



GOBIERNO DE CHILE  
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS  
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN

**INFORME TÉCNICO:**

**“Conceptos Básicos de Georreferencias y su  
utilización en las labores de la Dirección General  
de Aguas.”**

**REALIZADO POR:  
División de Estudios y Planificación**

**SDT N° 371**

**Santiago, Junio de 2015**

**Guillermo Tapia Molina**  
Cartógrafo, Unidad SIG

División de Estudios y Planificación, Dirección General de Aguas, MOP

**INDICE**

I.- INTRODUCCIÓN:.....	3
II.- OBJETIVOS.....	3
III.- ANTECEDENTES.....	4
IV.- GEORREFERENCIAS EN CHILE.....	5
V.- METODOS DE CAPTURA DE COORDENADAS.....	15
SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS).....	18
VI.- TRANSFORMACIÓN DE COORDENADAS.....	25
CONCLUSIONES: .....	31

## **I.- INTRODUCCIÓN:**

La DGA es el organismo que por ley debe administrar y gestionar los recursos Hídricos del País, y entre sus principales tareas están:

- Operar y Medir la Red Hidrométrica Nacional: La que corresponde a una red de estaciones con distintos tipos de instrumentos Hidrometeorológicos que miden entre otras variables; Caudales, Temperaturas, Precipitaciones, Calidades, Niveles de Pozos, entre otras.
- Entrega de Derechos de Aprovechamiento de Aguas; esta función tienen un variado número de tareas técnicas y procedimientos, asociados principalmente a la verificación de datos entregados por los usuarios, análisis de disponibilidad, y Fiscalizaciones entre otras.

En estas dos grandes funciones de la DGA, hay un concepto que se utiliza de manera cotidiana, omnipresente y que es la base para que estas funciones se desarrollen con buenos resultados. Este concepto es la GEORREFERENCIA, la cual como se indicó es utilizada por un número muy importante de profesionales, y técnicos DGA, pero que en muchas ocasiones se trabaja con ella desconociendo sus fundamentos y condiciones básicas de operación, situación que trae como consecuencia que se produzcan errores en los procesos DGA.

En este informe se intentará explicar cómo ha sido usado este concepto en la institución a lo largo del tiempo, ilustrar cuáles han sido los métodos comunes de obtención de georreferencias, y como estos afectan a la calidad de los datos, también se intentará explicar los principales fundamentos de este concepto con el objeto de que sean utilizados y considerados para así obtener mejores resultados de la información.

## **II.- OBJETIVOS**

- Describir como la DGA ha utilizado y trabajado las georreferencias en sus procesos a lo largo del tiempo.
- Identificar las posibles fuentes de errores de los procesos utilizados.
- Dar a conocer e instruir acerca de las Georreferencias Chilenas.
- Proponer métodos y herramientas de trabajo modernas que minimicen errores. Aplicando correctamente el concepto de georreferencia.

### **III.- ANTECEDENTES**

#### **RED HIDROMETRICA:**

Como ya se ha dicho la Red Hidrométrica corresponde a una serie de estaciones ubicadas en el territorio Nacional, es la División de Hidrología la encargada de diseñarlas y de determinar la ubicación de su instalación, antiguamente las coordenadas eran obtenidas desde Cartografía, es decir, extrayéndolas de un mapa en Papel, con el tiempo después se empezó a utilizar el GPS como método de obtención de coordenadas, (ambos métodos se explicaran en detalle más adelante) y estas coordenadas son almacenadas en el Banco Nacional de Aguas, (BNA) plataforma Informática, de base de datos, que almacena la información obtenida por los instrumentos instalados en las estaciones, más información de base de ellas como Identificación, Nombres, Códigos, coordenadas, Fechas, entre otras.

#### **DERECHOS DE APROVECHAMIENTO:**

Como primera etapa del proceso Los Usuarios o Solicitantes de derechos de agua, ya sean personas naturales o jurídicas cuando solicitan un derecho de aprovechamiento a la DGA, se les solicita que entreguen datos asociados a su “punto” y uno de estos datos están relacionados a la Ubicación de ellos, los cuales se traducen en las coordenadas del Punto de Captación si es agua superficial o las coordenadas del Pozo si es un derecho subterráneo, a esto se suma que en ocasiones tienen más de un punto asociado, (varias captaciones, o restituciones). Y siempre se solicitan las coordenadas porque ellas “en teoría” aseguran perpetuidad y objetividad en el tiempo.

El método de obtención de las coordenadas y el formato de estas durante los inicios de la DGA y por muchos años no era tema de importancia, toda la responsabilidad de captura de estas coordenadas recaía en los usuarios, y esta libertad para poder obtenerlas redundó con el tiempo en una serie de errores y de inexactitudes propias de que los usuarios no son expertos de temas de georreferencia.

En muchos casos todos estos errores pasaron desapercibidos para la DGA, porque el replanteo y visitas de puntos no tenían mayores requerimientos de precisión, pero desde hace ya algunos años, y más aún, hoy en día, la alta demanda, la saturación de derechos y la cercanía entre ellos hace necesario que los métodos de verificación y de fiscalización aumenten sus criterios de precisión.

En ese sentido actualmente queda en evidencia que encontrar un punto de captación o un pozo se convierte en una tarea difícil, muchas veces con las coordenadas entregadas por los usuarios y que la DGA validó en su minuto, no es posible encontrar dicho punto con las técnicas

actuales, y es más, dichas coordenadas difieren significativamente de las obtenidas con métodos de GPS modernos.

Este es un problema transversal y que lo viven todas las instituciones que a través de su historia han ido almacenando georreferencias de los puntos de su negocio, en el caso de la DGA, de los derechos y solicitudes de aprovechamiento. Entonces de estos problemas surgen espontáneamente algunas preguntas obvias.

- ¿Por qué coordenadas obtenidas hace años difieren tanto de las actuales? Si el punto medido no ha cambiado de posición.
- ¿A qué se deben estas diferencias?
- ¿Cómo se pueden solucionar?

En este informe se buscará responder estas preguntas, pero para ello será necesario primero entender el mundo de las georreferencias y comprender también aspectos históricos de esta ciencia y de los procedimientos de capturas de coordenadas por parte de los usuarios.

#### **IV.- GEORREFERENCIAS EN CHILE**

Primero entenderemos por georreferencia: a la asignación de datos geográficos a un objeto que se encuentra en el terreno, los cuales permiten ubicarlo sobre un plano, mapa o representación compatible. Es decir son los datos que permiten ubicar un punto en un mapa. Habitualmente, estos datos geográficos son las coordenadas.

Todo punto en el terreno, es posible ubicar o de trasladar a un plano compatible, y entendemos por plano compatible a que los datos geográficos de la georreferencia son los mismos que posee dicho mapa, esto es fundamental, y quiere decir que las coordenadas que representan al punto en el terreno, deben ser compatibles (del mismo tipo) con las que contiene el mapa que las representa. Y además ambos deben estar referido al mismo Datum (sistema de origen común) Y es aquí donde comienzan los problemas, porque:

- Existen muchos tipos de coordenadas
- Las coordenadas están referidas a sistemas DATUM
- Existen varios sistemas DATUM.
- Existen muchas combinaciones entre Datums, Tipos de coordenadas.
- Cuando se mezclan Datum y distintos tipos de coordenadas se producen errores.
- Los métodos de transformación de Datums son complejos.
- Existe un gran desconocimiento de estos temas, tanto a nivel de usuarios como de técnicos DGA.

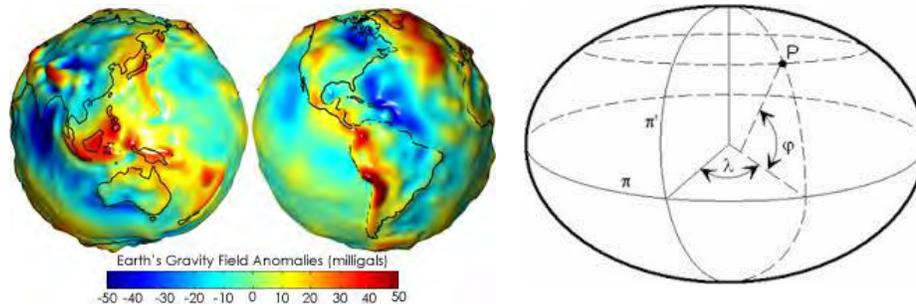
De este modo se observa que comienzan a aparecer ciertos términos que es bueno de conocer y aclarar para entender cómo afectan a la posición de un punto y la captura de sus coordenadas.

## SISTEMAS DE REFERENCIA

Los sistemas de Referencia son una serie de fórmulas matemáticas muy complejas y que representan distintas figuras, algunas de ellas no es necesario de comprenderlas a cabalidad y no se presentan nunca en métodos de transformación ya que están ocultas por defecto, pero otras si es necesario de conocer y de tenerlas conceptualmente muy claras.

Estas figuras o conceptos se aplican sobre las plataformas cartográficas ya sea en papel o informática. Y en definitiva afectan a la toma de coordenadas y sus representaciones cartográficas.

- **Geoide:** Es la forma teórica del planeta tierra, sin considerar el relieve, (como si el planeta estuviera cubierto solo por océanos) es matemáticamente imposible de representar. Es una figura que no es necesario de conocer a cabalidad.



La figura real del geoide es determinada por la ciencia de la gravimetría, es decir el estudio de la gravedad, esta figura se utiliza para poder “construir” el elipsoide de referencia.

- **Elipsoide de referencia:** Figura geométrica que más se asemeja al geoide y entrega los parámetros matemáticos necesarios para poder definir una proyección cartográfica.

Si el Elipsoide se gira sobre su eje se forma el Elipsoide de Revolución.

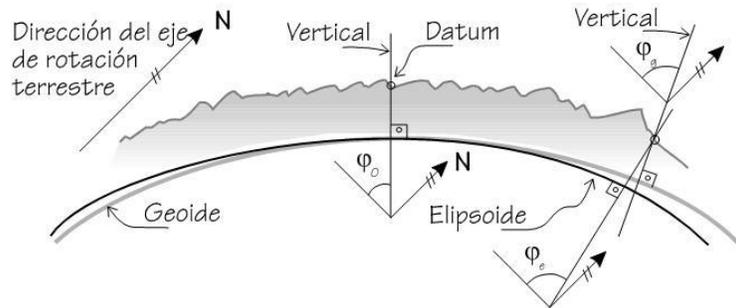
Y el punto donde el Geoide se hace tangente al elipsoide se llama Punto DATUM.



En la practica el concepto de “Elipsoide de referencia” o de “Elipsoide de revolución” no es muy ocupado, ni en GPS, ni en métodos de transformación, pero si puede ser de utilidad para poder identificar cartografías que no indiquen el DATUM y que si indiquen el elipsoide, teniendo este dato se puede deducir el DATUM, en todo caso esta situación es poco común.

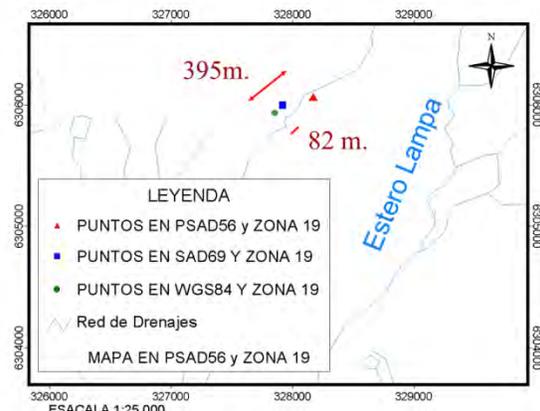
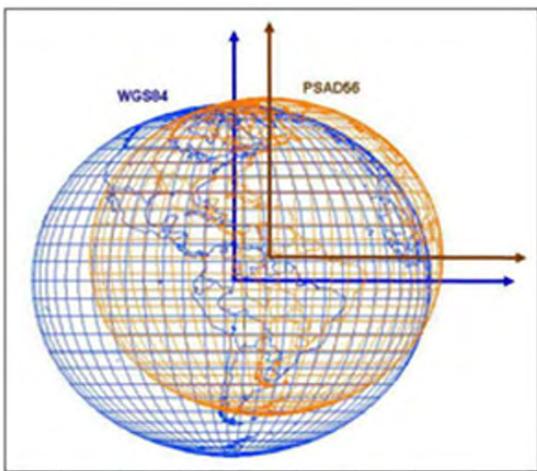
- Elipsoide Internacional de 1924 Hayford da origen a DATUM PSAD56.
- Elipsoide Sudamericano de 1969 da origen a DATUM SAD69.
- **Datum:** punto donde las verticales del elipsoide y geode, coinciden y se hacen tangentes al geode.

La definición científica es un tanto incomprensible, y según su definición es el lugar donde coinciden y se hacen tangentes las verticales tanto del geode como del elipsoide.



En la práctica no es necesario para nada, memorizar la definición científica, pero si es muy importante este concepto, porque **es la principal fuente de diferencias de coordenadas**, porque en términos simples **significa un desplazamiento de los ejes cartesianos de las coordenadas**.

Mezclar distintos Datums genera desplazamientos, y que no son constantes ya que dependen de la Latitud.



Por lo tanto conocer los Datums de los Puntos Capturados, de las cartografías, o del DATUM seteado en el GPS, es fundamental y hay que conocer todos los datums usados en CHILE.

Existen dos tipos de Datums:

- **Datums Locales:** Son aquellos generados con métodos astronómicos y basados en un elipsoide local, y obedecen a la definición tradicional del datum, por lo que representan solo ciertos territorios, país o continente.
- **Datums Geocentricos:** Son aquellos basados en la Gravimetria, y son construidos gracias a observaciones satelitales, la definición tradicional de Datum no se aplica sobre ellos ya que su origen es geocéntrico, es decir el centro de la tierra, son universales, ya que sirven para todo el mundo.

De esta forma a través de la historia los Datums usados en Chile son:

**PSAD56:** Provisional Sud American Datum de 1956.  
Punto Datum Local ubicado en “la canoa” Venezuela.  
Cartografías de escala 1:50.000 hasta latitud 43°30’ sur,  
Cartografías 1:250.000 y 1:500.000

**SAD69:** Sud American Datum 1969.  
Punto Datum Local ubicado en “Chua” Brasil.  
Cartografías de escala 1:25.000 y 50.000 desde latitud 43°30’ sur,

**WGS84:** World Geodetic System 1984.  
Datum Geocéntrico de carácter universal, es el más comun en la actualidad. Y es el utilizado por los sistemas GPS.

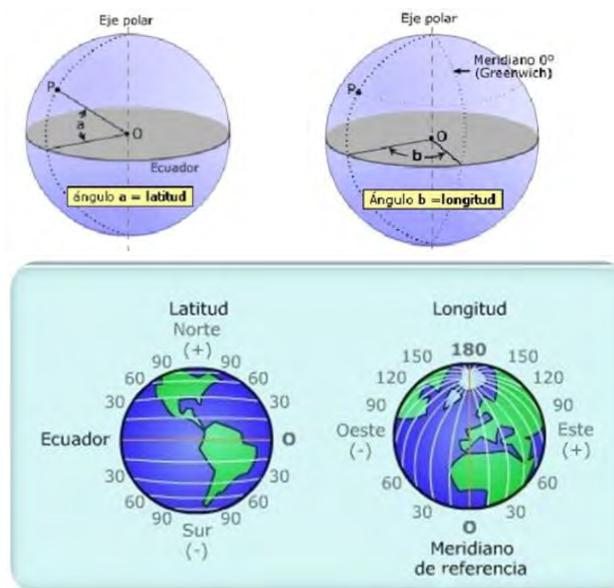
**SIRGAS:** Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas.  
Datum Geocéntrico especialmente diseñado para América, se podría decir que es una sintonía Fina de WGS84, pero en la Practica la diferencia entre Sirgas y Wgs84 es menor al milímetro, por lo tanto se sigue usando con fuerza wgs84, a pesar que Sirgas es el DATUM Oficial de Chile en la Actualidad.

Las diferencias en metros entre Datums, son Significativas y los métodos de transformación entre ellos son complejas, incluso operar un software para hacer transformaciones conlleva manejar bien todos los conceptos.

Las diferencias en metros entre Datums Local (Psad56) y Datum geocéntrico (wgs84) varia con la latitud pero tiene magnitudes que pueden ir desde los 200 a 400 metros.

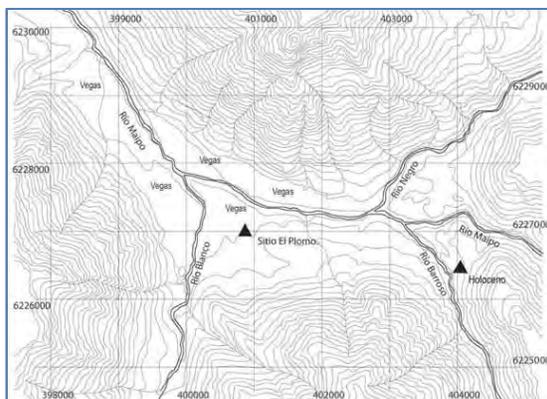
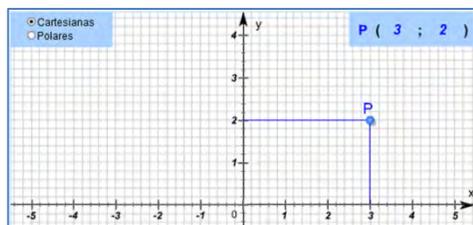
La diferencia entre SIRGAS y WGS84 es menor al milímetro, por lo tanto en la práctica pueden ser considerados como uno solo.

- **Tipos de Coordenadas:** Las georreferencias de un punto se expresan a través de las coordenadas las cuales pueden ser angulares o cartesianas.
- **Coordenadas angulares:** Son coordenadas que representan los ángulos de latitud y Longitud, y se expresan habitualmente en Grados, Minutos y Segundos. Este tipo de coordenadas se llaman también coordenadas geográficas.



Las coordenadas geográficas expresadas en Latitud y Longitud no son muy precisas ya que para lograr precisiones submétricas (menores al metro) se deben considerar varios decimales en los “segundos” y habitualmente estos no se expresan. Por lo tanto las coordenadas geográficas en términos profesionales no son muy utilizadas.

- **Coordenadas Cartesianas:** Corresponden a las Coordenadas que se basan en un eje cartesiano, en donde El plano cartesiano está formado por dos rectas numéricas perpendiculares, una horizontal y otra vertical, La recta horizontal es llamada eje de las abscisas o de las equis (x), y la vertical, eje de las ordenadas o de las yes, (y), y habitualmente se expresan en metros.



Las coordenadas Cartesianas son las que se utilizan en la Proyección Universal Transversal de Mercator (UTM). Y son el tipo más utilizado en términos profesionales. Ya que sobre ellas las mediciones de distancias y áreas son de mejor calidad.

Consideraciones Importantes a tomar en cuenta acerca de las coordenadas UTM:

- **Precisión:** Estas coordenadas tienen precisión métrica, es decir “al metro”.
- **Nombres de Coordenadas:** Las coordenadas “X, Y” del eje cartesiano, reciben varios nombres, el cual dentro de la proyección **UTM NO ES IMPORTANTE**, aunque si ayuda a identificar correctamente a que coordenada se refiere. por ejemplo:
  - Para la coordenada “X” se les puede denominar: “X”, “Abscisa”, “Este”, “Eje Horizontal”
  - Para la coordenada “Y” se les puede denominar: “Y”, “Ordenada”, “Norte”, “Sur”, Eje Vertical.

Habitualmente en Chile a las coordenadas UTM se les llama “Este” para el Eje “X” y “Norte” para el Eje “Y”, pero esto de llamar a la coordenada “Y” de “Norte” obedece a que la mayoría de la Bibliografía que existe al respecto es de origen Español, y este país se encuentra en el hemisferio norte, y llamar así al eje “Y” es correcto en ese hemisferio, su uso en el hemisferio Sur es simplemente debido a que se extrapoló su nombre hacia el hemisferio sur.

Todos los software de SIG llaman a las coordenadas UTM como (x,y) salvo Google Earth, que llama a las coordenadas **X = Este** y a las **Y= Norte** para las que están en el hemisferio Norte e **Y= Sur** para las del hemisferio sur.

- **Rango de Valores:** Lo realmente importante **no es el nombre de ellas, si no que el valor que ellas contengan**. De este modo, y de acuerdo a la proyección UTM siempre los valores de las coordenadas cuando son expresadas en metros, serán para el eje “X” del orden de “**Centenas o decenas de Mil**” y para el eje “Y” siempre serán del orden de “**Unidades de Millón**”.

Ejemplos de valores de coordenadas en Chile. ( X , Y )  
(400.000, 7.650.000)  
( 60.000, 5.850.000)  
(750.000, 5.700.000)

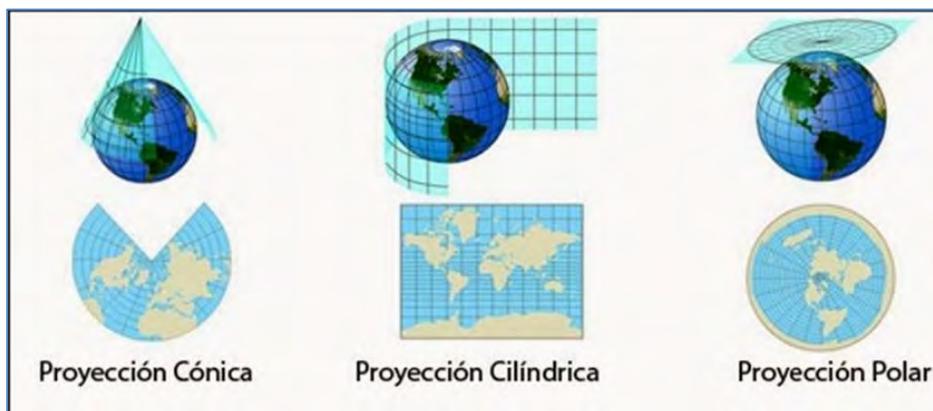
Este plano cartesiano el de las coordenadas UTM, nace de la combinación de conceptos como “Datum” y “Proyección Universal Transversal de Mercator”, que por su método de construcción involucra un tercer concepto que es el “**Huso Cartográfico**”, el cual es el responsable de que las coordenadas UTM tengan estos rangos de valores.

- **Proyecciones Cartográficas.** Intentan representar la superficie de la tierra (geoide) en una superficie plana.

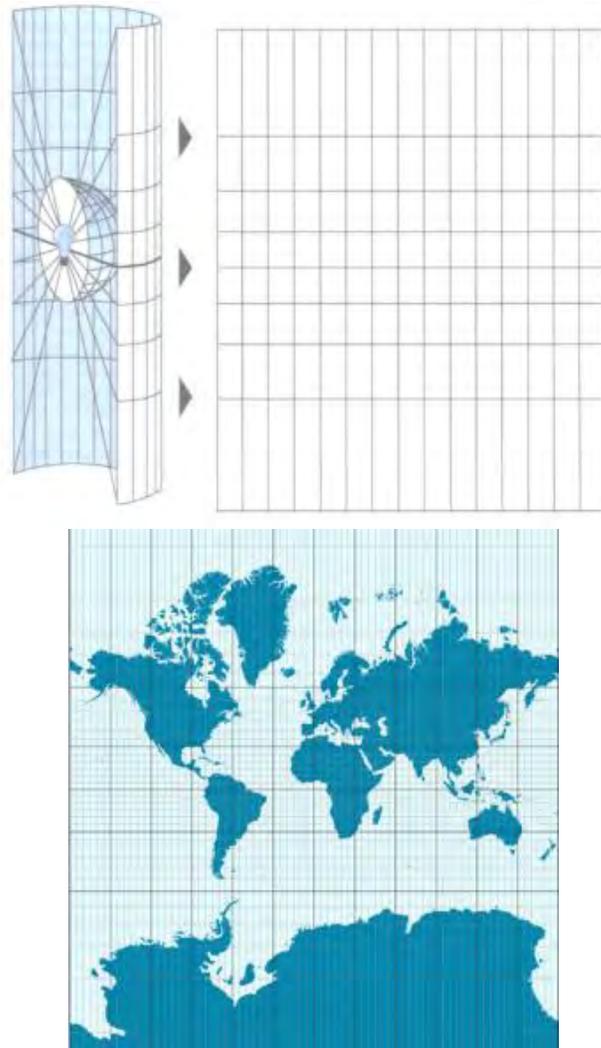
Intentan representar la superficie de la tierra (geoide), a través de los parámetros del Elipsoide y Datums, en una superficie plana, que es el mapa. Y en la práctica son fórmulas matemáticas que representan diferentes ideas de como proyectar los meridianos y paralelos desde el globo terráqueo a un plano que lo cubre.

Existen muchos tipos de proyecciones, cilíndricas, cónicas, azimutales. Cada una con propiedades diferentes.

No existe ninguna proyección que rescate todas las propiedades de la superficie esférica de la tierra

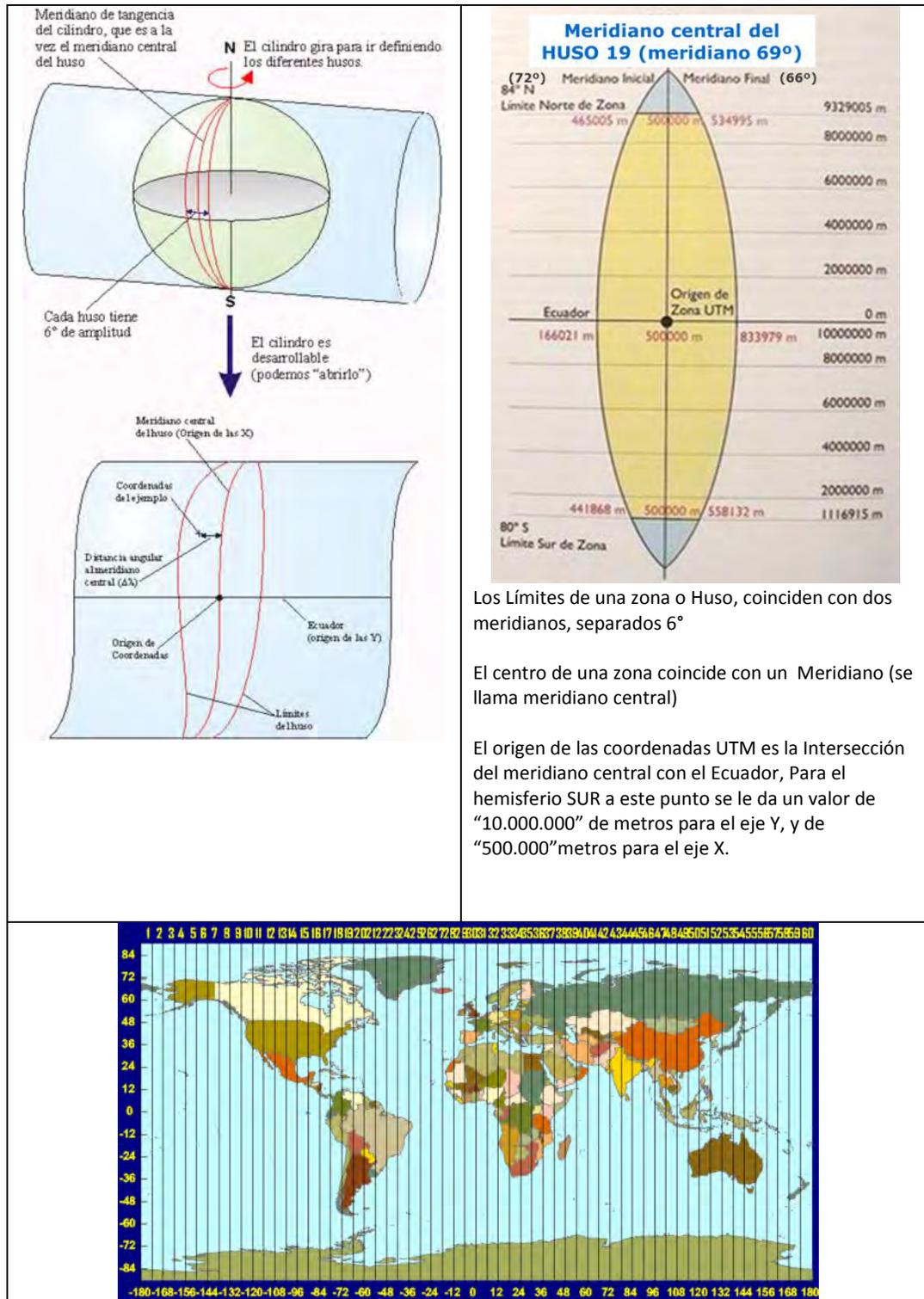


- **Proyección Cilíndrica Universal de Mercator:** Es una proyección cartográfica que consiste en imaginariamente colocar una fuente de luz dentro del globo terráqueo y así las sombras de los meridianos y paralelos se proyectan sobre un cilindro de papel que envuelve al globo. Esta idea de proyección es planteada matemáticamente por “Gerardus Mercator” en el siglo 16.



**-Proyección Cilíndrica Universal Transversal de Mercator:** Es la Proyección Universal de Mercator, pero aplicada sobre el Globo terrestre de manera Transversal, de esta forma el cilindro de papel representa de manera fidedigna al meridiano del cual es tangente. Es decir representa muy bien a territorios que son extensos de latitud, como lo es Chile. Por eso es la proyección que se utiliza en el país.

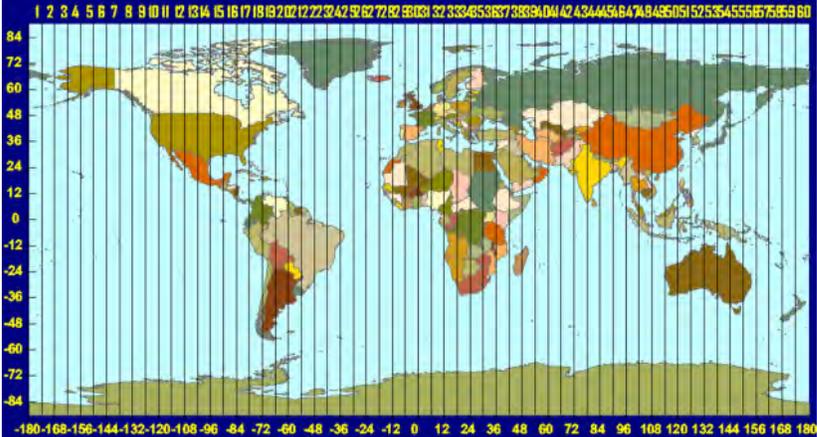
Pero como la tangencia se va perdiendo a medida que se aleja del meridiano central (meridiano tangente al cilindro) se va perdiendo fidelidad por lo tanto en su diseño se dividió al globo terráqueo en 60 Husos, de esta forma a Chile por su ubicación en el continente le corresponden dos Husos, Husos 18 y 19. Y Huso 12 para isla de pascua.



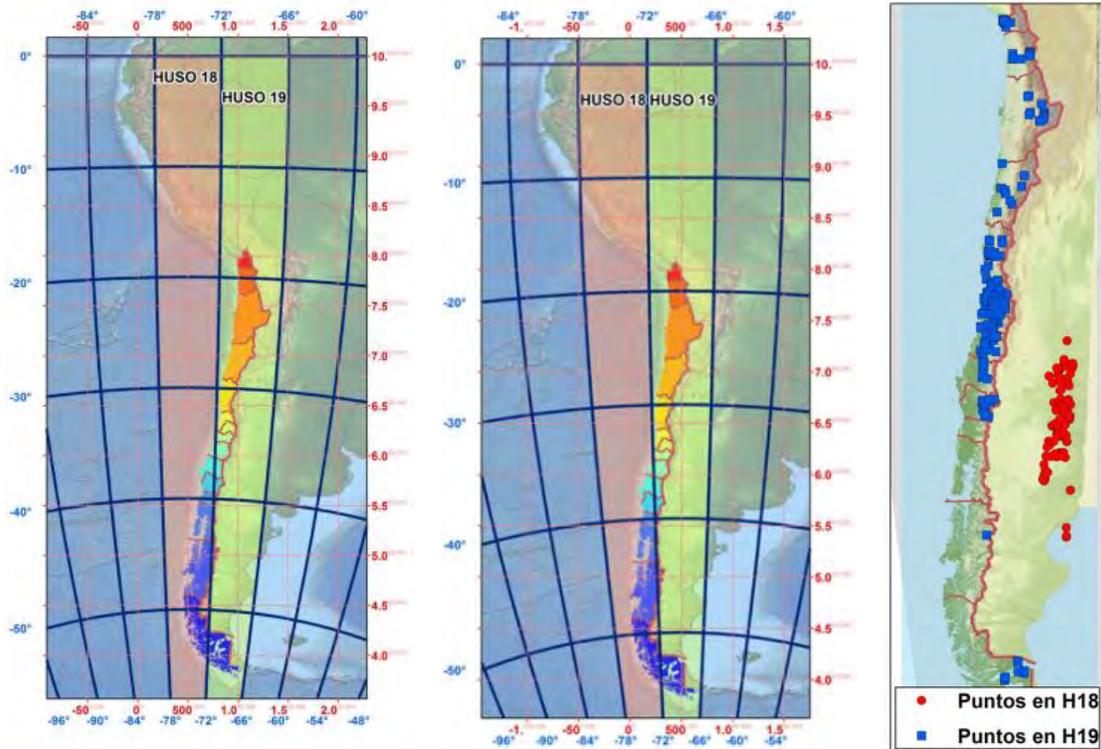
Los Límites de una zona o Huso, coinciden con dos meridianos, separados 6°

El centro de una zona coincide con un Meridiano (se llama meridiano central)

El origen de las coordenadas UTM es la Intersección del meridiano central con el Ecuador, Para el hemisferio SUR a este punto se le da un valor de "10.000.000" de metros para el eje Y, y de "500.000" metros para el eje X.



En las siguientes imágenes se observa al país representado bajo el punto de vista del huso 18 y bajo el punto de vista del huso 19, se observan en ellos diferencias en las coordenadas UTM, esto es porque según la definición de cada Huso, el origen del eje X está 500 km al oeste del meridiano central que le da origen, por eso el territorio expresado en Huso 19 tiene valores del orden de 300.000, porque en ese huso el territorio está en el comienzo de ese huso, en cambio si se observa bajo el huso 18, las coordenadas X tienen valores del orden de 700.000, porque el país estaría en la parte final del huso 18.



Al ver los dos husos en un mapa, el huso 18 está a la izquierda (oeste) del huso 19, y así es en la realidad, pero al colocar datos sobre un mapa en un SIG, las coordenadas de estos quedan en su valor absoluto y los puntos del huso 18 pasan al lado derecho de las del 19. Esto es normal y es simple de entender porque al representar una nube de puntos en ambos husos sobre un mapa que tiene un eje cartesiano, las coordenadas del huso 18 son mayores en magnitud que las del huso 19. Por lo tanto quedan a la derecha.

Un dato muy importante es que la **divisoria de Huso entre 18 y 19 es el meridiano 72**, este meridiano es el que divide los Husos.

## **V.- METODOS DE CAPTURA DE COORDENADAS**

La DGA siempre ha solicitado la ubicación de las solicitudes y derechos a los usuarios, antiguamente muchos años atrás solo bastaba con ubicaciones pictóricas que permitían a los técnicos DGA visitar el punto, es decir solo bastaba una dirección o descripción de cómo llegar y encontrar el punto, el problema de este método es que no puede ser almacenado en un sistema y que este lo tome y lo visualice en un mapa, por eso paulatinamente se comenzó a exigir que los usuarios entregaran las coordenadas de sus puntos, pero las formas de obtención de coordenadas no estaban normadas y esta libertad provocó que los usuarios obtuvieran las coordenadas de diferentes formas, las cuales afectaban a la calidad de estas.

➤ **Obtención de coordenadas a través de un mapa.**

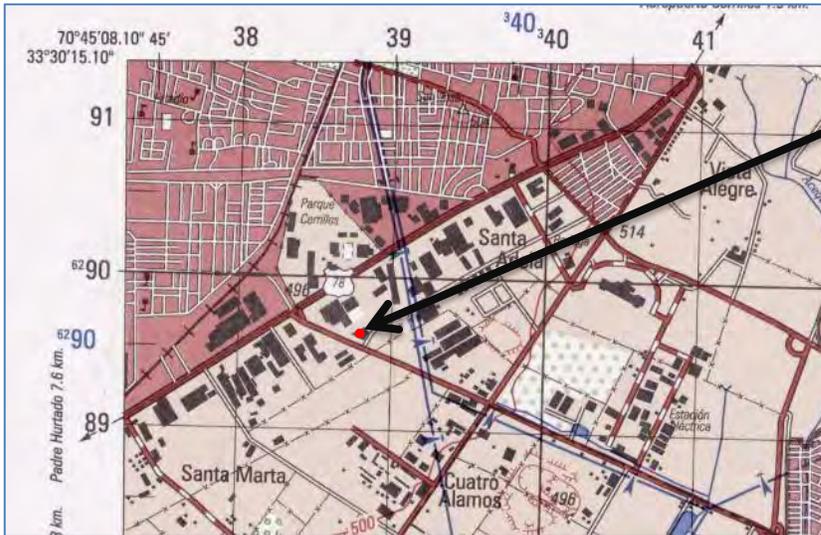
Consiste en ubicar el punto de interés en una cartografía, este método depende exclusivamente de la habilidad de la persona que realiza el procedimiento, y la exactitud estará determinada también por la escala del mapa, por lo tanto mientras más Grande sea la escala mejor será el resultado, en Chile las cartografías regulares que pueden permitir la extracción de coordenadas de un punto son las de Escala 1:50.000 y 1:25.000 del Instituto Geográfico Militar (IGM), escalas más pequeñas (1:250.000 – 1:500.000) no se recomiendan en ningún caso para estos fines.

El problema es que por muy bueno que sea el operador este método siempre estará limitado por las limitaciones propias de la escala, ya que dibujar un punto solo con la punta de un lápiz sobre un mapa, este punto en la realidad abarca varios metros, (desde 10 a 50 metros) y a esto se suma que lo más probable es que el punto buscado (un pozo por ejemplo) nunca aparece en el mapa representado, si no que más bien el usuario interpreta la ubicación de su punto mediante objetos conocidos que están en el terreno y que si aparecen en el mapa representados, como una intersección de calles, un río y la intersección de quebradas, caminos, construcciones, etc. Por lo tanto esta interpretación en el mapa puede ocasionar varios metros de desplazamiento.

En las siguientes imágenes se muestra un ejemplo de este método a través de la obtención de coordenadas de un punto en dos mapas de escalas diferentes 1:50.000 y 1:25.000.

El método de obtener las coordenadas desde un mapa es a través de un Escalímetro, (regla graduada según escalas determinadas). Y también se puede usar regla de tres, pero en definitiva este método está asociado a medidas que el operador debe realizar sobre el mapa.

Mapa a escala 1:50.000. Datum wgs84



El punto que se desea obtener coordenadas esta en este lugar.

En este caso dan valores de: Este = 338.730 metros, Norte = 6.289.720 metros.

Para el segundo mapa que está a una escala de 1:25.000, Datum SAD69 se rescatan de la misma forma.



El Mismo punto Anterior en este mapa queda aproximadamente en este lugar

Y dan valores aproximados de: Este= 338.810, Norte= 6.289.780

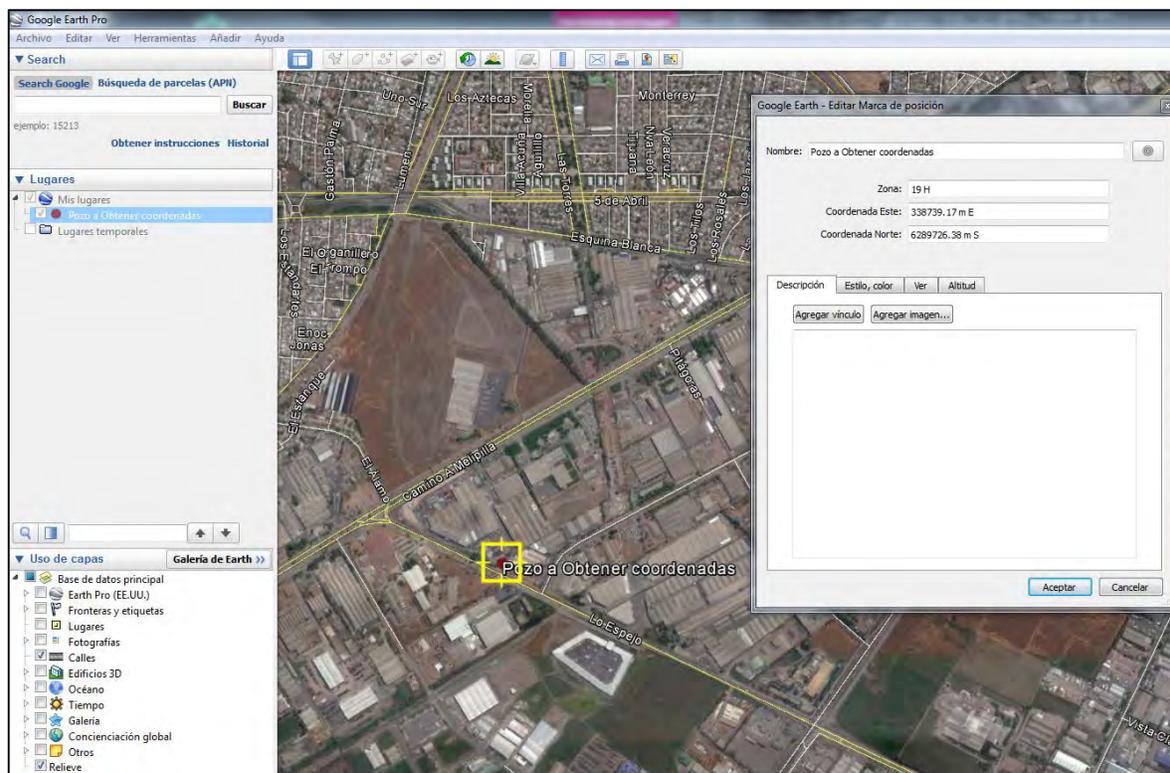
La primera conclusión es que ambos mapas están en Datums distintos, uno está en WGS84 y el otro en SAD 69, por eso tanta diferencia, pero lo más importante es que el error más grande puede estar dado por la mala ubicación del punto en el mapa ya que esta es una interpretación del usuario, y es difícil ubicar un punto que no se ve en el mapa. En este caso el punto está cercano a una carretera o camino principal, por eso se puede situar en el sector, pero no deja de ser difícil su interpretación.

Este método de obtención de coordenadas debe evitarse y tener claro que el resultado de este es solo referencial.

➤ Obtención de coordenadas a través de una Aplicación Informática como Google Earth

Actualmente es una buena forma de obtener coordenadas, sin embargo en sus inicios (año 2003 a 2007) no lo era ya que en esa época las imágenes de fondo tenían errores serios de georreferencia, aproximadamente a partir del año 2008 Google corrigió estos problemas y le dio un carácter más profesional a Google Earth, por lo tanto las medidas tomadas desde entonces son de una calidad aceptable, (menores a 10 metros)

De este modo siguiendo el ejemplo anterior.



Este es un método bastante aceptable ya que eventualmente se puede observar en la imagen el punto de interés porque las imágenes de fondo están correctamente referenciadas en la actualidad y son de buena resolución, pueden aparecer las obras de infraestructura de un pozo o una captación, además como la herramienta ofrece manipular el zoom, se puede ubicar de manera confiable el punto deseado. Finalmente por ser una aplicación moderna el Datum empleado es WGS84. Por lo tanto, si este método se aplica bien y se ubica de manera correcta el punto, las coordenadas resultantes son de calidad.

➤ **Obtención de coordenadas a través de GPS**

La obtención de las coordenadas a través de equipos GPS es la forma más común y confiable de capturar coordenadas de un punto, pero a pesar de eso, también está afecta a una cantidad enorme de errores, la razón, es que los GPS es una tremenda y gigante tecnología que tiene muchas aristas y que habitualmente es muy desconocida. Entonces para poder entender bien este método valga hacer un paréntesis con todas las implicancias que conlleva usar tecnología GPS.

**SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)**

El Sistema de Posicionamiento Global, (GPS), por sus siglas en inglés, es un sistema de posicionamiento Espacial – terrestre, basado en una constelación de satélites que rodea a la tierra y que transmite señales que son recibidas por equipos receptores en la tierra, los que triangulan de acuerdo a estas señales la posición geográfica en donde se encuentran.



La red de satélites “GPS” fue inventada a fines de los años 70’s con fines militares por el departamento de defensa de los Estados Unidos de Norteamérica, pero su uso civil fue creciendo paulatinamente, hasta convertirse en una poderosa e imprescindible herramienta para la navegación y la industria en general.

Tal ha sido el éxito de esta tecnología que diversas potencias han implementado sus propias redes o constelaciones de satélites, ya que como la primera fue confeccionada con fines militares, esta era operativa y manejada solo por EEUU y sus aliados.

De este modo las constelaciones de satélites de las distintas potencias son:

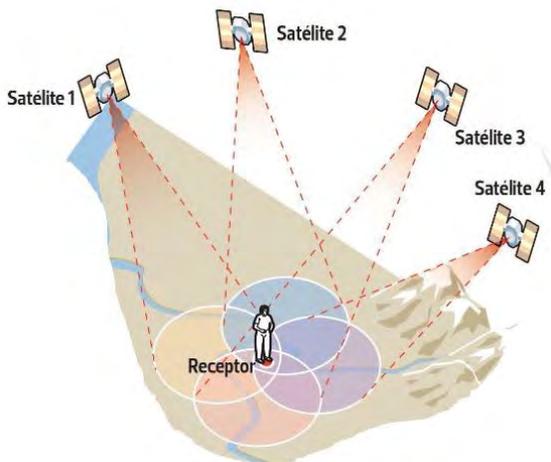
SISTEMA	AÑO	ORGANIZACIÓN / PAIS	Nº SATELITES
<b>TRANSIT</b>	1967	Armada Estados Unidos	6
<b>NAVSTAR–GPS</b> (Navigation System and Ranging).	1978 1995	Departamento de Defensa Estados Unidos <sup>27</sup>	27 (24 operativos, 3 respaldo)
<b>GLONASS</b> (Global Navigation Sputnik System)	1982 1996	Federación Rusa	24 (21 operativos, 3 respaldo) 19 operativos (24 cob. mundial)
<b>GALILEO</b>	2005 2015	Unión Europea	30
<b>BEIDU COMPASS</b>	2011 - 2020	China	30

### **Funcionamiento de GPS.**

El funcionamiento de las redes de GPS en términos simples consiste en una serie de satélites que rodean a la tierra y que envían una señal que es recibida por equipos receptores, estos equipos al recibir las señales de al menos tres satélites distintos pueden triangular y obtener la posición geográfica, ya con cuatro satélites puede además obtener la altitud. (Aunque esta corresponde a la altitud geoidal la cual puede ser muy diferente a la altitud sobre el nivel medio del mar).

La triangulación que realizan los equipos receptores tiene como principio el tiempo que se demora la señal en llegar desde el satélite hasta el equipo receptor, por lo tanto el principal eje tecnológico para que toda la tecnología GPS funcione, es que la hora de los satélites este muy bien sincronizada entre ellos, y eso se logra gracias a que todos los satélites poseen relojes atómicos, a

su vez dentro de la señal que envían los satélites se envía la hora en que la señal sale del satélite y el receptor es capaz de calcular cuánto tiempo se demora dicha señal en viajar desde el satélite hasta el equipo en tierra, con este dato el equipo receptor GPS calcula la distancia que hay entre él y el satélite de este modo este proceso si lo realiza con al menos tres satélites, y gracias además a que la posición de los satélites en el espacio es conocida se obtiene la posición geográfica del equipo receptor, y ya con cuatro satélites puede obtener la altitud geoidal.



En Particular la tecnología GPS se compone en tres grandes partes:

- **Segmento Espacial:** Corresponde a las características físicas del sistema. Numero de satélites, características de ellos, altura y orbita.
- **Segmento de Control:** Corresponde a estaciones de control dispuestas en diversas partes del mundo, con ellas se monitorea el funcionamiento y orbita de los satélites y a través de ellas se pueden corregir ciertos parámetros de su funcionamiento.
- **Segmento de Usuario:** Corresponde a la totalidad de usuarios del sistema y a los equipos receptores, los cuales son los que calculan la posición geográfica.

Cada uno de estos segmentos son muy amplios y muy complejos en su funcionamiento, para los fines de este informe escapan a los objetivos profundizar en ellos.

### Consideraciones y posibles fuentes de error en la toma de datos con GPS

El sistema GPS, en términos teóricos es simple de entender, pero en términos prácticos su funcionamiento es sumamente complejo, ya que la teoría se ve afectada por una serie de factores que redundan en errores en las mediciones.

Estos errores se pueden agrupar en tres grupos:

- Errores propios del satélite:
- Errores Originados por el medio de propagación.
- Errores en la recepción.

#### **Errores propios del satélite:**

**Errores Orbitales o de efemérides**, son los errores que se producen en la órbita del satélite, esta es constantemente monitoreada y corregida por las estaciones de control. Y para el usuario son desconocidos.

**Errores del reloj**, son los errores propios de los relojes atómicos, son de muy baja magnitud y generalmente son corregidos por las estaciones de control.

**Errores de geometría**: este tipo de errores tienen que ver con la posición geométrica que tienen los satélites en el espacio durante la captura de posición del equipo receptor, y significa que la disposición de los satélites en el espacio afecta la calidad de la medición. Este tipo de error también es conocido como *dilación de precisión de geometría*. Y existen cuatro tipos de dilación.

- PDOP: Dilación de la Posición para la posición.
- HDOP: Dilación de precisión Horizontal.
- VDOP: Dilación de precisión Vertical.
- TDOP: Dilación de la precisión del Tiempo.

Cada una de estas dilaciones son consideradas en los equipos, y algunas son expresadas en metros por los equipos receptores. Y dependiendo de la marca y modelo muestran este error en porcentajes o en metros, pero este mensaje por parte de los equipos es referencial, en estricto rigor el equipo GPS, "sabe" que se equivoca pero no tiene como saber cuánto.

La configuración geométrica ideal se da cuando la posición relativa entre satélites forma ángulos agudos. Esto quiere decir que los satélites estén bien distribuidos en el cielo del equipo receptor, idealmente cubriendo toda la rosa de los vientos. Por el contrario una configuración geométrica pobre está dada por posiciones de los satélites alineados en una sola línea.

Este error es muy común y puede significar centenares de metros de desplazamiento y se da principalmente en valles, entre las montañas o cauces de ríos, en estos lugares la orientación de los Cordones montañosos que rodean al valle impiden que se "vean" los satélites y solo deja a la vista los satélites que siguen la línea del valle, esas mediciones están afectas a errores muy grandes (centenas de metros)

La mejor manera de evitar o minimizar este tipo de errores es realizar varias mediciones a distintas horas, y promediarlas y ojala excluir aquellas con desviación estándar mayor.

## **Errores Originados por el medio de propagación.**

### **Errores de Refracciones Ionosféricas y Troposféricas**

Los equipos GPS reciben señales que viajan a la velocidad de la luz, pero esta es constante solo en el vacío del espacio, y varía cuando atraviesa las capas de la atmósfera terrestre, produciéndose refracciones atmosféricas. Estos errores significaban varios metros de desfase, sin embargo afectaban principalmente a los equipos GPS en sus orígenes, ya que con el avance de la tecnología se fueron desarrollando modelos de corrección atmosférica que fueron paulatinamente incorporados a los equipos, y en la actualidad este error está prácticamente resuelto en todos los equipos receptores.

### **Error por Ruta Múltiple**

Consiste en el rebote de las señales que reciben los equipos receptores, las señales pueden rebotar en montañas, edificios y otros obstáculos, estas señales llegan más tarde al equipo y lo “confunden” teniendo como resultado varios metros de error. Las maneras de evitarlo es hacer varias mediciones en distintas horas, para así disponer de una mejor geometría de satélites. Y también con el avance de la tecnología hay equipos que no son afectados, esto gracias a mejoras significativas en las antenas y gracias a métodos que identifican las señales directas de las que rebotan filtrándolas antes de procesarlas. Este tipo de error se manifiesta con más frecuencia en ciudades con edificios altos.

## **Errores en la recepción.**

Son los errores que son relativos al método de medición y a las características propias de los equipos receptores, es decir un equipo navegador simple, tomara medidas y la calidad de estas dependerán de la calidad del equipo navegador y de las características propias de su fabricación, que redundan en buenas capacidades para poder filtrar los ruidos de las señales, en este punto toma especial relevancia el precio de los equipos porque mientras más caro sea, significa que trae de fábrica capacidades diferentes para medir es decir pueden traer mayor n° de frecuencias y canales que recibe, capacidad de trabajar con diversas constelaciones como glonass, aplicaciones de software post proceso, etc.

Con respecto al método los equipos GPS Navegadores simples no pueden realizar el método de obtención de posición “diferencial” ya que este es un método que necesita “amarrar” el equipo GPS que navega a un punto de referencia conocido, de esta forma ya sea por post proceso o corrección vía radio, las coordenadas que se obtienen son corregidas en virtud de ese punto de referencia conocido obteniendo así la posición más precisas que se pueden obtener con GPS. Este método es el utilizado por toda la industria en términos profesionales.

De este modo un equipo navegador de muy buena calidad puede llegar a tener errores que en suma pueden ser con facilidad de 10 a 60 metros. Y un equipo diferencial estará en el orden de milímetros de error.

### **Error de Disponibilidad Selectiva.**

El error de Disponibilidad Selectiva, no es un error en sí, es una distorsión en la señal introducida intencionalmente por el departamento de defensa de los estados unidos con el objeto de que solo los equipos GPS de uso militar pudieran a través de un código corregir esa degradación y así obtener ventaja militar sobre sus adversarios. El problema es que para el resto de usuarios de GPS esta degradación de la señal significaba **la Principal causa de error en las coordenadas obtenidas**, era un error aleatorio imposible de corregir en el post proceso o de manera directa, y era un error de bastantes metros.

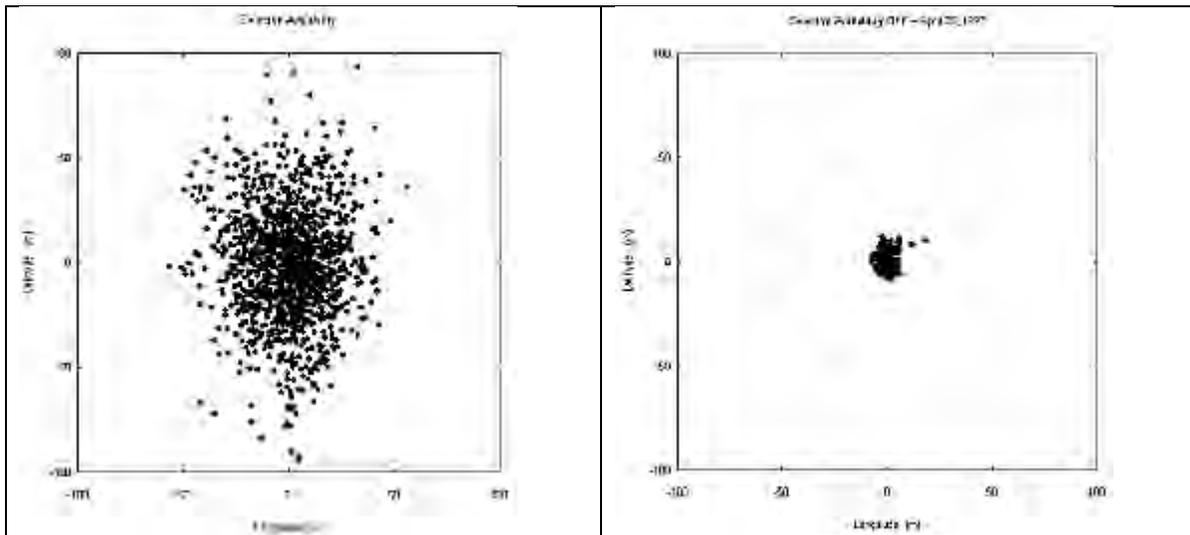
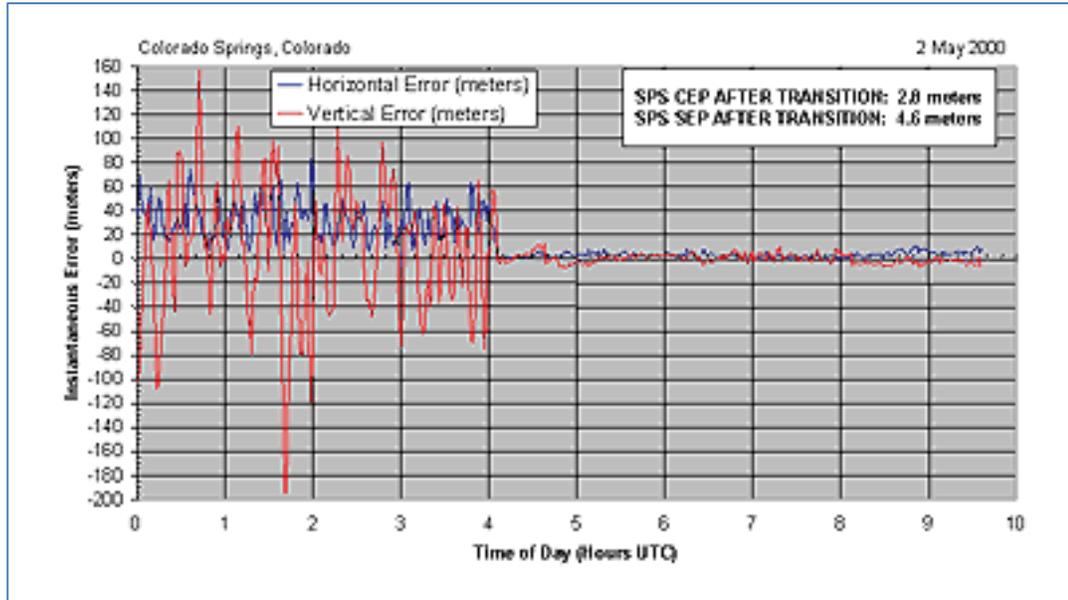
Pero el mundo civil ideó la forma de evadir este error intencional, a través de la invención del método diferencial, el cual ya fue mencionado en párrafos anteriores, y que básicamente significaba hacer dos mediciones al mismo tiempo:

- Se coloca un equipo en un punto de coordenadas ya conocidas y dejarlo ahí midiendo y grabando los datos de posición y hora exacta de la medición
- La otra medición se hace con otro equipo que navega obteniendo los puntos de interés, de esta forma el error intencional afecta a ambos equipos a la vez, y como uno tiene coordenadas conocidas se hace la diferencia entre las correctas y las que media la estación fija, de esta forma se obtiene el delta de error el cual se aplica a las coordenadas obtenidas con el equipo navegador, corrigiendo las medidas de este último.

Esto se puede hacer con software de post proceso, en la actualidad la tecnología ha evolucionado hasta el punto de que el post proceso ya no es necesario, se ingresan las coordenadas conocidas al punto de origen y este mide y calcula de inmediato el delta de error y lo comunica al navegador vía radio o a través de la red celular, corrigiendo en tiempo real la posición del equipo navegador, este método es actualmente utilizado por toda la industria. Ya que no solo sirve para corregir la Disponibilidad selectiva sino que también corrige la gran mayoría de los errores ya descritos.

La disponibilidad selectiva fue desactivada el **1 de mayo del año 2000**, precisamente porque ya no tenía mayor sentido aplicarla, el método diferencial al corregirla hacia que este error intencional ya no tuviera el efecto deseado. Pero para el mundo civil esta fecha marca un punto de inflexión ya que **todas las medidas anteriores a ella estaban afectas a este error y todas las medidas de coordenadas que se obtuvieron solo a través de navegadores pueden tener un error muy importante** y que fluctúa entre unos pocos metros hasta unos 120 metros. y no hay forma de determinar cuánto.

En las siguientes imágenes pueden apreciarse como la disponibilidad selectiva afectaba las mediciones.



Este error es muy importante ya que inmediatamente indica que todas las medidas hechas sin método diferencial con GPS antes del 01 de mayo del año 2000 están afectas a errores que pueden llegar a los 80 metros y eventualmente a pics de 120 metros.

Con esto se cierra el tema de captura de datos a través de GPS.

Volviendo al tema principal recordemos que las coordenadas son necesarias para ubicar los puntos de interés (pozos, captaciones) en un mapa. Antiguamente estos mapas estaban referidos a Datums Psad 56, entonces si las coordenadas eran obtenidas por GPS tenían que estar en ese Datum o bien si eran obtenidas por mapa, también tenían que estar en ese Datum. De esta forma se podían representar sin mayores problemas coordenadas cuyo Datum de origen era PSAD56 sobre un mapa en PSAD56, ya que los Datums de origen de ambos eran iguales.

Pero que pasa cuando el Datum de origen difiere del Datum del mapa?, en este caso es necesario hacer transformaciones de coordenadas. Llevándolas desde el Datum de origen al Datum del mapa.

## **VI.- TRANSFORMACIÓN DE COORDENADAS.**

Las transformaciones de coordenadas son necesarias para hacer coincidir el Datum de origen de una medición y poder llevarlas a un mapa que tiene Datums distinto.

Habitualmente las transformaciones son en el siguiente sentido:

- Datum PSAD56 a WGS84
- Datum SAD69 a WGS84.

Es decir datums locales hacia Datum Geocentrico. Este orden obedece simplemente a llevar las coordenadas de los datums más antiguos a los más modernos.

El Datum Oficial de Chile en la Actualidad es SIRGAS, pero como en la práctica la diferencia de el con WGS84 es menor al milímetro y como todas las aplicaciones a nivel mundial trabajan con WGS84 se asume como datum oficial el WGS84.

Durante mucho tiempo la transformación de coordenadas se hacía con software de carácter universal y no diseñado para el caso particular de Chile, lo que redundaba en errores que pueden ir desde 10 a 40 metros. y este **“la transformación” pasa a ser otra fuente de error en las coordenadas finales de un punto.**

Para evitar los errores en las transformaciones se deben usar los llamados parámetros locales en los software de transformación, y como algunos de ellos no los exigía de manera obligada en muchos casos se hicieron transformaciones y estas estaban afectos a los errores de no considerar los parámetros .locales.

Hoy en día los software de transformación modernos como los incorporados en el SIG ARCGIS solicitan como datos obligados la incorporación de dichos parámetros locales, por lo tanto transformar coordenadas con el comando “proyectar” de ARCGIS asegura buenos resultados siempre y cuando se utilicen los parámetros correctos de acuerdo a la Latitud del punto.

En la siguiente tabla se incorporan los parámetros locales del ARCGIS versión 10.0 se destacan en amarillo las aplicables a Chile.

<b>PSAD 56 hacia WGS84</b>		
<b>NOMBRE</b>	<b>CODIGO</b>	<b>APLICABLE EN:</b>
PSAD_1956_To_WGS_1984_1	1201	Bolivia, Chile, Colombia, Ecuador, Guyana, Peru, and Venezuela
PSAD_1956_To_WGS_1984_2	1202	Bolivia
PSAD_1956_To_WGS_1984_3	1203	Chile - Northern, near 19S
PSAD_1956_To_WGS_1984_4	1204	Chile - Southern, near 43S
PSAD_1956_To_WGS_1984_5	1205	Colombia
PSAD_1956_To_WGS_1984_6	1206	Ecuador
PSAD_1956_To_WGS_1984_7	1207	Guyana
PSAD_1956_To_WGS_1984_8	1208	Peru
PSAD_1956_To_WGS_1984_9	1209	Venezuela
PSAD_1956_To_WGS_1984_10	1582	Bolivia - Madidi
PSAD_1956_To_WGS_1984_11	1583	Bolivia - Block 20
PSAD_1956_To_WGS_1984_12	1811	Brazil - offshore Amazon cone
PSAD_1956_To_WGS_1984_13	1095	Venezuela
<b>SAD 69 Hacia WGS84</b>		
SAD_1969_To_WGS_1984_1	1864	Argentina, Bolivia, Brazil, Chile, Colombia, Ecuador, Guyana, Paraguay, Peru, Trinidad & Tobago, and Venezuela
SAD_1969_To_WGS_1984_2	1865	Argentina
SAD_1969_To_WGS_1984_3	1866	Bolivia
SAD_1969_To_WGS_1984_4	1867	Brazil
SAD_1969_To_WGS_1984_5	1868	Chile
SAD_1969_To_WGS_1984_6	1869	Colombia
SAD_1969_To_WGS_1984_7	1870	Ecuador
SAD_1969_To_WGS_1984_8	1871	Ecuador (Baltra, Galapagos)
SAD_1969_To_WGS_1984_9	1872	Guyana
SAD_1969_To_WGS_1984_10	1873	Paraguay
SAD_1969_To_WGS_1984_11	1874	Peru
SAD_1969_To_WGS_1984_12	1875	Trinidad and Tobago
SAD_1969_To_WGS_1984_13	1876	Venezuela
SAD_1969_To_WGS_1984_14	1877	Brazil

La versión de Arcgis Afecta ya que cambian por lo tanto en otras versiones se sugiere revisar la hoja de documentación de transformaciones que trae el ArcGis dentro del Directorio de Documentación.

El instituto Geografico Militar libero hace un par de años, un software de transformación muy bueno. Su nombre es simplemente "TRANSFORMACION DE DATUM" y el incorpora de manera automática los parámetros locales, y como es un software diseñado en Chile y Para Chile, hace que sea el mejor para estos efectos.

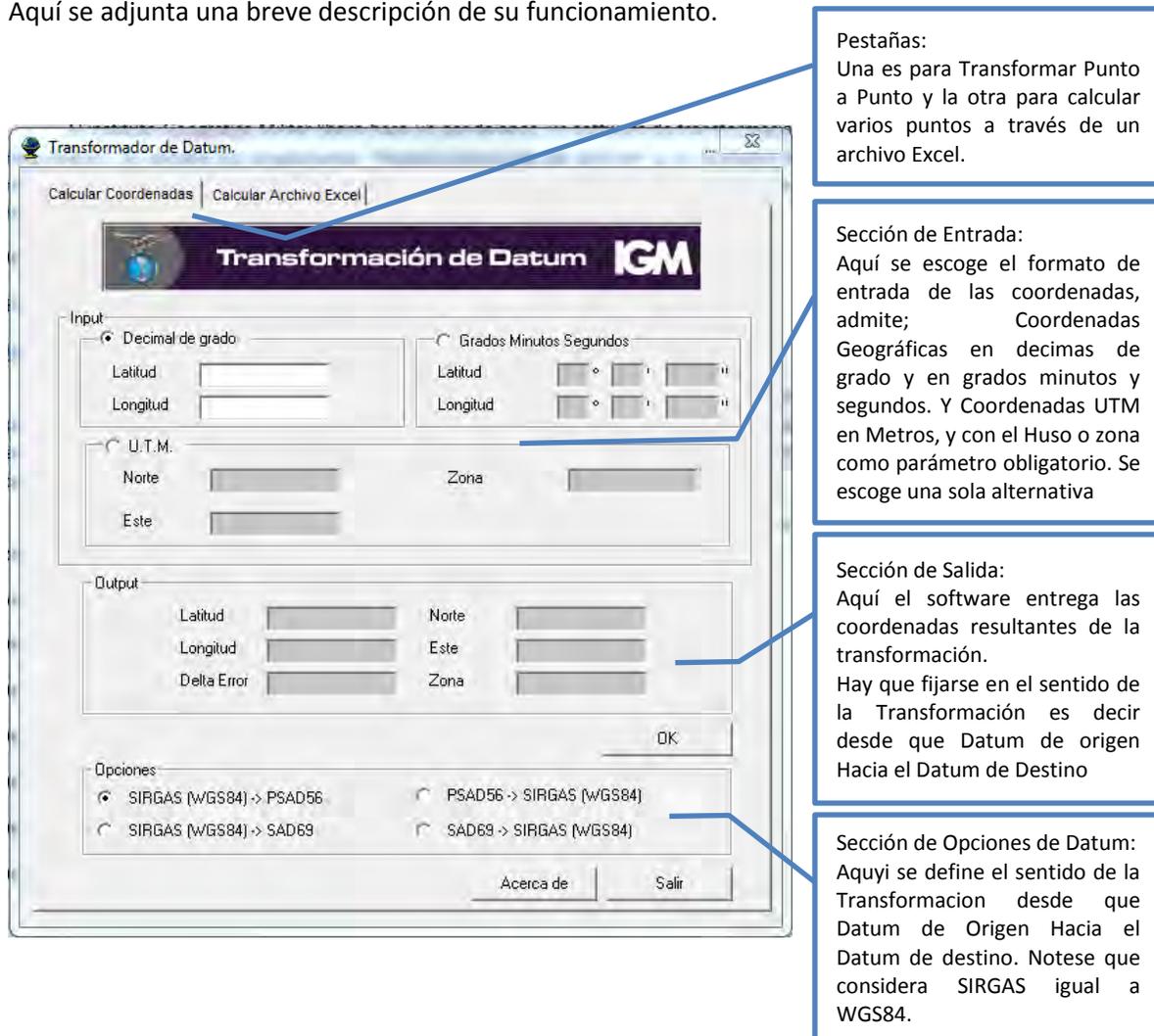
El link de descarga del programa DATUM es el Siguiente:

[http://www.igm.cl/descargas/INSTALA\\_DATUM\\_XP.zip](http://www.igm.cl/descargas/INSTALA_DATUM_XP.zip)

Una vez descargado se instala, y aquí hay que tener una pequeña precaución, este programa es de desarrollo antiguo, por lo tanto cuando se instala pregunta si desea "pisar" archivos dll más nuevos que están en el computador por unos más antiguos, aquí hay que decirle que guarde los ya instalados y que no pise dichos archivos.

El funcionamiento de este software no es muy amistoso, y es poco intuitivo, pero una vez descubierta la forma en que trabaja sus resultados son muy satisfactorios.

Aquí se adjunta una breve descripción de su funcionamiento.



The screenshot shows the 'Transformador de Datum' software interface. It features a menu bar with 'Calcular Coordenadas' and 'Calcular Archivo Excel'. The main window is titled 'Transformación de Datum IGM'. The interface is divided into several sections: 'Input' (with radio buttons for 'Decimal de grado' and 'Grados Minutos Segundos', and fields for Latitude and Longitude), 'U.T.M.' (with radio buttons for 'Norte' and 'Este', and a 'Zona' field), 'Output' (with fields for Latitude, Longitude, Delta Error, Norte, Este, and Zona), and 'Opciones' (with radio buttons for datum transformations like 'SIRGAS (WGS84) -> PSAD56'). Callout boxes provide detailed explanations for these sections.

**Pestañas:**  
Una es para Transformar Punto a Punto y la otra para calcular varios puntos a través de un archivo Excel.

**Sección de Entrada:**  
Aquí se escoge el formato de entrada de las coordenadas, admite; Coordenadas Geográficas en decimas de grado y en grados minutos y segundos. Y Coordenadas UTM en Metros, y con el Huso o zona como parámetro obligatorio. Se escoge una sola alternativa

**Sección de Salida:**  
Aquí el software entrega las coordenadas resultantes de la transformación. Hay que fijarse en el sentido de la Transformación es decir desde que Datum de origen Hacia el Datum de Destino

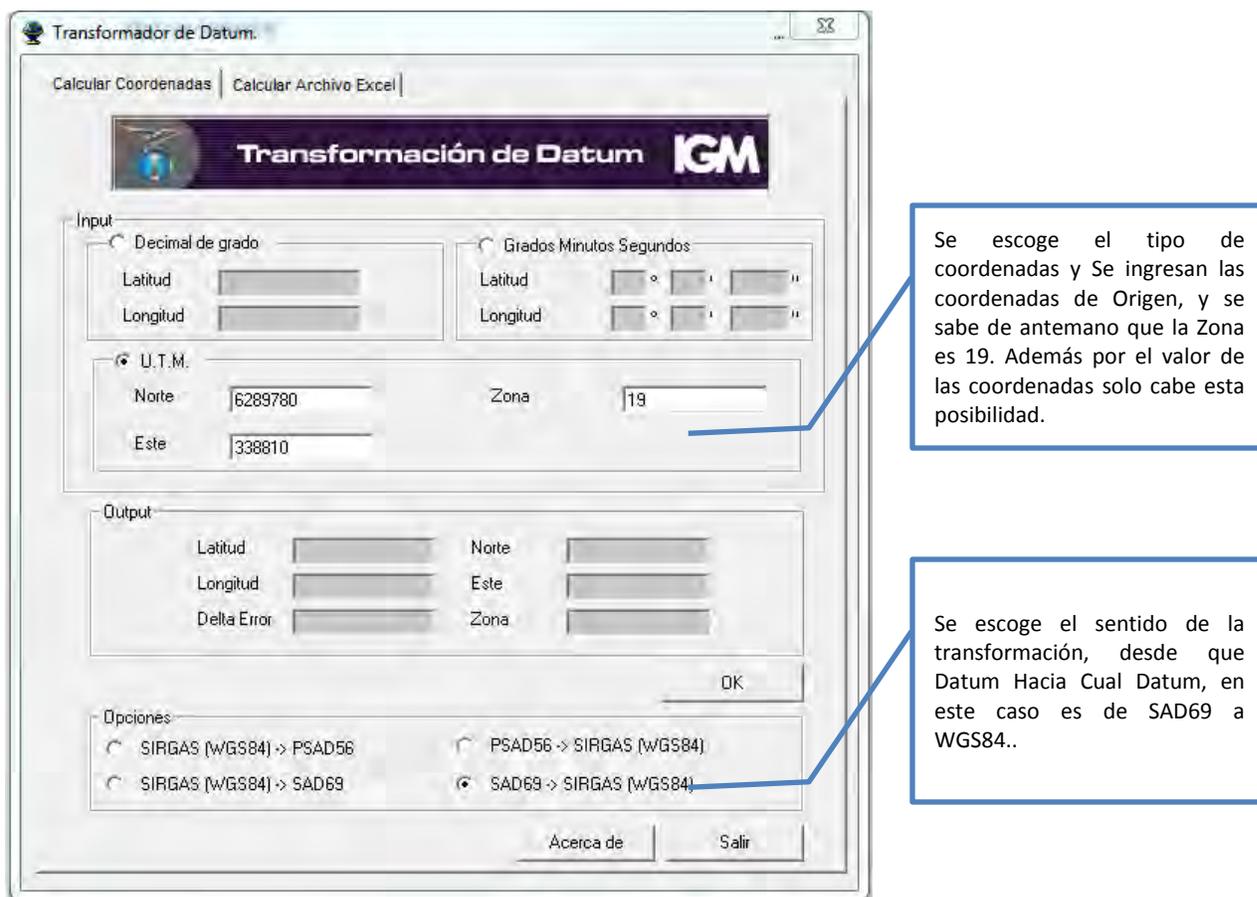
**Sección de Opciones de Datum:**  
Aqui se define el sentido de la Transformacion desde que Datum de Origen Hacia el Datum de destino. Notese que considera SIRGAS igual a WGS84.

Para Mejor comprensión un ejemplo.

Se tomaran como coordenadas de entrada las obtenidas en el Ejemplo de captura de Coordenadas a través de un Mapa, en la Pagina 11 de este informe, en este ejercicio las coordenadas dieron como resultado:

(X) Este: 338.810  
(Y) Norte= 6.289.780  
DATUM SAD69.

Entonces aplicando estos datos al Programa:

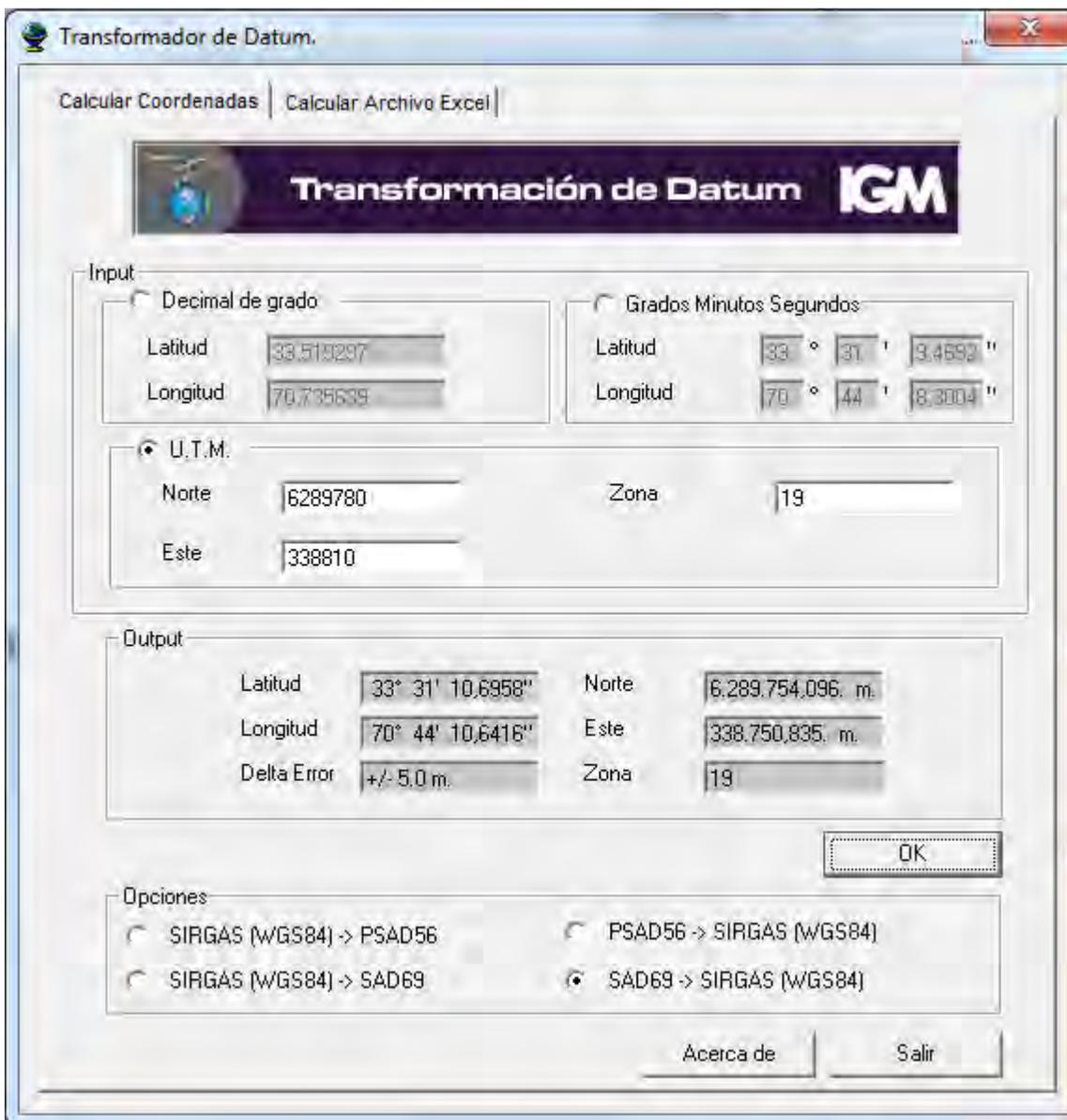


Para Obtener el resultado se presiona el Botón OK.

En este punto podemos reflexionar que el programa tiene un problema de diseño, ya que el resultado está entre dos alternativas de ingreso de información como son las coordenadas de entrada y las opciones de datum. Los resultados y el botón OK deberían estar al Final del cuadro. Y se menciona esto porque esto tiende a confundir. Y en vez de apretar el botón OK se tiende a SALIR del programa.

Al darle OK se obtienen las coordenadas de resultado en formato de Coordenadas Geográficas en grados minutos y segundos y además en Coordenadas UTM indicando la zona.

Pero también se llenaron de manera automática los valores de entrada para los formatos de decimal de grado y grados minutos y segundos.



En nuestro caso de ejemplo las coordenadas que nos interesan son las UTM de salida que quedaron de la siguiente forma.

(X) Este: 338.751  
(Y) Norte= 6.289.754  
DATUM WGS84

Al comparar estas coordenadas con las otras obtenidas a través del mapa en WGS84 y en Google Earth. (página 11 y 12)

<b>METODO</b>	<b>ESTE</b>	<b>NORTE</b>
Mapa Papel en Wgs84	338.730	6.289.720
Mapa SAD69 Transformada con Programa Datum a WGS84	338.751	6.289.754
Sacada de Google Earth	338.739	6.289.726

Con estos datos ya se pueden obtener algunas conclusiones:

- Se asume como la mejor medida la realizada con Google Earth.
- La medida obtenida sobre el mapa WGS84, evita errores de transformación, pero al ser una escala menor se incrementa el error producto de interpretar bien donde está el punto.
- La medida obtenida sobre el Mapa SAD 69 resulta ser la peor medida, esto puede deberse a que se interpretó erróneamente la ubicación del punto sobre el mapa, además aquí se agrega un error de transformación que el Software de transformación estimo en +- 5 metros.

Finalmente la sección del Software que transforma Archivos Excel es muy poco intuitiva pero se puede hacer llenado una planilla en Excel y cada columna del Excel tiene que tener su correspondencia en las columnas que solicita el software. La verdad es más sencillo llevar ese Excel a ARCGIS y desde ahí transformarlo.

## **CONCLUSIONES:**

El tema de las georreferencias es sumamente complejo y los errores en las coordenadas no están dadas por una sola variable, en general son la suma de muchas variables. En este informe se planteaba responder ciertas preguntas básicas:

- ¿Por qué coordenadas obtenidas hace años difieren tanto de las actuales? Si el punto medido no ha cambiado de posición.
- ¿A qué se deben estas diferencias?

La respuesta para estas dos preguntas ya se vienen discutiendo a través de todo este informe, pero se pueden resumir en que:

El método de captura de la Coordenada, si fue obtenida de un mapa ya se ven que pueden ser problemas de interpretación y también de transformación de coordenadas.

Si es una coordenada obtenida por GPS y esta es anterior a Mayo del año 2000 está medición esta afecta a la disponibilidad selectiva, y es 100% seguro que está mal.

- ¿Cómo se pueden solucionar?

No existe una solución absoluta, habría que investigar cada caso, cual es el origen o fuente de las coordenadas y de acuerdo a eso actuar, en algunos casos que hubieron transformaciones volver hacerlas considerando parámetros locales, en otros simplemente no hay mucho que se pueda hacer, salvo ir a terreno y tomar nuevamente las coordenadas y con ello corregir las de origen.

En estricto Rigor es más sencillo y certero ir a terreno y obtener nuevamente las coordenadas.

Guillermo Tapia Molina.  
Cartógrafo.