robinson, A; Sale, R. and Morrison, J. 1978. Elements of cartography. Fourth Ed. John Wiley and Sons. New York, USA. 448p.

Anexo 1: ¿Que hace la extensión cr_proy_datum_2008.avx?

La extensión `cr_proy_datum_2008.avx` (Fallas, 2008) permite realizar la transformaciones del datum Ocotepeque a WGS84 y viceversa. Los parámetros de Molodensky (Delta X, DeltaY, Delta Z) utilizados corresponden a los valores publicados por la Oficina Ejecutora del Programa de Regularización de Catastro y Registro (<http://www.uecatastro.org/>) e Instituto Geográfico Nacional (<http://www.mopt.go.cr/ign/>).

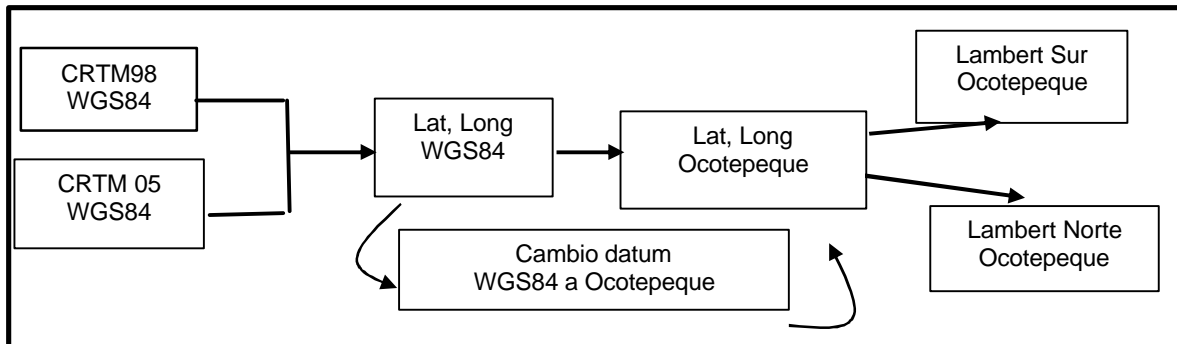
La transformación de datum horizontal es necesaria cuando se utilizan proyecciones que **no** comparten el mismo datum. Por ejemplo, si usted registra posiciones con un receptor de GPS (Lat, Long y WGS84) y desea integrarlos a una base de datos que

utiliza el datum Ocotepeque (Ej. Lambert Norte ó Lambert Sur) debe realizar la transformación de datum (de WGS84 a Ocotepeque). Por otro lado, si desea utilizar los datos con una base de datos en CRTM98 ó CRTM05 solo debe proyectarlos.

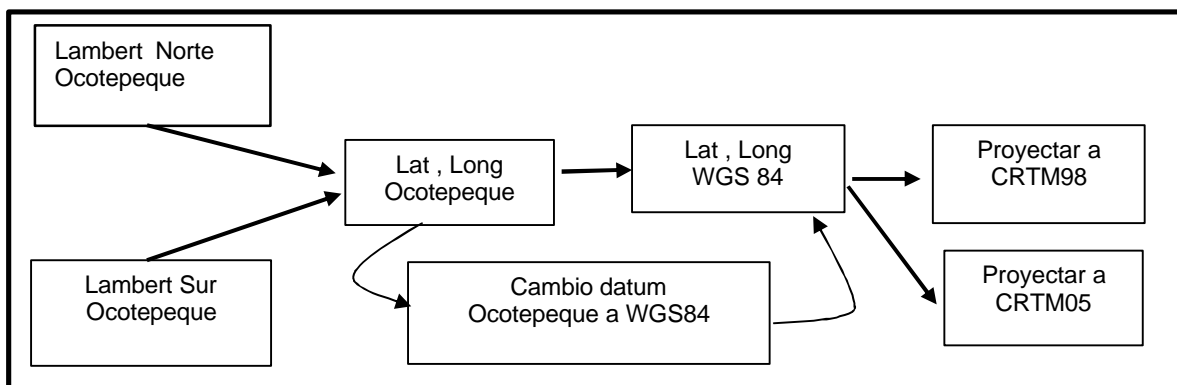
La extensión crea el archivo `default.prj` en su directorio `$HOME` (usualmente `c:\temp`); el cual mantiene los parámetros para las proyecciones de Costa Rica. El archivo `default.prj` incluye las siguientes proyecciones: Lambert (cuadrículas Norte y Sur), Costa Rica Transversal de Mercator (CRTM98) y Costar Rica Transversal Mercator (CRTM05). Los parámetros de las proyecciones corresponden a las publicadas por Instituto Geográfico Nacional (Lambert Norte, Sur y CRTM05) y MINAE-RECOPE (1998) (CRTM98).

Anexo 2: Proyecciones y transformación de datum en Costa Rica

Transformación de geodatos en CRTM WGS84 a Lambert Ocotepeque



Transformación de geodatos de Lambert Ocotepeque a CRTM WGS84



Anexo 3: Sus mapas en Google Earth

Es cada vez mas frecuente que usted o su cliente deseen visualizar sus mapas en Google Earth. El procedimiento es simple, sin embargo se debe recordar que Google Earth utiliza datos en coordenadas geográficas y en el datum WGS84.

Caso 1: Geodatos en Lambert (CRLN, CRLS). Retroproyecte sus datos a coordenadas geográficas y luego cambiar el datum (de Ocoatepeque a WGS84).

Caso 2 : Geodatos en CRTM98 ó CRTM05. Retroproyecte sus datos a coordenadas geográficas; no requiere cambio de datum (CRTM98 y CRTM05 utilizan el datum WGS84).

¿Cómo crear archivos KML a partir de Shapes?

La compañía "Zonums Solutions" (<http://www.zonums.com/>) ofrece de manera gratuita dos programas que permiten:

1. Crear archivos en formato KML a partir de archivos en formato Shape ([Shp2kml 2](#))

2. Crear archivos en formato Shape a partir de archivos en formato KML ([Kml2shp 2](#))

Anexo 4: Conversión de elevaciones ortométricas (equivalentes al nivel medio del mar) y elevaciones sobre el elipsoide.

El programa *Geoid* (NGA EGM96 Geoid Calculador) del National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) de los Estados Unidos de América permite estimar la altura sobre el nivel medio del mar a partir de alturas sobre el elipsoide (Ej. GPS) y la altura del Geoide (EGM96) (Rapp, 1996; Lemoine etl.al., 1998).

$$h = H + N$$

donde,

h = WGS 84 altura sobre el elipsoide

H = altura ortométrica

N = altura del Geoide EGM96

El EGM96 aplica solo al elipsoide de referencia del WGS 84.

► NGA EGM96 Geoid Calculator

Please view the [Read Me Page](#) first

Enter coordinates and press "Run"

	Latitude	Longitude
Degrees:	<input type="text" value="0."/>	<input type="text" value="0."/>
Minutes:	<input type="text" value="0."/>	<input type="text" value="0."/>
Seconds:	<input type="text" value="0.0"/>	<input type="text" value="0.0"/>

Select geoid units in meters or feet:

Meters Feet

http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/wgs84_180/intptW.html

Enter latitude, longitude, and GPS height and then submit:

Latitude:	<input type="text"/>	degrees North
	<input type="text"/>	minutes North
	<input type="text"/>	seconds North
	E.g. enter the latitude as -56.25 degrees or -56 degrees 15 minutes for 56 degrees 15 minutes South.	
Longitude:	<input type="text"/>	degrees East
	<input type="text"/>	minutes East
	<input type="text"/>	seconds East
	E.g. enter the longitude as -102.5 degrees or -102 degrees 30 minutes for 102 degrees 30 minutes West.	
GPS Elevation:	<input type="text"/>	meters

<http://sps.unavco.org/geoid/>

Este programa calcula el valor de la ondulación del elipsoide WGS84 con respecto al geode en cualquier parte del Planeta. Los datos de entrada corresponden a **coordenadas geodésicas** (Latitud-Longitud) en el **Datum WGS84**. El valor de la ondulación corresponde al elipsoide del datum WGS84. El cálculo de la ondulación se basa en el modelo mundial geoidal EGM96 (Earth Gravitational Model) y corresponde a la ondulación con respecto al elipsoide WGS84. La relación entre las tres elevaciones es la siguiente: $h + \text{Error}_h = (H + \text{Error}_H) + (N + \text{Error}_N)$; en donde Error indica el sesgo asociado a la estimación de cada componente. La exactitud del modelo EGM96 es 0.5 a 1.0m (Kenyon and Factor, 2007).

Anexo 5: Configurando su receptor de posicionamiento global para trabajar con la cartografía de Costa Rica.



El nuevo Sistema de Referencia oficial de Costa Rica es CRTM05-WGS84; sin embargo por algún tiempo se continuará utilizando la cartografía en el sistema Lambert-datum Ocoatepeque. El país está dividido en dos cuadrículas: Lambert Norte y Lambert Sur. La primera se extiende desde la frontera con Nicaragua hasta las inmediaciones de Bahía Herradura en el Pacífico y Puerto Viejo en el Caribe y la segunda desde esta línea imaginaria hasta la frontera con Panamá. Otra proyección utilizada en Costa Rica es la CRTM98 (Costa Rica Transversal de Mercator), datum WGS84. Esta proyección es utilizada por la cartografía escala 1:25.000 del proyecto TERRA (MINAE-RECOPE, 1998). A

continuación se indica cómo configurar un receptor Garmin para leer la posición en Lambert (CRLN, CRLS), CRTM98 y CRTM05.

CONFIGURACIÓN DE RECEPTOR GARMIN

Utilizando el menú del receptor, seleccione “Formato de posición” y configure la parrilla o cuadrícula UTM del usuario con los siguientes parámetros:

1. Cuadrícula Lambert Norte

Origen de longitud: 84° 20.000'
 Escala: 0.99996
 Falso Este: 499800 metros
 Falso Norte: -885244 metros
 Datos de mapa (datum): NAD27 Central

2. Cuadrícula Lambert Sur

Origen de longitud: 83° 40.000'
 Escala: 0.99996
 Falso Este: 499800 metros
 Falso Norte: -666875 metros
 Datos de mapa (datum): NAD27 Central

NOTA: Esta es una cuadrícula personalizada y por lo tanto no corresponde a ninguna proyección oficial de Costa Rica. La misma fue creada porque los receptores Garmin no pueden configurarse para utilizar la proyección Lambert de dos paralelos estándares. La configuración permite leer posiciones (X,Y) en valores equivalentes a la cuadrícula Lambert y por lo tanto facilita el uso del receptor de GPS con los mapas escala 1:50.000 del Instituto Geográfico Nacional (Fallas, 2003).

LAS CONFIGURACIONES SUGERIDAS NO SON OFICIALES Y POR TANTO EL USUARIO(A) LAS UTILIZA BAJO SU PROPIA RESPONSABILIDAD.

3. Costa Rica Transversal de Mercator (CRTM98)

Origen de longitud: 84° 00.00 W
 Falso este : 500 000 metros
 Falso norte : 0 metros
 Escala: 0.9996
 Datos de mapa (datum): WGS84

4. Costa Rica Transversal de Mercator (CRTM05)

Origen de longitud: 84° 00.00 W
 Falso este : 500 000 metros
 Falso norte : 0 metros
 Escala: 0.9999
 Datos de mapa (datum): WGS84

¿Cuál es el error esperado de los parámetros propuestos?

El error planimétrico total (radial) de las configuraciones propuestas es el siguiente (Fallas, 2003):

Lambert Norte: El error medio esperado para sitios ubicados en la cuadrícula Lambert Norte es de 7.7 m (rango 2 a 17 metros). Este error es inferior al de la cartografía escala 1:50 000 del Instituto Geográfico Nacional.

Lambert Sur: El error medio esperado para sitios ubicados en la cuadrícula Lambert Norte es de 4.5 m (rango 1 a 8 metros). Este error es inferior al de la cartografía escala 1:50 000 del Instituto Geográfico Nacional.

CRTM (98 y 05): El error medio esperado para sitios ubicados en la cuadrícula CRTM es de 0.4 m (rango 0 a 1.2 metros). Este error es muy inferior al de la cartografía escala 1:25 000 de TERRA.

CONFIGURACIÓN DEL RECEPTOR MAGELLAN

1. Lambert Norte

Seleccionar Menú, configurar, sistema coordenadas, secundario, C. usuario, Cónica Lambert, 2 paralelo Estándar y digitar los siguientes valores :

Latitud de origen: 10.466666 N
 Longitud de origen: 084.33334W
 Latitud del Estándar
 Paralelo 1: 09.933333N
 Paralelo 2: 11.00000N
siguiente
 Factor de escala: 0.99995696
 Convertir a métrico: 1.0000000
 Este falso al origen: 00500000.0
 Norte Falso al origen: 00271820.0
 Listo

Configuración de la transformación de datum (WGS84 a Ocotepaque)

Menu, Dato Mapa, secundario, "user". Luego digite los siguientes valores:

Delta A (metros): +0069.4000
 Delta F (x10000) : +0.37264639341037
 Delta X (metros): -0213.11
 Delta Y (metros): -0009.37
 Delta Z (metros): +0074.95
Guardar

2. Lambert Sur

Seleccionar Menú, configurar, sistema coordenadas, secundario, C. usuario, Cónica Lambert, 2 paralelo Estándar y digitar los siguientes valores :

Latitud de origen: 9.00000 N
 Longitud de origen: 083.666667 W
 Latitud del estándar
 Paralelo 1: 08.46666667 N
 Paralelo 2: 09.5333334 N
siguiente
 Factor de escala: 0.99995696
 Convertir a métrico :1.0000000
 Este falso al origen: 00500000.0
 Norte Falso al origen: 00327987.4
 Listo

Nota: Recuerde que las cuadrículas Lambert Norte y Lambert Sur utilizan el datum Ocatepeque. Por lo tanto, la configuración de la transformación de datum se realiza solo una vez.

Anexo 6: Cartografía digital y estándares horizontales

Costa Rica cuenta con cartografía oficial desde hace mas de 50 años, sin embargo todavía no existe un estándar que defina el error (horizontal y vertical) esperado por el usuario para mapas de diferentes escalas. Por esta razón se transcribe a continuación, con una referencia, los estándares de exactitud horizontal de la cartografía del USGS de los Estados Unidos de América.

- El error planimétrico de un mapa con una escala mayor o igual a 1:20 000 debe ser el equivalente a 0.85 mm a escala del mapa. Por ejemplo, para un mapa escala 1:2 000 esto equivale a 1.7 metros y para un mapa escala 1: 20 000 a 17 metros.
- El error planimétrico de un mapa con una escala menor a 1:20 000 debe ser el equivalente a 0.51 mm a escala del mapa. Por ejemplo, para un mapa escala 1:50 000 esto equivale a 25.4 metros y para un mapa escala 1: 200 000 a 101.6 metros.

Al aplicar el estándar, 10 % de los puntos de verificación no debe exceder el error permitido a escala del mapa (<http://erg.usgs.gov/isb/pubs/factsheets/fs17199.pdf>)