



ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO
AMBIENTE**

**PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:
INGENIERO GEÓGRAFO Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**“CÁLCULO DE COORDENADAS DE ALTA PRECISIÓN
MEDIANTE EL USO DE SOFTWARE CIENTÍFICO
GAMIT/GLOBK EN LINEAS BASE MAYORES A 100
KILOMETROS”**

REALIZADO POR:

SERGIO DANILO ANDRADE SAMPEDRO

SANGOLQUÍ – ECUADOR

ENERO DEL 2012

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRAFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

CERTIFICADO

Nosotros: DR. ALFONSO TIERRA e ING. MARCO LUNA.

CERTIFICAN

Que, el Proyecto de grado titulado “CALCULO DE COORDENADAS DE ALTA PRECISIÓN MEDIANTE EL USO DE SOFTWARE CIENTÍFICO GAMIT/GLOBK EN LÍNEAS MAYORES A 100 KM”, realizado por el señor SERGIO DANILO ANDRADE SAMPEDRO ha sido revisado prolijamente y cumple con los requerimientos: teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la ESPE, por lo que nos permitimos acreditarlo y autorizar su entrega al Sr. Ing. Francisco León L., en su calidad de Director de la Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente. El trabajo en mención consta de dos empastados y dos discos compactos el cual contienen el documento en formato portátil de Acrobat (pdf).

Sangolquí, 27 de Enero de 2012

DR. ALFONSO TIERRA.
DIRECTOR

ING. MARCO LUNA.
CODIRECTOR

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRAFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, Sergio Danilo Andrade Sampedro

DECLARO QUE:

El proyecto de grado titulado “CÁLCULO DE COORDENADAS DE ALTA PRECISIÓN MEDIANTE EL USO DE SOFTWARE CIENTÍFICO GAMIT/GLOBK EN LÍNEAS MAYORES A 100 KM”, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, 27 de Enero de 2012

Sergio Danilo Andrade Sampedro

A U T O R I Z A C I Ó N

Yo, Sergio Danilo Andrade Sampedro

Autorizo a la Escuela Politécnica del Ejército la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del proyecto de grado titulado “CÁLCULO DE COORDENADAS DE ALTA PRECISIÓN MEDIANTE EL USO DE SOFTWARE CIENTÍFICO GAMIT/GLOBK EN LÍNEAS MAYORES A 100 KM” cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, 27 de Enero del 2012

Sergio Danilo Andrade Sampedro

RESUMEN

La precisión y exactitud de los puntos determinados en Tierra han sido para estudios con fines científicos y prácticos una constante preocupación, y gracias a grandes progresos tecnológicos e informáticos se han podido realizar avances en las técnicas de posicionamiento logrando alta precisión y exactitud. Para lo cual en el presente proyecto se logró procesar mediante el uso de software científico GAMIT/GLOBK información correspondiente a las estaciones de Arequipa, Bogotá, Brasil, Riobamba por un periodo de observación de 19 semanas a partir de la semana GPS 1632. Obteniéndose como resultados de las observaciones procesadas, exactitudes menores a los ± 2 cm al ser comparadas con las coordenadas cartesianas geocéntricas finales publicadas por parte de SIRGAS y precisiones menores a los ± 2 mm. Se determinó bajo un análisis las seis líneas base conformadas por las cuatro estaciones anteriormente mencionadas, determinándose un error máximo de aproximadamente 6 mm en la distancia, la cual corresponde a la línea base de mayor longitud con 3675 km entre la estación de RIOP (Ecuador) y BRAZ (Brasil), con lo cual se pudo determinar la relación directamente proporcional del error y la distancia.

SUMMARY

The precision and accuracy of points on Earth have been determined for studies with scientific and practical purposes a constant concern, and thanks to great technological advances and computer scientists have been able to make progress in positioning techniques to achieve high precision and accuracy. To which in this project process was achieved through the use of scientific software GAMIT / GLOBK information for the stations of Arequipa, Bogotá, Brazil, Riobamba by an observation period of 19 weeks from GPS week 1632. Obtained as results of observations processed, lower accuracies to ± 2 cm when compared with the final published geocentric Cartesian coordinates by SIRGAS and lower precision to ± 2 mm. Analysis was determined under the six baselines formed by the four stations mentioned above, determining a maximum error of approximately 6 mm in the distance, which corresponds to the longest baseline to 3675 km from the station RIOP (Ecuador) and BRAZ (Brazil), which could be determined directly proportional error and distance.

DEDICATORIA

Consagro todo el esfuerzo y empeño a mis Padres Sergio y Ximena, puesto que sin ellos esto no hubiese sido posible, ya que día a día me demuestran con valores y principios como se logran los objetivos y me animan e impulsan a soñar más alto. He aprendido con el paso del tiempo que en cada triunfo a lo largo de mi vida ustedes siempre me acompañan y prometo no defraudarlos.

A mamá Dermita, a quien considero mi segunda madre y siempre ha estado pendiente y al cuidado de mí toda mi vida, ya que gracias a ella tengo un espejo lleno de virtudes y nobleza en que reflejarme.

A mi Tía Paty, quien siempre ha velado por mí, por sus sabios consejos entregados y por todo el amor y confianza que me ha dado en toda mi vida.

A mi Hermana Jessy, quien me ha comprendido mis inmadureces todo el tiempo y ha sido mi compañera todos estos años de quien me siento muy orgulloso.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la vida y por brindarme el privilegio de tener a mi familia.

A mis padres ya que gracias a su gran esfuerzo me han podido brindar una buena educación a lo largo de mi vida y les agradezco por demostrarme día a día su amor, ya que con cada gesto me hacen sentir muy importante para ustedes, los Amo.

A mamá Dermita por estar siempre al cuidado de mi y ser el nexo que articula y armoniza a toda mi gran familia muchas gracias mamita.

A mi tía Paty por ayudarme siempre que me meto en apuros, por mimarme y hacerme sentir siempre muy bien.

A mi hermana Jessy con quien he compartido aventuras desde niños y ser mi compañera de toda la vida, adelante mi hermanita el tiempo pasa volando y pronto serás toda una profesional.

A mi enamorada Karen, por acompañarme el poco tiempo que tenemos libre para compartir los dos y comprenderme en mis malos y buenos momentos.

A mi enorme y querida familia con quien puedo contar en las buenas y malas, ya que ustedes siempre han sido nuestro soporte y a quienes siempre acudimos.

A mi Director de Tesis, Doctor Alfonso Tierra, por el apoyo incondicional brindado a lo largo de todo el proyecto y más aún por ser un gran ejemplo a seguir a nivel personal como a nivel profesional, gracias por sus sabios consejos y por compartir sus conocimientos e impartir la semilla de la investigación.

A mi Codirector, Ing. Marco Luna, por el apoyo incondicional brindado en el proyecto. Por levantarme cuando empecé a zozobrar durante el proyecto y ser un ejemplo a nivel personal y profesional.

Al Dr. Robert King del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), departamento de La Tierra, Atmósfera y Ciencias Planetarias (Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences) , por proporcionarnos el software científico GAMIT/GLOBK para su uso en esta investigación.

A mi buen amigo David por el gran afecto a distancia y su sincera amistad.

A los luchitos (Wilman, Lenin, Pato, Emilio) gracias por su amistad muchachos y mis queridas amigas locas (Tefa, Maria Alicia, Adry, Marina, Delia, Shirley).

A mis compañeros de tesis del centro de investigaciones espaciales (Christian, Ricardo, Andrea), gracias por su tiempo y conocimientos compartidos.

INDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1: ASPECTOS GENERALES.....	1
1.1.- Introducción.....	1
1.2.- Objetivo General.....	2
1.3.- Objetivos Específicos.....	2
1.4.- Justificación.....	2
1.5.- Metas.....	3
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	4
2.1.- Generalidades.....	4
2.2.- Sistemas de Referencia.....	6
2.2.1.- Definición de Sistemas de Referencia.....	6
2.2.2.- Sistemas celestes.....	6
2.2.3.- Sistemas Terrestres.....	10
2.2.4.- International Terrestrial Reference System – ITRS (Sistema de Referencia terrestre Internacional).....	13
2.3.- Marcos de Referencia.....	13
2.3.1.- International Terrestrial Reference Frame - ITRF (Marco de Referencia Terrestre Internacional).....	13
2.3.2.- Transformaciones de coordenadas de distintos ITRF.....	15
2.3.3.- Fenómenos que permiten establecer la vinculación entre el sistema de referencia celeste y el terrestre.....	28
2.3.4.- Revisión de las principales técnicas de medición utilizadas...	30
2.4.- Fenómenos que deben ser modelados en la materialización de los sistemas de referencia moderno.....	42
2.4.1.- Movimiento de Placas Global.....	43

2.4.2.-	Efecto de mareas de la Tierra sólida.....	46
2.4.3.-	Efecto de los océanos.....	47
2.4.4.-	Presiones atmosféricas.....	47
2.4.5.-	Mareas del Polo.....	48
2.4.6.-	Efectos postglaciales.....	48
2.4.7.-	Efectos locales y regionales.....	49
2.4.8.-	Efectos No físicos.....	49
2.5.-	Componentes del GNSS.....	52
2.5.1.-	GLONASS.....	52
2.5.2.-	GALILEO.....	54
2.5.3.-	GPS.....	58
2.6.-	Archivo SINEX.....	86
CAPÍTULO 3: PROCESAMIENTO DE LÍNEAS BASE.....		87
3.1.-	Planificación del proyecto.....	87
3.2.-	Software GAMIT-GLOBK.....	88
3.3.-	Procesamiento automático con GAMIT/GLOBK.....	89
3.4.-	Archivos de entrada y de salida de GAMIT/GLOBK.....	91
3.5.-	Características generales de procesamiento según la guía para los centros de análisis SIRGAS.....	93
3.6.-	Resultados.....	95
3.7.-	Análisis de los resultados.....	106
CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		113
4.1.-	Conclusiones.....	113
4.2.-	Recomendaciones.....	114
CAPÍTULO 5: REFERENCIAS.....		116
ANEXOS.....		121

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Parámetros Elipsoidales de Hayford.....	10
Tabla 2.2 Parámetros de Transformación desde ITRF2000 a Sistemas anteriores.....	18
Tabla 2.3 Parámetros de transformación del ITRF2005 al ITRF2000.....	19
Tabla 2.4 Parámetros de transformación entre los marcos ITRF2008 e ITRF2005.....	20
Tabla 2.5 Parámetros de transformación del IGS05 al ITRF2005.....	22
Tabla 2.6. Parámetros Elipsoidales del GRS80.....	23
Tabla 2.7 Características comparativas entre las combinaciones lineales Más usadas.....	73
Tabla 3.1 Archivos de entrada y salida del software GAMIT/GLOBK.....	92
Tabla 3.2: Coordenadas Cartesianas procesadas por el software GAMIT/GLOBK pertenecientes a la estación de Arequipa.....	95
Tabla 3.3: Coordenadas Cartesianas procesadas por el software GAMIT/GLOBK pertenecientes a la estación de Bogotá.....	95
Tabla 3.4: Coordenadas Cartesianas procesadas por el software GAMIT/GLOBK pertenecientes a la estación de Brasil.....	96
Tabla 3.5: Coordenadas Cartesianas procesadas por el software GAMIT/GLOBK pertenecientes a la estación de Riobamba.....	97
Tabla 3.6: Coordenadas cartesianas finales de la estación Arequipa.....	97
Tabla 3.7: Coordenadas cartesianas finales de la estación Bogotá.....	98
Tabla 3.8: Coordenadas cartesianas finales de la estación Brasil.....	99
Tabla 3.9: Coordenadas cartesianas finales de la estación Riobamba.....	99
Tabla 3.10: Distancias euclidianas a partir de coordenadas procesadas Con GAMIT/GLOBK.....	101

Tabla 3.11: Distancias euclidianas a partir de coordenadas finales publicadas por SIRGAS.....	102
Tabla 3.12: Diferencia entre coordenadas cartesianas finales publicadas de SIRGAS con coordenadas cartesianas procesadas con software científico GAMIT/GLOBK correspondientes a la estación de Arequipa.....	103
Tabla 3.13: Diferencia entre coordenadas cartesianas finales publicadas de SIRGAS con coordenadas cartesianas procesadas con software científico GAMIT/GLOBK correspondientes a la estación de Bogotá.....	103
Tabla 3.14: Diferencia entre coordenadas cartesianas finales publicadas de SIRGAS con coordenadas cartesianas procesadas con software científico GAMIT/GLOBK correspondientes a la estación de Brasil.....	104
Tabla 3.15: Diferencia entre coordenadas cartesianas finales publicadas de SIRGAS con coordenadas cartesianas procesadas con software científico GAMIT/GLOBK correspondientes a la estación de Riobamba.....	105
Tabla 3.16: Diferencia de vectores a partir de coordenadas finales y vectores de coordenadas procesadas por GAMIT/GLOBK expresado en milímetros.....	106
Tabla 3.17: Resultados estadísticos de las diferencias entre coordenadas finales oficiales de SIRGAS respecto a las coordenadas procesadas con software científico GAMIT/GLOBK.....	107
Tabla 3.18: Resultados estadísticos de las diferencias entre Líneas Base (vectores) a partir de coordenadas finales y coordenadas procesadas por GAMIT/GLOBK.....	108

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Sistemas de Referencia Geocéntrico y Clásico.....	11
Figura.2.2. Ubicación de las estaciones SIRGAS95.....	24
Figura.2.3. Ubicación de las estaciones SIRGAS2000.....	25
Figura.2.4. Ubicación de las estaciones SIRGAS-CON.....	27
Figura 2.5. Técnica VLBI.....	31
Figura 2.6. Red Global de estaciones VLBI participantes en el IVS.....	33
Figura 2.7. Red Global de estaciones SLR participantes del ILRS.....	37
Figura 2.8. Red de rastreo GPS permanentes del IGS.....	39
Figura 2.9. Sistema DORIS.....	41
Figura 2.10. Red global de balizas DORIS.....	42
Figura 2.11. GALILEO System Architecture.....	56
Figura 2.12. Escalas relevantes para el posicionamiento diferencial.....	64
Figura 2.13. Ventaja de la solución de ambigüedades enteras en función de la longitud de la sesión.....	77
Figura 3.1. Ubicación de las estaciones de monitoreo continuo del IGS utilizadas para el procesamiento	87
Figura 3.2. Estaciones procesadas y sus respectivas líneas base.....	109
Figura 3.3: Distancia en Km vs Error en mm tomando como centro a la estación RIOP.....	110
Figura 3.4: Distancia en Km vs Error en mm tomando como centro a la estación AREQ.....	111
Figura 3.5: Distancia en Km vs Error en mm tomando como centro a la estación BRAZ.....	112

GLOSARIO

AU: Del acrónimo International Astronomical Union

BIH: La Oficina Internacional de Tiempo, ubicada en el Observatorio de Paris, fue la Oficina Internacional responsable de la combinación de diferentes mediciones de la hora universal. También desempeñó un papel importante en la investigación del mantenimiento del tiempo. En 1987 se hizo cargo del International Bureau of Weights and Measures – BIPM y del International Earth Rotation and Reference Systems Service - IERS

Datum: Se define como el punto tangente al elipsoide y al geoide, donde ambos son coincidentes.

Elipsoide: Es el resultado de revolucionar una elipse sobre uno de sus ejes de simetría.

EOP: Describen las irregularidades de la rotación de la Tierra. Técnicamente, son los parámetros que dan la rotación del ITRS con respecto al International Celestial Reference System (ICRS) como una función del tiempo

Exactitud: Calidad o característica de un dato de ajustarse perfectamente al dato real.

FK5: El acrónimo es **Fifth Fundamental Catalog** el cual contiene 1.535 estrellas distribuidas a lo largo de todo el cielo, su propósito es proveer estrellas de referencia estándar para determinar las posiciones de otras estrellas.

Geocentro: Centro de masas de la Tierra.

GNSS: Global Navigation Satellite System, es una constelación de satélites que transmite rangos de señales utilizados para el posicionamiento y localización del receptor de un usuario en cualquier parte del globo terrestre. Las Instituciones que están operando con GNSS son GPS y GLONASS. Otro GNSS planeado para el futuro es Galileo de Europa

GRS80: Es un sistema geodésico de referencia que consiste de un elipsoide de referencia mundial y un modelo de campo de gravedad.

IERS: Del acrónimo International Earth Rotation and Reference Systems Service

ITRF: Acrónimo de International Terrestrial Reference Frame

Modelo matemático: Es uno de los tipos de modelos científicos, que emplea algún tipo de formulismo matemático para expresar relaciones, proposiciones sustantivas de hechos, variables, parámetros, entidades y relaciones entre variables y/o entidades u operaciones, para estudiar comportamientos de sistemas complejos ante situaciones difíciles de observar en la realidad.

Precisión: Se refiere a la dispersión del conjunto de valores obtenidos de mediciones repetidas de una magnitud. Cuanto menor es la dispersión mayor la precisión.

NGA: Es parte del Departamento de Defensa de los Estados Unidos de Norte America y un miembro de la Comunidad de Inteligencia nacional (IC, Intelligence Community). Esta Agencia desarrolla imágenes y soluciones de inteligencia a base de mapas para la defensa estadounidense y la seguridad de navegación.

NNRNUVEL-1A: Es un modelo internacional estándar del Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF) que describe las velocidades de los puntos en la superficie terrestre debido al movimiento de placas tectónicas.

TCG: Del acrónimo Tiempo Coordinado Geocéntrico.

TT: Terrestrial Time, es un tiempo moderno estándar astronómico definido por la Unión Astronómica Internacional, principalmente para las mediciones de tiempo de las observaciones astronómicas realizadas desde la superficie de la Tierra.

CAPITULO 1: ASPECTOS GENERALES

1.1.- Introducción

Al analizar el concepto tradicional de marco de referencia se lo define como una red de puntos, con coordenadas determinadas, con una cierta precisión en el sistema de referencia correspondiente, el cual se definía localmente mediante el empleo de un datum geodésico determinado por un elipsoide, tres parámetros que determinaban el origen y tres parámetros que determinaban la orientación.

Es crucial el mencionar que actualmente en contraposición al concepto clásico, los marcos de referencia modernos se basan en un grupo de coordenadas geocéntricas tridimensionales (como ser ITRF).

Con respecto a las técnicas utilizadas en las mediciones geodésicas y topográficas, es notorio el gran avance realizado de manera que permiten apreciar variaciones en sus determinaciones que de forma pasada quedaban ocultas.

Por lo cual vale recalcar que varios de los fenómenos escritos a continuación están ligados directamente con la precisión con que se obtengan las coordenadas procesadas, que si bien es cierto, para fines prácticos o de ingeniería no son tomados en cuenta en muchos de los casos, pero que al tratarse de un fin científico, es vital el tomar en cuenta dichos factores, así:

- La época de referencia.
- Los modelos de movimiento de placas tectónicas¹.
- Las velocidades de las estaciones terrestres.
- Los modelos de mareas terrestres y oceánicas,
- Distintas realizaciones de un determinado sistema de referencia, etc.

Todos estos temas son abordados en esta tesis, desarrollando un procedimiento para procesar coordenadas de alta precisión con el uso de un software científico (GAMIT/GLOBK). (Virginia MacKern, 2003)

1.2.- Objetivo General

Calcular coordenadas de alta precisión mediante el uso de software científico GAMIT/GLOBK en líneas base mayores a 100kilómetros.

1.3.- Objetivos Específicos

- Definir el Marco y época de referencia a ser utilizado
- Definir líneas base a grandes distancias a ser procesadas
- Obtener coordenadas da alta precisión con el software científico GAMIT/GLOBK
- Analizar los resultados de post proceso con el software científico GAMIT/GLOBK

1.4.- Justificación

El presente trabajo parte de la nueva conceptualización para describir las principales técnicas de medición utilizadas, desarrollando principalmente los conceptos básicos del posicionamiento satelital con GPS, se analizan los fenómenos que condicionan la precisión y las principales diferencias entre un procesamiento de tipo científico y uno estándar.

¹ Es un fragmento de litosfera que se mueve como un bloque rígido sin presentar deformación interna sobre la astenósfera (zona del manto terrestre que esta inmediatamente debajo de la litosfera) de la Tierra.

El elegir un software diseñado de tal forma que adopte las nuevas variables existentes mostradas de forma anterior es importante. Ya que el adoptar un software que a nivel de usuario permita intervenir en procesos elementales a diferencia de los estándar, implica resultados más confiables y precisos.

El software GAMIT/GLOBK acata las políticas de gobierno y el decreto 1014 que establece como política pública para las entidades de la administración Pública Central la utilización de software libre en sus sistemas y equipamientos informáticos.

1.5.- Metas

- Definir al Marco SIRGAS con el ITRF actual y época actual.
- Al menos 2 líneas base compensadas que se encuentren a distancias mayores a 100 km.
- Un manual con la metodología para el procesamiento de coordenadas de alta precisión.
- Coordenadas con precisiones mayores a 2 cm. en las coordenadas cartesianas geocéntricas.
- Generar un cuadro comparativo de validación de resultados.
- Analizar mediante un cuadro ilustrativo, el error existente de la línea base respecto a la estación de monitoreo RIOP, con respecto a las distancias en los vectores.

CAPITULO 2: MARCO TEORICO

2.1.- Generalidades

La noción de sistema de referencia espacial es en general familiar. Parece natural que a cada punto del espacio se le pueda asociar un conjunto de coordenadas que definan su posición en forma unívoca y universal. Sin embargo, definir y poder usar un sistema de referencia en la realidad física no es trivial. Durante casi toda la historia del hombre, la necesidad de dar coordenadas a puntos se limitaba a un grupo de pocas pero relevantes aplicaciones como ser la navegación y en menor medida la delimitación de propiedades.

En el ámbito de la ciencia, el desarrollo de los sistemas de referencia estuvo ligado a la Geodesia, en relación con problemas tales como la determinación de la forma y dimensiones de la Tierra, y a la Astronomía, en que se persigue la validación de teorías físicas o su refinamiento a partir de mediciones de las posiciones de objetos celestes. Fue finalmente el interés por la navegación en el último cuarto del siglo XX el que aportó los recursos que resultaron en el desarrollo actual de los sistemas de referencia terrestres.

Antes de la era espacial, distintos sistemas de referencia, apropiados a las necesidades arriba mencionadas, se desarrollaron independientemente; En la Astronomía se encaró el problema de la forma más general, ya que para esta ciencia se presentaba de la forma más compleja; desarrollar sistemas de referencia que sirvieran para expresar las posiciones de los objetos celestes que eran observadas desde la Tierra. Esto requiere conocer suficientemente bien los movimientos de la Tierra como para expresar las posiciones de objetos y observadores respecto de un sistema inercial, que permita una descripción sencilla de fenómenos físicos de interés, como por ejemplo el movimiento orbital de los planetas. Estas investigaciones dieron un gran impulso al conocimiento de la rotación terrestre.

Debido a que en Astronomía se pueden medir direcciones a los objetos con mucha exactitud pero no las distancias hasta ellos, los sistemas de referencia celestes solamente definen la orientación de los ejes coordenados, pero no definen la escala, siendo asimismo la posición del origen del sistema prácticamente arbitraria. Paralelamente, la geodesia clásica desarrolló para sus fines, sistemas de referencia terrestres que, debido a las limitaciones de las técnicas disponibles, mantenían una exactitud aceptable en regiones de a lo sumo algunos cientos de kilómetros y encontraban un obstáculo insalvable en los océanos. En la mayoría de los países se utilizaron estos sistemas de referencia como base para el ordenamiento de la información catastral y la cartografía.

A fines de la década del '50, el comienzo del uso de los satélites artificiales, y más tarde, la disponibilidad de relojes muy precisos, marcaron un punto de inflexión en la historia de los sistemas de referencia. Las órbitas de los satélites materializan naturalmente el centro de masa de la tierra como uno de los focos de sus órbitas. Los relojes atómicos permitieron la medición del tiempo de propagación de ondas electromagnéticas entre dichos vehículos y la Tierra, con precisión mejor que un nanosegundo. Estas herramientas, sumadas a las ya existentes y complementadas por la disponibilidad de computadoras cada vez más veloces, dieron lugar a la construcción de una nueva generación de sistemas de referencia en la Astronomía y la Geodesia. En particular ya no puede hablarse de ellos como entes separados siendo que cada uno necesita del otro para poder ser materializado con la exactitud que las herramientas de medición actuales requieren. Los nuevos sistemas terrestres son por naturaleza globales, su orientación en el espacio proviene mayormente de los sistemas celestes de la Astronomía, mientras que su escala y origen son aportados por determinaciones de posiciones de satélites artificiales.

Los sistemas de referencia modernos han alcanzado una precisión de pocos centímetros. Esto requiere no solamente modelar el movimiento de la Tierra en el espacio, sino también tener en cuenta movimientos mucho más sutiles pero que afectan en forma notoria a las posiciones de las estaciones de observación terrestres. Así ha sido necesario, por ejemplo, complicar el modelo de corteza

terrestre: el uso de un modelo de corteza terrestre rígida ocasionaría la imposibilidad de integrar observaciones realizadas con algunos años de diferencia en el mismo sitio sin degradar el sistema ya que las placas tectónicas tienen movimientos y deformaciones del orden de algunos centímetros por año. Esto obliga a un replanteo de lo que se considera como corteza terrestre, ya que al estar en movimiento es preciso separar a este de la rotación terrestre propiamente dicha. Los nuevos sistemas de referencia impulsan el conocimiento de la geodinámica global aportando mediciones directas de las velocidades de deriva de las placas tectónicas e incluso detectando deformaciones regionales en los márgenes activos de los continentes, donde estas son más intensas (Juan Moirano, 2000).

2.2 Sistemas de Referencia

2.2.1.- Definición de Sistemas de Referencia

Un Sistema de referencia es una estructura geométrica para referir las coordenadas de puntos en el espacio, queda definido por la ubicación del origen, las direcciones de los ejes, la escala, los algoritmos necesarios para sus transformaciones espaciales y temporales y las constantes utilizadas en las definiciones y correcciones del mismo (Curso Avanzado de Sistemas de Posicionamiento por Satélite, 2006). Según Drewes (2009), el Sistema de Referencia define constantes, convenciones, modelos y parámetros, que sirven como base necesaria para la representación matemática de cantidades geométricas y físicas.

2.2.2.- Sistemas celestes

En la definición de los Sistemas Celestes, el modelado de la estructura física depende del tipo de realización. Existen dos tipos de realizaciones mayormente utilizadas: dinámicas y cinemáticas. Ambas han sido empleadas en Astronomía para la definición de sistemas de referencia. Las definiciones cinemáticas sin embargo han cobrado un indiscutible predominio a partir del establecimiento de nuevos métodos de medición, en especial la técnica VLBI por sus siglas en inglés lo cual, para el español significa (Interferometría de muy larga base).

- En la realización dinámica:

Se utilizan los modelos dinámicos de movimiento baricéntrico o geocéntrico de distintos objetos celestes como los planetas, la luna y los satélites artificiales. En este tipo de realización un Sistema Celeste Convencional se define por el modelado del movimiento de los objetos, a través de la adopción de un cierto número de parámetros fundamentales.

En el caso de los planetas, el modelado contiene las constantes astronómicas de la Unión Astronómica Internacional, relativas a la dinámica del sistema solar y en lo que concierne a la Luna, el modelado comprende el movimiento orbital de su centro de masa y su rotación. Utilizando el modelado de movimientos de un satélite artificial se comprenden los modelos de todas las fuerzas que actúan sobre el satélite: como la acción del campo de gravedad de la Tierra, de la Luna, del Sol y de los planetas, el fricción atmosférica, la presión de radiación, etc.

Es importante hacer notar que las aproximaciones ocasionadas al introducir estos modelos, tienen como consecuencia que en realidad no se define un Sistema Inercial Ideal. Esta es la razón por la cual se utiliza el término cuasi-inercial para caracterizar a tales sistemas celestes. Un sistema cuasi-inercial se define como un sistema donde el origen tiene un movimiento arbitrario con respecto al sistema inercial pero sus ejes son paralelos a los del sistema inercial.

- En la realización cinemática:

Se utilizan las direcciones de objetos cuasi-puntuales, galácticos o extragalácticos, que son identificados por la emisión electromagnética, tanto en el campo óptico como en el de radio. La Astronomía óptica utiliza las estrellas de la galaxia y VLBI utiliza la radio frecuencias galácticas (en el caso de estrellas) o extragalácticas (en el caso de los cuásares). En el caso de objetos extragalácticos tales direcciones se consideran fijas y la orientación del Sistema Celeste Convencional se define sin ambigüedades.

Existen diferentes Marcos de Referencia Celestes Convencionales así se tiene:

- *Marcos estelares*: Se definen en los catálogos estelares (como el FK5). Las posiciones de estrellas están dadas en un Sistema de coordenadas ecuatoriales (ascensión recta y declinación), donde el eje de las Z es la dirección del polo celeste. Debido a que la posición del polo celeste cambia en función del tiempo por causa de los efectos de precesión y de nutación, las coordenadas de las estrellas son válidas sólo para una época dada (Juan Moirano, 2000). Si bien los movimientos propios están dados en el catálogo, los errores del modelo de precesión y nutación limitan la precisión del mismo.
- *Marcos extragalácticos*: La posición relativa de fuentes de radio se determina por la técnica VLBI. Estos marcos de referencia están definidos por los catálogos de radio fuentes, válidos también para una época de referencia. Las posiciones de las fuentes se expresan en coordenadas ecuatoriales. La precisión de estos catálogos depende de la configuración de las redes de radio telescopios, de la frecuencia de observación y de la estructura de cada fuente. El nivel de precisión es del orden de una milésima de segundo de arco (0,001").
- *Marcos dinámicos*: Los marcos celestes dinámicos se definen por las efemérides de objetos celestes tales como los planetas, la Luna y ciertos satélites artificiales. Las efemérides de la Luna se pueden obtener del análisis de observaciones realizadas por las técnicas de telemetría láser Lunar (LLR) por sus siglas en inglés. Para el caso de satélites artificiales, las efemérides se determinan por las técnicas de posicionamiento geodésico (Doppler, Telemetría Láser, GPS, etc.). El Marco dinámico definido por estas efemérides se obtiene de adoptar, para cada satélite, un modelo de movimiento donde intervienen las diferentes fuerzas que actúan sobre el mismo.

La realización del Sistema de Referencia Celeste Internacional (ICRF), sigue las recomendaciones de la IAU de 1991 y 1992 (McCarthy, 1992), el Sistema de Referencia Celeste Internacional (ICRS) se materializó mediante el marco de

referencia homónimo (ICRF) determinado por el IERS. El Marco de Referencia Celeste Internacional (ICRF) se determina por un catálogo de coordenadas ecuatoriales (ascensiones rectas y declinaciones) de radio fuentes extragalácticas referidas a la época J2000, calculadas considerando que no haya movimiento propio de la red. Actualmente consta de aproximadamente 600 ascensiones rectas y declinaciones de radiofuentes extragalácticas.

Las mismas se determinan desde puntos pertenecientes a redes regionales o globales utilizando la técnica VLBI por lo menos dos veces por año. Si bien las direcciones de sus ejes son consistentes con las del catálogo FK5, el último marco de referencia celeste determinado por observaciones ópticas, el nuevo marco es mucho más exacto que el FK5.

La IAU recomendó que el plano principal del sistema convencional fuera cercano al del ecuador en la época J2000 y además que fuera consistente con el polo celeste establecido en el catálogo FK5.

La solución elegida consiste en utilizar un plano ecuatorial convencional para J2000.0 dado por los modelos de nutación de (Wahr, 1981), (Seidelmann, 1982) y las expresiones de la precesión dadas por (Lieske et al., 1977). Este ecuador en J2000.0 coincide con el que se puede determinar mediante el actual estado del arte de la técnica de medición y cálculo VLBI, al nivel de la exactitud de los modelos antes mencionados. Si se quiere trabajar con una exactitud, en las orientaciones, del orden de 1 mas (milisegundo de arco), se deben usar correcciones a los modelos que son calculadas y distribuidas en forma continua por el IERS.

El sistema FK5 se basa en mediciones ópticas, y tiene errores del orden de 50 mas, muy por encima de los errores internos del sistema actual. De todos modos, la diferencia entre los planos principales del sistema convencional elegido y del marco FK5 están dentro de la exactitud de este último. Esto permite combinar observaciones expresadas en ambos sistemas como si pertenecieran al mismo sin afectar la exactitud de las observaciones más antiguas. La recíproca no es válida.

En cuanto al origen de las ascensiones rectas, la IAU recomendó que coincidiera con el equinoccio dinámico para J2000.o. El IERS fijó la dirección del eje x del sistema mediante las ascensiones rectas medias de 23 fuentes provenientes de varios catálogos compilados usando las coordenadas FK5 de un objeto arbitrario (Arias et al., 1988). La incertidumbre de esta coordenada se estima en 80 mas^2 . Los sistemas dinámicos, realizados por medio de efemérides de planetas en el sistema solar son de exactitud inferior a los realizados por medio de coordenadas de radiofuentes extragalácticas.

2.2.3.- Sistemas Terrestres

- **Sistemas de Referencia clásico**

Si el origen de coordenadas del sistema está desplazado del Geocentro, se conoce como Sistema de Referencia Local, los cuales están referidos a datums locales y buscan el mejor acoplamiento del elipsoide de referencia a la zona de interés.

- **Provisional South American Datum 1956 – PSAD56**

Es un Sistema que tiene como elipsoide de referencia el Internacional de Hayford y como punto origen La Canoa ubicado en la República de Venezuela. Los parámetros geométricos del elipsoide de Hayford se muestran en la tabla 2.1

Tabla 2.1 Parámetros Elipsoidales de Hayford

Elipsoide Internacional de Hayford		
<i>a</i>	Semieje mayor (m)	6378388
<i>f</i>	Achatamiento	1/297

El elipsoide representa con mayor exactitud a la forma de la tierra ya que mediante este tiene una superficie de referencia de forma regular. Dicho elipsoide se obtiene haciendo girar una elipse meridiana en torno a su eje menor. Usualmente, un elipsoide biaxial es definido por el semieje mayor *a* y el achatamiento *f*.

² mas: milisegundos de arco

Siendo el achatamiento igual a:

$$f = \frac{a-b}{a} \quad (1.1)$$

Donde b es el semieje menor del elipsoide

- **Sistemas de Referencia Geocéntricos**

Estos Sistemas están referidos a datums geocéntricos, los cuales están asociados a elipsoides globales, que tienen su origen en el centro de masas de la Tierra ver. Figura 2.1

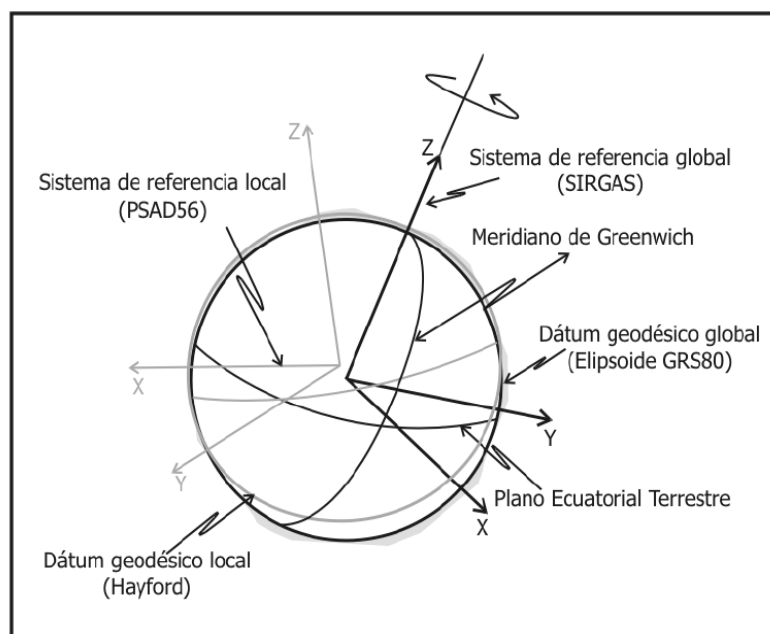


Figura 2.1. Sistemas de Referencia Geocéntrico y Clásico

Fuente: Leiva, 2003

Los Sistemas de Referencia deben permitir expresar las coordenadas de puntos sobre la corteza terrestre teniendo en cuenta sus movimientos relativos a lo largo del tiempo. El problema sería más sencillo si la Tierra fuera rígida, pero no es así, ya que además de deformarse el planeta como cuerpo, también lo hace la corteza. En consecuencia se debe definir el sistema ideal mediante ciertas condiciones

adicionales a fin de separar el movimiento de rotación terrestre, de los desplazamientos relativos de los puntos sobre la corteza donde se realizan las mediciones.

Esto puede lograrse por ejemplo exigiendo que la energía cinética total de la corteza sea mínima (min), como se expresa en la ecuación (1.2) (Juan Moirano, 2000).

$$\frac{1}{2} \left[\int_C \left[\frac{d\vec{r}}{dt} * \frac{d\vec{r}}{dt} \right] dS = \min \right. \quad (1.2)$$

Donde $d\vec{r}$ es el radio vector que va desde el origen del sistema terrestre a un punto sobre la porción dS de la superficie terrestre, con masa dm , siendo C la corteza terrestre, el dominio de integración. La condición anterior implica que la cantidad de movimiento (\vec{p}) y el momento cinético (\vec{h}) netos de la corteza sean nulos, como se expresa en la ecuación (1.3).

$$\vec{p} = \int_C \vec{v} * dm = \vec{0} \quad (1.3)$$

$$\vec{h} = \int_C \vec{x} \wedge \vec{v} * dm = \vec{0}$$

En la práctica se considera una aproximación, en la cual se reemplazan las integrales de la ecuación (1.3) por un número representativo de puntos de observación sobre la corteza en la ecuación (1.4).

$$\sum_{i=1}^n m_i * \vec{v}_i = \vec{0} \quad (1.4)$$

$$\sum_{i=1}^n m_i * \vec{x}_i \wedge \vec{v}_i = \vec{0}$$

Puede considerarse que ellos se mueven en forma independiente o que forman parte de un número finito de placas rígidas en movimiento. Por lo tanto además de los puntos elegidos, estos deben estar acompañados de los vectores velocidades que describen sus movimientos. Mayor información puede encontrarlo en Altamimi, 1990).

2.2.4.- International Terrestrial Reference System – ITRS (Sistema de Referencia Terrestre Internacional)

Es un sistema de referencia mundial espacial que co-gira con la Tierra en su movimiento diurno en el espacio. Es geocéntrico, el centro de masa se define para la Tierra entera, incluyendo los océanos y la atmósfera. La unidad de longitud es el metro, esta escala coincide con el TCG, tiempo coordinado para un marco geocéntrico local de acuerdo con las resoluciones de la *International Astronomical Union of Geodesy and Geophysics* – IUGG (1991), (McCarthy y Petit, 2004).

El IERS fue establecido conjuntamente por la IAU y la IUGG en 1988. Tiene por misión proveer al mundo científico y a la comunidad técnica valores de referencia para los *Parámetros de Orientación de la Tierra* – EOP que surgen al considerar el movimiento del polo y las variaciones de la velocidad de rotación de la Tierra. Para ello contribuyen técnicas espaciales geodésicas entre las que se incluye el GPS. Además El IERS supervisa la realización del ITRS. (IERS,2009).

2.3.- Marcos de Referencia

2.3.1.- International Terrestrial Reference Frame – ITRF (Marco de Referencia Terrestre Internacional)

Es un conjunto de puntos materializados en la superficie terrestre con coordenadas perfectamente determinadas en un sistema de coordenadas dado, cartesianas o geodésicas, conectado a un ITRS. Además está constituido por técnicas o medidas aplicadas en las observaciones y por los métodos de cálculo aplicados para la obtención de los parámetros.

Este Marco se refiere a una época determinada de observación ITRF_{yy} donde yy indican el último año cuyos datos fueron usados en la formación del ITRF. Un ejemplo de esto es el ITRF97, el cual fue creado en 1999 con los datos disponibles hasta 1998.

El ITRF viene determinado por una combinación de coordenadas y velocidades de una red de estaciones en la superficie de la Tierra calculadas por diversos centros de

análisis utilizando observaciones de técnicas geodésicas espaciales VLBI, SLR, LLR: en 1991 se introduce el GPS y en 1994 datos DORIS, o sus combinaciones realizadas por el IERS.

Cada técnica geodésica espacial proporciona su correspondiente conjunto de datos cuyo análisis da lugar a la realización de un marco de referencia. El ITRF final se obtiene por medio de una combinación de soluciones individuales realizada por el Centro de productos IERS. Para obtener coordenadas geodésicas debe utilizarse un elipsoide de referencia, el ITRF usa el elipsoide *Geodetic Reference System 1980 – GRS80* (Curso Avanzado de Sistemas de Posicionamiento por Satélite, 2006).

Las determinaciones del ITRF están afectadas por los siguientes factores (McCarthy y Petit.2004)

- Relaciones entre el ICRS y el ITRS tales como la velocidad de rotación de la Tierra.
- Las coordenadas a priori de las estaciones.
- El modelo de tectónica de placas utilizado para tener en cuenta las velocidades de las estaciones.
- El modelo geopotencial adoptado
- La constante de gravitación y la masa de la Tierra.
- El valor de la velocidad de la luz.
- Las mareas terrestres y oceánicas.
- La presión de radiación solar.
- El estado y marcha de los relojes.
- Los efectos atmosféricos
- Las variaciones de las antenas de los receptores, entre otros.

2.3.2 Transformaciones de coordenadas de distintos ITRF

Usualmente se plantean dos tipos de conversiones de coordenadas: conversiones de marco a marco y conversiones de época.

Como ejemplo, si se quieren comparar coordenadas de estaciones expresadas en ITRF93, época de referencia 1998.0 con otras expresadas en ITRF97 época 1997.0, primero se deben transformar las coordenadas ITRF93 a ITRF97 y luego transformar la época de las coordenadas resultantes de 1998.0 a 1997.0 usando las velocidades ITRF97.

Las transformaciones entre marcos de referencia se hacen en general utilizando la conocida transformación matricial de acuerdo a la ecuación (1.5) la cual se basa en la conocida Transformación de Helmert, generalizando, el modelo es el siguiente:

$$\begin{bmatrix} X_n \\ Y_n \\ Z_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_v \\ Y_v \\ Z_v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D & -R_z & R_y \\ R_z & D & -R_x \\ -R_y & R_x & D \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X_v \\ Y_v \\ Z_v \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

Donde T indica traslación en cada componente del marco viejo para llevarlo al nuevo, D es el factor de escala diferencial entre ambos marcos de referencia y R son las rotaciones alrededor de los ejes indicados del marco nuevo expresadas en radianes. Esta es una expresión aproximada de la transformación, válida para rotaciones pequeñas entre los marcos de referencia, condición que siempre se cumple entre los marcos de referencia globales provenientes de las técnicas geodésicas espaciales que aquí se mencionan.

La transformación de época implica el conocimiento del comportamiento cinemático del área de la estación cuyas coordenadas se desea transformar. Esta información está contenida en primera aproximación en algún modelo geofísico. Actualmente el modelo más utilizado es el modelo NNR-NUVEL1A adoptado en 1996 por el IERS como estándar, que divide a la superficie terrestre en 16 placas rígidas de rotación uniforme alrededor de sus polos de Euler. Este modelo representa un promedio de los movimientos de la corteza durante los últimos millones de años y es

aproximadamente coincidente con los resultados de las observaciones actuales. En particular, no predice bien los movimientos de los puntos cercanos a los bordes activos de las placas, donde se han observado deformaciones del orden de varios centímetros por año. Por lo anterior, en general la velocidad de un punto debe considerarse como se indica en la ecuación (1.6), donde el cero indica la época de definición del marco de referencia, \hat{v} indica la velocidad del punto debida a los movimientos tectónicos, el primer término del segundo miembro es la velocidad horizontal de la placa según el modelo NNR-NUVEL1A y el segundo es una velocidad residual que puede ser estimada junto con la posición si se cuenta con observaciones durante al menos unos pocos años en un determinado sitio.

$$\hat{v}_0 = \hat{v}_{placa} + \hat{v}_r \quad (1.6)$$

Existen en la actualidad modelos de placas que tienen en cuenta la información geodésica y consideran zonas de la corteza en que las placas son rígidas y otras en que hay deformaciones como se muestra por ejemplo en (Drewes, 1998).

- **Soluciones de ITRFs**

La historia del ITRF comienza en 1984 con una solución llamada BTS84 realizada por *Buren International de l'Heure* – BIH usando una combinación de observaciones VLBI, SLR, LLR y Doppler/TRANSIT, luego el BIH realizó otros tres BTS hasta el BTS87. En 1988 fue creado el IERS quien se encarga de las siguientes realizaciones del ITRF. Existen 11 versiones del ITRF publicadas por el IERS: ITRF88, 89, 90, 91, 92, 94, 96, 97, combinada 96+97,2000 y 2005. (Curso Avanzado de Sistemas de Posicionamiento por Satélite, 2006). Las soluciones de ITRFs que se encuentran vinculadas al presente estudio a continuación (ITRF, 2009):

- **ITRF94**

El ITRF94 se obtuvo de la siguiente manera (ITRF94 Report, 2009):

- El origen se define por una media ponderada de algunas soluciones SLR y GPS.
- La escala definida por una media ponderada de soluciones VLBI, SLR y GPS, corregido en 0,7 ppb (partes por billón) para satisfacer la exigencia de la IUGG y la UAI, para que haya compatibilidad en hora-marco con el TCG, en lugar de TT que utilizan los centros de análisis.
- La evolución del tiempo es consistente con el modelo geofísico NNRNUVEL-1A
- La orientación es consistente con el ITRF92

- **ITRF2000**

- La escala se la obtuvo por igualación a cero de la escala, por la razón de la escala de los parámetros entre ITRF2000 y la media ponderada del VLBI y por las soluciones SLR más consistentes. (ITRF2000, 2009)
- A diferencia de la escala del ITRF97 que se expresa en el marco del TCG, el del ITRF2000 se expresa en el marco TT.
- El origen se lo obtuvo por igualación a cero de los componentes de las traslaciones y las variaciones de las traslaciones entre ITRF2000 y la media ponderada de las soluciones SLR más consistentes.
- La orientación se la definió asegurando sitios del ITRF con geodesia de alta calidad. Las rotaciones están en el ITRF97, en época de referencia 1997.0 y fue alineado convencionalmente al modelo NNRNUVEL-1A

Los parámetros y sus variaciones de los ITRFs anteriores al ITRF2000, se muestran en la tabla 2.2:

Tabla 2.2. Parámetros de Transformación desde ITRF2000 a Sistemas anteriores

Parámetros de Transformación desde el ITRF2000 a Sistemas anteriores								
ITRF	Traslación			Rotación			Diferencia de Escala	Época de parámetros
	T_x (cm)	T_y (cm)	T_z (cm)	R_x (mas*)	R_y (mas)	R_z (mas)	δ (ppb**)	tk
Rates***	\dot{T}_x	\dot{T}_y	\dot{T}_z	\dot{R}_x	\dot{R}_y	\dot{R}_z	$\dot{\delta}$ (ppb/a)	
ITRF97	0,67	0,61	-1,85	0,00	0,00	0	1,55	1997
Rates	0,00	-0,06	-0,14	0,00	0,00	0,02	0,01	
ITRF96	0,67	0,61	-1,85	0,00	0,00	0	1,55	1997
Rates	0,00	-0,06	-0,14	0,00	0,00	0,02	0,01	
ITRF94	0,67	0,61	-1,85	0,00	0,00	0	1,55	1997
Rates	0,00	-0,06	-0,14	0,00	0,00	0,02	0,01	
ITRF93	1,27	0,65	-2,09	-0,39	0,80	-1,14	1,95	1988
Rates	-0,29	-0,02	-0,06	-0,11	-0,19	0,07	0,01	
ITRF92	1,47	1,35	-1,39	0,00	0,00	-0,18	0,75	1988
Rates	0,00	-0,06	-0,14	0,00	0,00	0,02	0,01	
ITRF91	2,67	2,75	-1,99	0,00	0,00	-0,18	2,15	1988
Rates	0,00	-0,06	-0,14	0,00	0,00	0,02	0,01	
ITRF90	2,47	2,35	-3,59	0,00	0,00	-0,18	2,45	1988
Rates	0,00	-0,06	-0,14	0,00	0,00	0,02	0,01	
ITRF89	2,97	4,75	-7,39	0,00	0,00	-0,18	5,85	1988
Rates	0,00	-0,06	-0,14	0,00	0,00	0,02	0,01	
ITRF88	2,47	1,15	-9,79	0,10	0,00	-0,18	8,95	1988
Rates	0,00	-0,06	-0,14	0,00	0,00	0,02	0,01	

*mas= milisegundo de arco (001").

**ppb= partes por billón (10^{-9}).

***Rates=variación de los parámetros.

Fuente: <ftp://itrf.ensg.ign.fr>

- **ITRF2005**

El origen del ITRF2005 se define de tal manera que los parámetros de traslación en la época 2000.0 son nulos, y las variaciones de las traslaciones entre el ITRF2005 y

las series de tiempo *International Laser Ranging Service* – ILRS y SLR son también nulas.

La escala del ITRF2005 se define de tal manera que el factor de escala es igual a cero en la época 2000.0, y de la razón de la escala es nula entre ITRF2005 y las series de tiempo *International VLBI Service* – IVS y VLBI. La combinación del ITRF2005 reveló una tendencia de la escala de 1ppb en la época 2000.0 y la razón de la escala ligeramente inferior a 0.1 ppb / año entre las series de tiempo SLR y VLBI. La selección del VLBI para definir la escala del ITRF2005 se justifica por la disponibilidad del historial de 26 años de observaciones del VLBI frente al SLR que solo cuenta con 13 años. La orientación del ITRF2005 se define de tal manera que los parámetros de rotación son nulos en la época 2000.0 y las variaciones de las rotaciones entre el ITRF2005 y el ITRF2000 también resultan nulas. (Altamini, Z. y C. Boucher, 2004).

Se debe tomar en cuenta que a partir de la semana 1400 ya no se utiliza el marco ITRF2005 puesto que está calculado con calibraciones de antenas relativas, y no sería coherente con las efemérides precisas de la época de las coordenadas a calcular. En la tabla 2.3, se muestran los parámetros de transformación en época 2000.0 y sus variaciones de ITRF2005 a ITRF2000 (ITRF2000 menos ITRF2005).

Tabla. 2.3. Parámetros de transformación del ITRF2005 al ITRF2000.

Parámetros de Transformación del ITRF2005 al ITRF2000								
	Traslación			Rotación			Diferencia de Escala	Época de parámetros
ITRF	T_x (cm)	T_y (cm)	T_z (cm)	R_x (mas)	R_y (mas)	R_z (mas)	δ (ppb)	tk
Rates	\dot{T}_x (cm/a)	\dot{T}_y (cm/a)	\dot{T}_z (cm/a)	\dot{R}_x (mas/a)	\dot{R}_y (mas/a)	\dot{R}_z (mas/a)	$\dot{\delta}$ (ppb/a)	
	cm/a	cm/a	cm/a	mas/a	mas/a	mas/a	ppb/a	
ITRF 2000	0,01	-0,08	-0,58	0,00	0,00	0,00	0,4	2000,0
Rates	-0,02	0,01	-0,18	0,00	0,00	0,00	0,08	

Fuente: www.itrf.ensg.ign.fr.

- **ITRF2008**

El marco ITRF2008, referido a la época 2005.0 ($t_0=2005.0$), se basa en el reprocesamiento de todas las series de observaciones de las cuatro técnicas espaciales utilizadas (VLBI entre 1980 y 2009, GPS/GNSS entre 1997 y 2009, SLR entre 1983 y 2009, DORIS entre 1993 y 2009), de manera que utilicen estándares actuales e idénticos y el mismo software para la reducción, modelización y corrección de observaciones (modelos de troposfera e ionosfera, centros de fase de emisión de los satélites y receptores, etc). De esta manera el marco ITRF conservará su definición a lo largo del tiempo en cuanto a origen, escala y orientación (se producirán series temporales de observaciones homogéneas), por lo que los estudios de deformación dinámica terrestre saldrán beneficiados (por ejemplo: es esencial para el estudio del nivel medio del mar y su variación global y regional que el marco de referencia se defina siempre igual). 608 estaciones situadas en 338 localizaciones diferentes constituyen el marco. El datum ITRF2008 se define de la siguiente manera:

- Origen: Parámetros de traslación nulos (en la época 2005.0) y variación nula de estos parámetros entre ITRF2008 y las series SLR.
- Escala: Factor de escala nulo (para la época 2005.0) y variación nula entre ITRF2008 y las series VLBI.
- Orientación: Parámetros de rotación nulos para los ejes (en la época 2005.0) y variaciones nulas entre ITRF2008 y ITRF2005 (en las estaciones ITRF seleccionadas).

Tabla 2.4. Parámetros de transformación entre los marcos ITRF2008 e ITRF2005.

TX (mm)	TY (mm)	TZ (mm)	D (ppb)	T \dot{x} (mm/año)	T \dot{y} (cm/año)	T \dot{z} (cm/año)	\dot{D} (ppb/año)
-0,5	-0,9	-4,7	0,94	0,3	0	0	0

Fuente: http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2008/tp_08-05.php

- **IGS05**

Internacional GNSS Service – IGS, es una federación de más de 200 agencias de rastreo GPS y GLONASS distribuidas a nivel mundial. Tiene por misión proporcionar datos, productos GPS de alta calidad y productos de datos en línea casi en tiempo real para alcanzar objetivos de una amplia gama de aplicaciones científicas, de ingeniería y de educación.

Las precisiones de los productos del IGS son suficientes para la mejora y ampliación del Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF), el control de deformaciones de la Tierra sólida, el control de rotación de la Tierra y las variaciones del líquido en la Tierra (nivel del mar, capas de hielo), para la determinación de la órbita de satélites científicos, de la ionósfera, y la recuperación de las mediciones de vapor de agua precipitable, (NASA, 2009). Actualmente, el IGS incluye GNSS, GPS y GLONASS³. En general, se puede pensar que el IGS tiene la más alta precisión de la comunidad Internacional civil del GPS (IGS, 2009).

El IGS05 es una solución, basada en ITRF05, pero considerando únicamente estaciones GPS, para lo cual se han utilizado 130 estaciones GPS. Desde la semana GPS 1400 (5 de Noviembre de 2006) se utiliza el sistema IGS05, el cual se calculó con calibraciones de antena absolutas, quiere decir que esta solución procesa con un modelo absoluto y no relativo, como han sucedido en versiones de ITRFs previas, incluido ITRF05, (Zurutuza, 2009). Para permanecer compatible con los marcos de referencia terrestres calculados por el IERS, esta realización propuesta también fue realineada al ITRF2005 usando transformación de 7 parámetros (3 rotaciones, 3 traslaciones y 1 factor de escala); las variaciones de los parámetros no fueron afectadas por el cambio de centro de fase. Los parámetros de transformación estimados se pueden ver en la tabla 2.5:

³ GLONASS Russia's Global Navigation Satellite System, proporciona determinaciones tridimensionales de posición y velocidad.

Tabla 2.5. Parámetros de transformación del IGS05 al ITRF2005

Parámetros de Transformación del IGS05 al ITRF2005.							
	Traslación			Rotación			Diferencia de Escala
ITRF	T_x (cm)	T_y (cm)	T_z (cm)	R_x (mas)	R_y (mas)	R_z (mas)	δ (ppb)
Rates	\dot{T}_x (cm/a)	\dot{T}_y (cm/a)	\dot{T}_z (cm/a)	\dot{R}_x (mas/a)	\dot{R}_y (mas/a)	\dot{R}_z (mas/a)	$\dot{\delta}$ (ppb/a)
	cm/a	cm/a	cm/a	mas/a	mas/a	mas/a	ppb/a
ITRF2005	0,165	-0,016	0,236	-0,01118	-0,00693	-0,00046	-1,85533
Rates	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fuente: <http://igs.cb.jpl.nasa.gov>.

- **IGS08**

El IGS08 es una solución, basada en ITRF08, pero considerando únicamente estaciones GPS, para lo cual se han utilizado 232 estaciones GPS. Este conjunto de estaciones ha sido seleccionado por el IGS mediante el Grupo de trabajo del Marco De Referencia con sus siglas en inglés (RFWG) para la realización del IGS por el Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF). Los principales criterios de selección fueron rendimiento de la estación, historial, monumentación, colocación y distribución geográfica. La consistencia y estabilidad de los productos de IGS, así como la capacidad de vincular las mediciones a través del espacio y el tiempo, depende fundamentalmente de las estaciones. Desde la semana GPS 1632 (17 de abril 2011) se utiliza el sistema IGS08, el cual se calculó con calibraciones de antena absolutas, quiere decir que esta solución procesa con un modelo absoluto y no relativo, como han sucedido en versiones de ITRFs previas.(IGS,2011)

- **SIRGAS**

Según SIRGAS (2009), el Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas como sistema de referencia se define idéntico *al Sistema Internacional de Referencia Terrestre* – ITRS y su realización es la densificación regional del marco global de referencia terrestre ITRF. Las coordenadas SIRGAS están asociadas a una época

específica de referencia y su variación con el tiempo es tomada en cuenta ya sea por las velocidades individuales de las estaciones SIRGAS o mediante un modelo continuo de velocidades que cubre todo el continente. Las realizaciones o densificaciones del SIRGAS asociadas a diferentes épocas y referidas a diferentes soluciones del ITRF materializan el mismo sistema de referencia y sus coordenadas, reducidas a la misma época y al mismo marco de referencia ITRF, compatibles en el nivel milimétrico.

El sistema SIRGAS mediante su origen, orientación y escala define al datum geodésico SIRGAS, en base al elipsoide GRS80, cuyos parámetros elipsoidales tanto geométricos como físicos, se pueden ver en la siguiente tabla 2.6

Tabla 2.6. Parámetros Elipsoidales del GRS80.

Elipsoide GRS80		
<i>a</i>	Semieje Mayor	6378137m
<i>f</i>	Achatamiento	1/298,257222101
<i>w</i>	Velocidad Angular de la Tierra	7292115×10^{-11} rad/seg.
<i>GM</i>	Constante Gravitacional de la Tierra Incluida la atmósfera	3986005×10^8 m ³ /s ²

- **Realizaciones SIRGAS**

La primera campaña GPS de SIRGAS fue llevada a cabo entre el 26 de mayo y el 4 de junio de 1995. Ésta incluyó 58 estaciones distribuidas en América del Sur y su medición fue posible gracias al esfuerzo combinado de entidades suramericanas, europeas y norteamericanas que pusieron a disposición los equipos GPS y operadores necesarios para toda la red. Las mediciones fueron procesadas independientemente por el **DGFI** (Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut) y **NIMA** (US National Imagery and Mapping Agency, actualmente **NGA**: National Geospatial-Intelligence Agency). DGFI utilizó el **software Bernese**, v. 3.4 con algunas modificaciones implementadas por ese Instituto, mientras que NIMA trabajó con el software **GIPSY/OASIS II**. La comparación de las soluciones a través de una transformación de similitud de siete parámetros (transformación de Helmert) arrojó como máxima diferencia 3,5 cm con RMS de $\pm 1,0$ cm en X, $\pm 1,4$ cm en Y y $\pm 0,7$ cm

en Z. Las principales causas de estas discrepancias se basan en que se utilizaron diferentes efemérides satelitales en los procesamientos individuales y en que la dependencia de las variaciones de los centros de fase con respecto al ángulo de elevación no fueron tenidos en cuenta en la solución de NIMA. La solución final combinada de **SIRGAS95** está referida al **ITRF94**, época 1995.4 (Realizaciones SIRGAS95, 2011). A continuación se muestra en la figura 2.2 las estaciones que ayudaron en la realización de SIRGAS95.

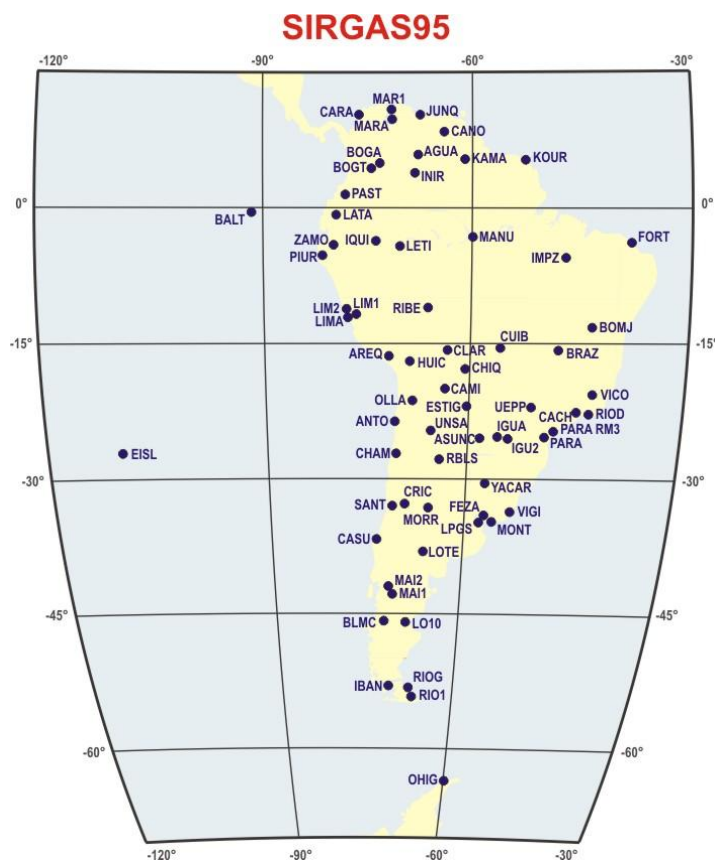


Figura.2.2. Ubicación de las estaciones SIRGAS95.

Fuente: Realizaciones SIRGAS95, 2011

La segunda campaña de SIRGAS fue adelantada entre el 10 y el 19 de mayo de 2000. Dado que su objetivo primordial era la vinculación de los sistemas de alturas nacionales al ITRF, ésta incluye además de las estaciones SIRGAS95, los mareógrafos de referencia de América del Sur y algunos puntos fronterizos que permiten la conexión directa entre redes de nivelación vecinas. SIRGAS2000

contiene 184 estaciones distribuidas en Norte, Centro y Sur América. Esta red fue calculada por tres centros de procesamiento: DGFI (Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut), IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) y BEK (Bayerische Kommission für die Internationale Erdmessung). DGFI e IBGE utilizaron el software Bernese, v. 4.0, mientras que BEK trabajó con el software GIPSY/OASIS II. La solución final fue obtenida a partir del ajuste combinado de las coordenadas individuales y sus matrices varianza-covarianza (archivos SINEX) y se refiere al ITRF2000, época 2000.4. A continuación se muestra en la figura 2.2.2 las estaciones que ayudaron en la realización de SIRGAS2000.

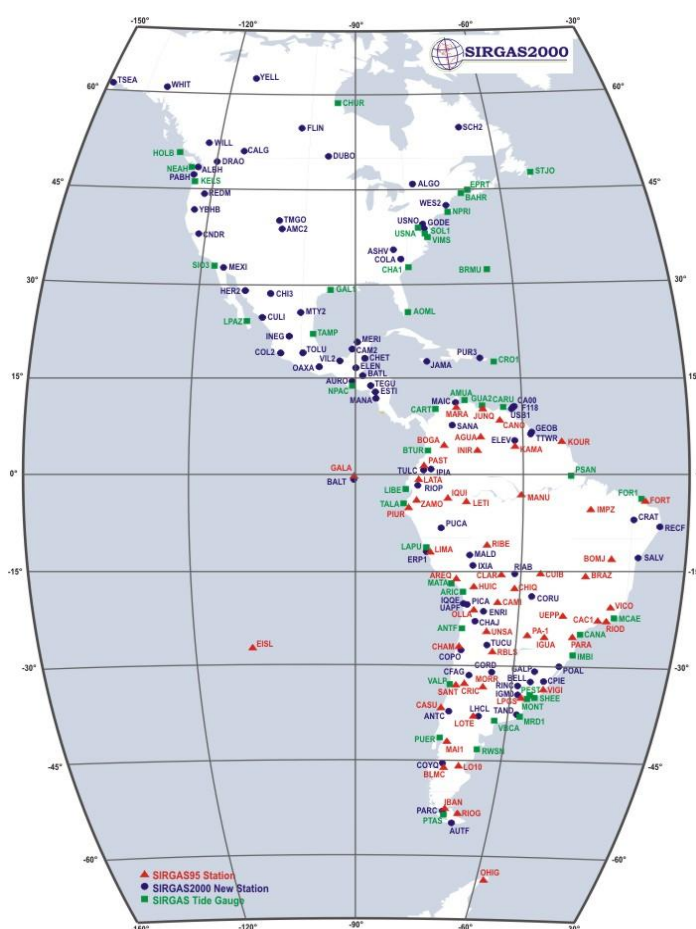


Figura.2.3. Ubicación de las estaciones SIRGAS2000.

Fuente: Realizaciones SIRGAS00, 2011

La realización (materialización) de SIRGAS se adelantó inicialmente, mediante dos campañas GPS, la primera en 1995 (SIRGAS95) con 58 estaciones; la segunda en

2000 (SIRGAS2000) con 184 estaciones. Actualmente, SIRGAS está materializado por una red de estaciones GNSS de funcionamiento continuo con coordenadas de alta precisión (asociadas a una época específica de referencia) y sus cambios a través del tiempo (velocidades de las estaciones). La red SIRGAS de funcionamiento continuo (SIRGAS-CON) está compuesta en la actualidad por cerca de 250 estaciones, de las cuales 48 pertenecen a la red global del IGS. La operabilidad de SIRGAS-CON se fundamenta en la contribución voluntaria de más de 50 entidades latinoamericanas, que han instalado las estaciones y se ocupan de su operación adecuada para, posteriormente, poner a disposición de los centros de análisis la información observada. Dado que los países latinoamericanos están mejorando sus marcos geodésicos de referencia mediante la instalación de un número mayor de estaciones GNSS de operación continua y, teniendo presente que dichas estaciones deben ser integradas consistentemente en el marco de referencia continental, la red SIRGAS-CON comprende dos niveles de clasificación:

- Una red de cobertura continental (SIRGAS-CON-C), densificación primaria del ITRF en Latinoamérica, con estaciones estables, de funcionamiento óptimo, que garantizan consistencia, perdurabilidad y precisión del marco de referencia a través del tiempo.
- Redes de densificación (SIRGAS-CON-D) que incluyen las estaciones de referencia no contenidas en la red continental y proveen el acceso al ITRF a nivel local. Actualmente existen tres redes SIRGAS-CON-D (una norte, una central y una sur), pero el objetivo a mediano plazo es que existan tantas como países miembros de SIRGAS, pues dichas redes equivalen a los marcos nacionales de referencia.

La red SIRGAS-CON-C es procesada semanalmente por el DGFI (Alemania) en su calidad de centro de análisis IGS-RNAAC-SIR (IGS Regional Network Associate Analysis Centre for SIRGAS). Las subredes de densificación SIRGAS-CON-D son calculadas por los Centros Locales de Procesamiento SIRGAS: CEPGE (Ecuador), CIMA (Argentina), CPAGS-LUZ (Venezuela), IBGE (Brasil), IGAC (Colombia), IGN-Ar (Argentina), INEGI (México) y SGM-Uy (Uruguay). Estos Centros generan soluciones

semanales semilibres (loosely constrained) de las redes SIRGAS-CON-D, las cuales son combinadas con la red continental SIRGAS-CON-C, asegurando que las posiciones y velocidades de todas las estaciones (continentales y de densificación) sean compatibles entre sí. Dicha combinación es efectuada por el DGFI y el IBGE como Centros de Combinación SIRGAS. La estrategia de procesamiento garantiza que cada una de las estaciones regionales SIRGAS-CON esté incluida en tres soluciones individuales. Los productos finales SIRGAS son proporcionados por el IGS-RNAAC-SIR, los cuales comprenden: soluciones semanales semilibres para la integración de SIRGAS-CON en el políedro global del IGS, coordenadas semanales ajustadas al ITRF (referidas a la época de observación) para aplicaciones en América Latina y soluciones multianuales (acumuladas) con coordenadas y velocidades para aplicaciones prácticas y científicas que requieran de la variabilidad de las posiciones geodésicas con el tiempo. . A continuación se muestra en la figura 2.4 las estaciones que pertenecen a la red geodésica de SIRGAS-CON

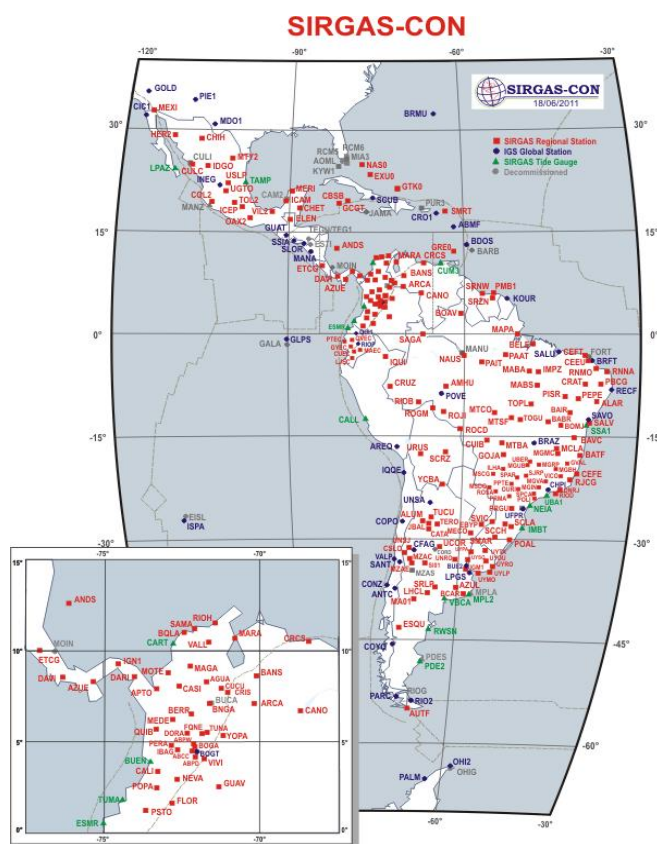


Figura.2.4. Ubicación de las estaciones SIRGAS-CON

Fuente: Red SIRGAS-CON, 2011

2.3.3.- Fenómenos que permiten establecer la vinculación entre el sistema de referencia celeste y el terrestre.

El eje de rotación terrestre materializa una dirección en el espacio que es muy adecuada para definir un sistema de referencia. Sin embargo, su posición en el espacio varía con el tiempo, y lo mismo sucede con su posición respecto de la superficie terrestre. Estas variaciones son complejas y su conocimiento es fundamental para lograr una materialización precisa de los sistemas de referencia Celeste y Terrestre.

La Tierra se mueve en el espacio de manera que la orientación de su eje de rotación se puede describir como la superposición de varios movimientos. Convencionalmente se define un eje de rotación o polo medio fijo a la corteza terrestre. Los movimientos de este eje respecto del sistema inercial se agrupan bajo los términos de Precesión y Nutación. Por otra parte, los cambios del eje de rotación instantáneo respecto del convencional se denominan Movimiento del Polo. A estos movimientos se agrega la rotación terrestre propiamente dicha, compuesta por una velocidad de rotación media e irregularidades.

A continuación se describen brevemente tales movimientos y su interacción con los Sistemas de Referencia Celeste y Terrestre.

- **Movimientos en el Sistema Celeste.**

El polo de rotación de la Tierra no es fijo en el espacio sino que rota alrededor del polo de la eclíptica. Este movimiento se podría descomponer en dos: la precesión y la nutación.

La ***Precesión luni-solar*** es un lento movimiento circular del polo celeste con un período de 25800 años, y una amplitud igual a la oblicuidad de la eclíptica, alrededor de $23,5^\circ$, resultando un movimiento hacia el oeste del equinoccio sobre el ecuador de alrededor de $50,3''$ por año. ($360^\circ / 25800$ años). Se debe a la atracción del Sol y la Luna sobre los abultamientos ecuatoriales.

La **Precesión planetaria**, consiste en un lento movimiento del eje de rotación, resultando un movimiento hacia el este del equinoccio, de aproximadamente 12.5" por siglo, ocasionando una disminución en la oblicuidad de la eclíptica de 47" por siglo. Esta se debe a la atracción de los demás cuerpos del Sistema Solar. El efecto combinado de precesión planetaria y luni-solar se denomina Precesión. El modelo convencional recomendado por el IERS (Mc Carthy, 1996) es el de (Lieske et. al., 1977)

La **Nutación** es un movimiento periódico relativamente pequeño del polo de rotación verdadero de la época, respecto del polo medio de la misma época definido por la precesión, con oscilaciones de 1 día a 18,6 años (período principal) y una amplitud máxima de 9,2". Parte del movimiento puede ser predicho con mucha precisión por el modelo de (Wahr J., 1981) y (Seidelmann P., 1982) que constituyen la Teoría de Nutación de la IAU de 1980 (Mc Carthy, 1996). La parte restante del movimiento de Nutación debe ser estimada a partir de observaciones mediante las distintas técnicas geodésicas. Estas consideraciones muestran que el polo no describe una circunferencia alrededor del polo de la eclíptica sino que por efecto del largo período de la Nutación se mueve en una pequeña elipse alrededor de una posición media obteniendo como resultante una curva sinuosa.

Influencia de la Precesión y de la Nutación en las coordenadas ecuatoriales.

En la práctica, la mejor aproximación al marco de referencia inercial verdadero es un marco de referencia definido cinemáticamente, por las coordenadas celestes de un número de radio fuentes extragalácticas observadas por VLBI, en el cual se asume que la red no tiene movimiento propio. Sus coordenadas medias (ascensión recta y declinación) a la época J2000 definen el Marco de Referencia Celeste (CRF), las cuales se detallan en los catálogos estelares. Un desarrollo más detallado de estos temas puede encontrarse en (Virginia MacKern, 2003)

Movimiento en el Sistema Terrestre.

Si todas las fuerzas externas sobre la Tierra se eliminasen, su eje de rotación variaría aún con respecto a su propia figura, principalmente debido a sus

propiedades elásticas y a los cambios de momento angular entre la Tierra sólida, los océanos y la atmósfera.

El movimiento polar es la rotación del polo celeste verdadero definido por los modelos de precesión y nutación con respecto al polo (eje z) de un marco de referencia terrestre adoptado convencionalmente.

Su componente libre de fuerzas externas o efecto de Chandler, tiene un movimiento circular de sentido antihorario con un período principal de 430 días y una amplitud que alcanza los 3.6 metros (0,1" de arco). La componente forzada, debido a las fuerzas de mareas, es aproximadamente un orden de magnitud menor, con períodos de un día aproximadamente, en consecuencia determinan el movimiento polar diurno, mientras que su componente forzada anual debido a la excitación atmosférica es tan grande como el movimiento de Chandler⁴.

El movimiento del polo no está adecuadamente determinado por los modelos terrestres disponibles a la fecha en relación a la exactitud de las observaciones que hoy se utilizan en la materialización de los sistemas de referencia celeste terrestre, por lo tanto se deben estimar correcciones a los modelos convencionales a partir de observaciones realizadas por las distintas técnicas geodésicas.

Actualmente los valores de movimiento polar son tabulados diariamente por el IERS, se basan en observaciones VLBI, SLR y GPS.

2.3.4.- Revisión de las principales técnicas de medición utilizadas

Actualmente hay varias técnicas que permiten establecer un conjunto de estaciones fijas, con coordenadas precisas a escala global.

El principio de estas técnicas de la Geodesia espacial necesita la definición de dos sistemas de referencia: el Celeste y el Terrestre, como se detalló en 1.3. Del análisis de cada técnica surgen las constantes y convenciones, que definen el modelo, los cuales se eligen arbitrariamente.

4 Se trata de una pequeña oscilación del eje de rotación de la tierra que añade 0,7 segundos de arco en un período de 433 días a la precesión de los equinoccios. Descubierta por Seth Carlo Chandler en 1891, y actualmente no se conocen las causas que lo producen.

A fin de comparar de la manera más objetiva posible los resultados de diferentes técnicas, es indispensable que los centros de análisis utilicen los mismos modelos o modelos equivalentes.

Estas recomendaciones fueron realizadas por el grupo de trabajo para la rotación de la Tierra y fueron objeto de la elaboración de los Standares Merit y actualmente de los Standares IERS.

A continuación se describirán de una manera sintética las principales técnicas de observación utilizadas en la definición y materialización de los sistemas de referencia en la actualidad. El propósito de esta descripción es identificar las características principales de cada una. Descripciones más detalladas pueden encontrarse en (Altamimi, 1990).

VLBI, Interferometría de Bases Muy Largas

La interferometría de bases muy largas es la piedra fundamental del sistema de referencia celeste. Consiste en la recepción simultánea, por dos antenas (radio telescópicas) de la emisión de una misma fuente de radio extragaláctica, como por ejemplo cuásares, en la misma banda de radio-frecuencia (Figura 2.5)

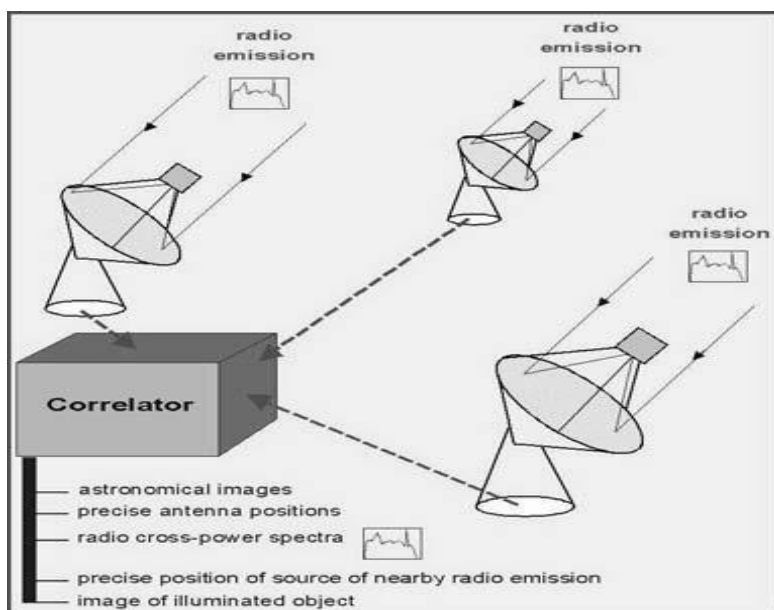


Figura 2.5. Técnica VLBI
Fuente: Virginia MacKern, 2003

Esta medida determina para cada par de antenas, el retardo de un mismo frente de onda que llega a ambas antenas separadas por miles de kilómetros.

Los registros de ambos observatorios son a posteriori correlacionados para obtener dos observables posibles: el retardo diferencial de la señal de radio y la diferencia de fase de la señal, para las bandas de recepción elegidas, entre las dos antenas.

Las sesiones de observación geodésica duran las 24 hs y observan distintas fuentes radiales distribuidas en el cielo. En la siguiente ecuación (1.7), se ve la relación fundamental entre el retardo observado y el vector que media entre las dos estaciones receptoras.

$$\tau(t) = \frac{\vec{B} \cdot \vec{S}}{c} + \Delta\tau(t) \quad (1.7)$$

En la ecuación (1.7) $\tau(t)$ es el retardo observado entre las dos antenas para la llegada del mismo frente de onda a la fecha t , \vec{B} es línea base entre dos antenas, \vec{S} indica la dirección a la radiofuente y c es la velocidad de la luz. El término $\Delta\tau(t)$ es una suma de términos correctivos que incluye un offset entre los relojes de ambas estaciones, los retardos provocados por la propagación de la señal a través de la ionosfera y troposfera, efectos relativistas, efectos causados por la estructura no puntual de la radiofuente, etc, por mencionar los más importantes.

La vinculación entre los sistemas de referencia terrestre y celeste que esta técnica aporta puede verse si se expresa la expresión anterior en forma aproximada siguiendo a (Melbourne, 1980)

$$c * \tau(t) = B_z * \text{sen}\delta + B_e * \text{cos}\delta * \text{cos}(\alpha - \theta - \phi) \quad (1.8)$$

Donde $B_e = (B_x^2 + B_y^2)^{1/2}$

$$\text{tg}\phi = \frac{B_y}{B_x}$$

α y δ : son la ascensión recta y la declinación de la fuente.

θ : es el tiempo sideral de Greenwich a la fecha t

B_x , B_y y B_z : componentes ecuatoriales de la línea de base en un Marco Terrestre.

La calidad de los modelos y observaciones que se utilizan con esta técnica permite en el presente definir direcciones con una exactitud del orden de 0.1 mas (milisegundo de arco), lo que implica estimar las componentes de los vectores entre estaciones con errores subcentimétricos.

Las estaciones VLBI que contribuyen a la realización del Sistema de Referencia Terrestre Internacional se encuentran organizadas en el Servicio Internacional de VLBI (IVS). Su distribución presente puede verse en la figura 2.6



Figura 2.6. Red Global de estaciones VLBI participantes en el IVS
Fuente: IVS, 1999.

Varios organismos están equipados con material que les permite analizar los datos VLBI. Actualmente las observaciones VLBI son patrocinadas por más de 40 organizaciones distribuidas en 17 países.

LLR ,Telemetría Láser sobre la Luna.

EL LLR mide el tiempo de ida y vuelta de un pulso LASER entre las estaciones de la Tierra a alguno de los cuatro retrorreflectores emplazados en la superficie de la Luna por las misiones Apolo (USA) y Lunakhod (URSS). (Virginia MacKern, 2003)

La relación de observación que liga la cantidad medida “D”(doble camino), con las coordenadas esféricas terrestres geocéntricas de la estación terrestre (r, ϕ , λ) , las coordenadas ecuatoriales (α , δ), el ángulo horario del reflector lunar, H y finalmente otros términos relativos al movimiento de rotación de la Tierra, puede escribirse como:

$$(D - D_0) = 2 * \Delta * r/D[(\cos\phi * \cos\delta * \text{sen}H) * \partial((UT1 - UTC) - \lambda - \alpha)) + \cos\phi * \cos H \partial A + \text{sen}\phi \partial B + (\cos\phi * \cos H * \text{sen}\delta - \text{sen}\phi * \cos\delta) \partial C + \partial D \quad (1.9)$$

Donde :

Δ es el vector que une los centros de masa de la Luna y la Tierra.

Los términos ∂A , ∂B , ∂C y ∂D indican correcciones a calcular para los valores a priori de los parámetros r, ϕ , Δ y δ respectivamente.

La técnica LLR puede materializar el sistema de referencia con errores de varios centímetros, como lo muestran comparaciones de soluciones respecto al marco ITRF96 para las cinco estaciones en operación (Boucher et al., 1998a). Teniendo en cuenta además que estas soluciones no incluyen las velocidades de las estaciones de observación resulta evidente que su exactitud se encuentra por debajo de las demás técnicas.

El LLR fue una técnica clave utilizada por el IERS, para conectar marcos de referencia. Se utilizaba para determinar la oblicuidad de la eclíptica, la orientación del marco dinámico del sistema solar en el marco de referencia extragaláctico, la nutación y precesión de largo período.

Varios centros de análisis tratan regularmente los datos de esta técnica.

- Distintos institutos de Alemania como ser la Universidad Técnica de Munich, el Instituto para Geodesia Física y Astronómica, el Instituto de Geodesia Planetaria, etc, han trabajado con datos adquiridos de LLR desde 1970 hasta

1997. Se estimaron coordenadas de 5 sitios, posición baricéntrica y velocidad de la Tierra y de la Luna. Se estimaron y aplicaron correcciones a la precesión y a algunos términos de la nutación.

- El Jet Propulsion Laboratory (JPL). Realiza un ajuste global con el fin de obtener las coordenadas geocéntricas de estaciones, valores de rotación terrestres, los parámetros de la órbita de la Luna, y las posiciones de los 4 reflectores sobre la Luna. Se han realizado mediciones desde los observatorios de Mc.Donald, Grasse (OCA/CERGA) y Hakeakala.
- El Centre d'Estudes et Recherches de Geodynamique et Astrometrie (CERGA) Francia, participa en el programa EROLD. Actualmente la estación es conocida como OCA/CERGA LLR.

SLR, Telemetría Láser sobre satélites.

Esta técnica es uno de los pilares fundamentales para la materialización del ITRS. Desde sus comienzos hasta el presente, la precisión de las observaciones fue mejorando desde varios metros en sus comienzos a menos que un centímetro actualmente (ILRS, 1999).

Para la realización del ITRS, es la técnica geocéntrica por excelencia, permitiendo la definición de la posición del centro de masa de la Tierra con una exactitud centimétrica.

Además, por provenir de mediciones de distancia, las soluciones de SLR tienen un gran peso en la materialización de la escala del sistema de referencia (Blewitt et al., 1999). SLR mide los intervalos de tiempo transcurridos por pulsos LASER emitidos por un transmisor que viaja hacia un satélite artificial y vuelve al lugar de transmisión.

Los satélites más utilizados en esta técnica son:

STARLETTE (Francés, lanzado en 1975)

LAGEOS-1 Y LAGEOS-2 (Americanos, lanzados en 1976 y 1992)

AJISAN (Japonés, lanzado en 1986)

ETALON (Ruso, lanzado en 1989)

Se agregaron en 1995, cuatro satélites a la constelación operacional de SLR, quedando un total de 17 satélites activos. Estos incluyen las principales misiones de: GFZ-1 (en Alemania), ERS-2 (ESA), GLONASS 63, GLONASS 67 y RESURS (en Rusia).

La contribución de estas técnicas en la realización de sistemas de referencia es de gran importancia, porque permiten la realización de un sistema geocéntrico con precisión centimétrica.

En realidad el satélite está afectado de una gran cantidad de fuerzas perturbadoras, tales como: la gravedad terrestre, la gravedad de otros cuerpos del sistema solar, el frotamiento atmosférico, la presión de radiación, etc.

El modelado teórico del movimiento de un satélite artificial se realiza en un marco inercial, donde las fuerzas son más fáciles de modelar. Sin embargo la determinación de órbitas se realiza a partir de observaciones desde estaciones terrestres, donde las coordenadas están en un marco ligado a la Tierra. Esto implica que es necesario conocer los movimientos de la Tierra en el espacio con gran exactitud.

Del ajuste de las observaciones se obtienen los parámetros orbitales del satélite, correcciones a los modelos de rotación terrestre y también algunos coeficientes del modelo de fuerzas cuyos valores no son conocidos a priori, con suficiente exactitud. Los modelos de fuerzas aplicadas a los satélites definen implícitamente el marco inercial. El marco terrestre se define de la siguiente manera:

- **El origen:** es el centro de masa de la Tierra, determinado por la anulación del término de primer orden del desarrollo en armónicos esféricos del potencial terrestre.
- **La escala:** es función de las constantes fundamentales elegidas (velocidad de la luz y GM)
- **La orientación** es determinada tanto al fijar los parámetros de rotación de la Tierra para una época dada, como al fijar 3 coordenadas de estaciones, una longitud y dos latitudes.

Esta forma de proceder es análoga en los casos de la técnicas SLR, GPS y DORIS, por lo que serán referidas muy brevemente en las secciones correspondientes. Las actividades de las estaciones SLR y LLR que contribuyen a la materialización del ITRS se encuentran coordinadas hoy por el Servicio Internacional de LASER Ranging o ILRS.

La distribución global de las estaciones que participan en este servicio se muestra en la figura 2.7



Figura 2.7. Red Global de estaciones SLR participantes del ILRS
Fuente: ILRS, 1999

Los principales centros de análisis de datos de esta técnica son:

- El Centre for Space Research (CSR), USA, y el JPL que estiman simultáneamente las posiciones y velocidades de las estaciones desde datos combinados de los satélites LAGEOS 1 y LAGEOS 2. Calculan valores para los EOP, sólo desde datos de los satélites LAGEOS 1

- El Goddard Space Flight Center (GSFC / NASA) que conjuntamente con el Dep. de astronomía, trabajan con la información de los satélites LAGEOS I desde 1980. Realizan un ajuste global, en el cual se estiman simultáneamente las posiciones y velocidades de las estaciones, los parámetros de las órbitas del satélite y los parámetros de rotación de la Tierra.
- El Deutsches Geodetisches Forschungsinstitut (DGFI) RFA. Ajusta simultáneamente los parámetros de rotación de la Tierra, los elementos de la órbita y las coordenadas de estaciones para cada año de observación. De tal manera de obtener soluciones anuales de coordenadas de estación y comparar sus movimientos relativos.

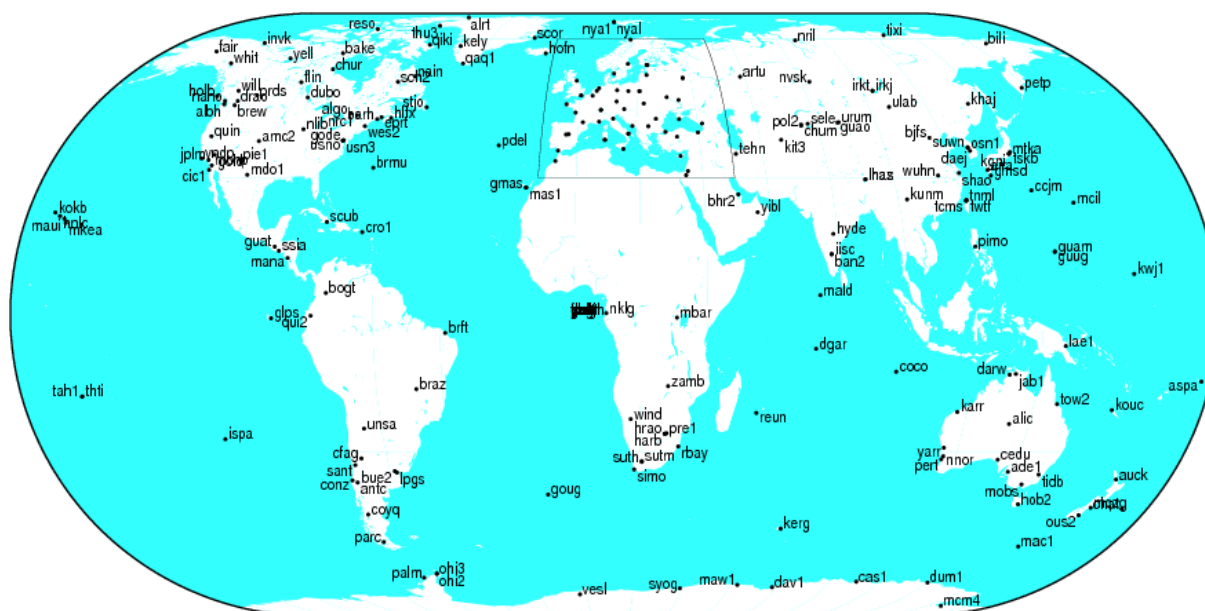
GPS, Sistema de Posicionamiento Global.

Es un sistema de navegación satelital que permite la adquisición rápida de información de posiciones y de velocidades tridimensionales.

Está compuesto por una constelación de 24 satélites que orbitan aproximadamente a 20000 km. de altura, en seis planos orbitales, de manera tal que un mínimo de cinco satélites puedan ser observados desde cualquier lugar de la Tierra en cualquier instante.

Estos satélites generan dos ondas electromagnéticas, en frecuencias muy estables $L1= 1,575$ Ghz y $L2=1,242$ Ghz, que son moduladas por un código de ruido pseudoaleatorio. Cuando se visualizan cuatro satélites, el usuario tiene suficiente información para resolver el problema de la posición de la estación y la desincronización de reloj del tiempo GPS.

El sistema está controlado por diez estaciones de rastreo que observan los satélites y permiten el cálculo y predicción de sus órbitas y correcciones a los estados de sus relojes. Estos son luego transmitidos a los satélites para que a su vez las puedan enviar a los usuarios como efemérides transmitidas. Los usuarios reciben las posiciones y correcciones de reloj de los satélites y además pueden medir pseudo distancias a varios de ellos a la vez, lo que les permite calcular su propia localización. La observación es un retardo como en el caso de SLR, pero en este caso es de camino simple, por lo que se involucran la escala de tiempo del reloj del satélite y la del reloj de la estación receptora. El modelado de las fuerzas sobre el satélite es muy parecido al que se utiliza para SLR, adecuándolo a las características de los satélites GPS tales como la gran altitud de su órbita y la complejidad de la geometría de su superficie. A continuación se muestra en la figura 2.8 las estaciones de monitoreo continuo pertenecientes al IGS.



IGS 2012 Jan 09 16:46:24

Figura 2.8. Red de rastreo GPS permanentes del IGS
Fuente: IGS ,2011

El bajo costo relativo de los receptores respecto de las demás técnicas y el gran número de aplicaciones que se sirven de GPS han contribuido a que en menos de una década se desarrollara una red mundial de estaciones de rastreo integradas en

el Servicio Internacional de GPS (IGS). Esta organización, patrocinada por la Asociación Internacional de Geodesia (IAG), produce órbitas GPS precisas, parámetros de rotación terrestre, coordenadas y velocidades de las estaciones de rastreo con exactitudes del orden de las que se obtienen con las demás técnicas descritas en esta sección. El servicio prestado por el IGS (International GPS Service) contribuye en forma decisiva a la disponibilidad actual del posicionamiento con GPS de exactitud centimétrica. La figura 2.8 muestra la distribución de las estaciones globales del IGS que contribuyen a la materialización del ITRS.

La contribución del GPS en la realización de sistemas de referencia puede considerarse en dos partes:

- En la definición de su propio sistema de referencia, mediante la instalación de antenas GPS fijas sobre puntos bien distribuidos de la superficie terrestre, formando una red mundial que sirva de base al marco de referencia propio de esta técnica (Ej: Red de la Cooperación Internacional de GPS, CIGNET, actualmente red de estaciones del Servicio Internacional GPS para Geodinámica, IGS).
- Además, el GPS da la posibilidad de posicionamiento geodésico ultra-preciso, lo cual puede servir para la vinculación entre puntos de distintos marcos de referencia, vinculación de redes regionales a la red permanente, etc. Además abre grandes posibilidades de interconectar distintos sistemas de referencia.

DORIS

El Sistema de Orbitografía por Radioposicionamiento Doppler Integrado por Satélite (DORIS) consta de un segmento espacial conformado por receptores montados a bordo de varios satélites artificiales. Estos reciben señales de una red que actualmente consta de 51 balizas instaladas sobre la superficie terrestre como se puede observar en la figura 2.9.

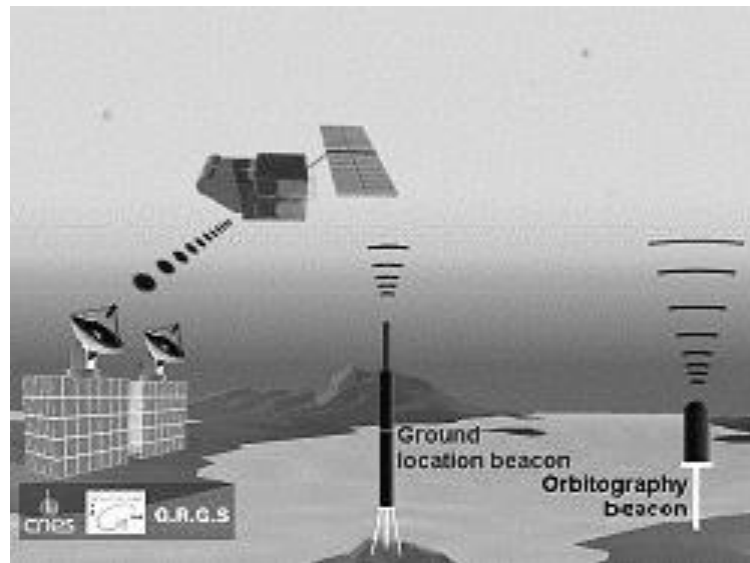


Figura 2.9. Sistema DORIS
Fuente: Virginia MacKern, 2003

Las estaciones de tierra emiten señales en dos frecuencias : $V_s = 2036.25$ Mhz para la medición precisa del efecto Doppler y $V_2 = 401.25$ Mhz para la corrección del retardo por efecto de la ionosfera.

El receptor en el espacio mide el efecto Doppler sufrido por las señales de las balizas a causa del movimiento relativo emisor-receptor, calcula una solución de navegación para la posición del satélite con una exactitud métrica y envía todos los datos a la estación de control de Toulouse, Francia, donde se calculan órbitas precisas para los satélites, coordenadas para las balizas emisoras, parámetros de rotación terrestre, y otros productos.

Por su concepción, el sistema DORIS tiene un funcionamiento muy centralizado. Los receptores y emisores tienen características muy uniformes y la red de rastreo tiene una distribución muy homogénea, como se muestra en la figura 2.10.

- Globales: debido a fenómenos globales, son comunes a todas las estaciones de una red. Los principales fenómenos que provocan las deformaciones globales son las mareas terrestres y oceánicas y los movimientos de placas tectónicas.
- Locales: debidas a fenómenos locales, dependen de las condiciones geológicas y geofísicas de cada estación. El sistema de referencia terrestre convencional debe incluir también la manera de modelar estos efectos que modifican la posición de las estaciones de observación.

2.4.1.- Movimiento de Placas Global

El movimiento de las placas tectónicas es el principal efecto que produce desplazamiento en los sitios de observación. Si bien ya se comentó respecto a su influencia sobre los sistemas de referencia terrestres se procede a continuación a describir los modelos más utilizados y la tendencia actual al respecto.

La teoría de placas tectónicas supone la división de la corteza terrestre en varias placas, 11 placas principales y otras de dimensiones reducidas. Se están realizando una gran cantidad de investigaciones con el objeto de estudiar los movimientos relativos, comprender los mecanismos y delimitar sus contornos en forma más exacta. El origen de estos movimientos es atribuido a procesos de convección térmica en la astenósfera. Los desplazamientos relativos entre placas alcanzan en algunos casos velocidades de 10 cm/año (Virginia MacKern, 2003).

Las variaciones de coordenadas de estaciones debido a estos movimientos, pueden estimarse si se dispone de observaciones sobre un largo período o también se calculan por modelos.

Un modelo muy aceptado fue el de (Minster, B. et Jordan, T.H., 1978), llamado RM2, basado en un conjunto de datos geológicos y geofísicos que describen los movimientos tectónicos durante decenas de millones de años. Estos datos derivados de perfiles de anomalías magnéticas, de la dirección de fallas y de datos sísmicos, contienen las velocidades de expansión a partir de dorsales oceánicas. El modelo RM2 de Minster et Jordan describe de una manera global los movimientos relativos de las placas. Un modelo de la misma naturaleza que RM2, pero mejorado se denominó NUVEL-1.

Una modificación de este se denominó NNR-NUVEL 1. Describe las velocidades angulares de las 14 principales placas tectónicas definidas por una condición de no rotación de la red. Fijando una placa (se elige usualmente la placa Pacífica) a velocidad cero, se pueden obtener velocidades en el modelo de movimiento de placas relativo NUVEL-1, el cual se deriva de datos paleomagnéticos, de acimuts de fallas y vectores desplazamiento ocasionados por los terremotos.

Una revisión reciente de la escala de tiempo paleomagnético ha conducido a reescalar los valores angulares por un factor de 0,9562 definiendo el nuevo modelo NUVEL-1A y NNRNUVEL1A.

Los desplazamientos dependen de cada placa, para lo cual se define un vector rotación Ω_j , expresado en un sistema terrestre. La velocidad ecuación (1.10), de una estación de coordenadas r_i , sobre una placa j en el modelo NNR-NUVEL 1A u otro, está dada sobre una Tierra esférica de radio R , como función de la latitud, longitud esférica y radio (ϕ, λ, R) por

$$V_{ij} = \Omega_j \times r_i \quad (1.10)$$

Donde Ω_j es la velocidad angular de la placa "j", la cual es función del módulo de rotación ω_j y del polo de rotación (ϕ_j, λ_j)

$$\Omega_j = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \omega_j \begin{bmatrix} \cos\phi_j * \cos\lambda_j \\ \cos\phi_j * \text{sen}\lambda_j \\ \text{sen}\phi_j \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

y r_i es el vector posición de la estación "i" dado por:

$$r_i = \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} \cos\phi * \cos\lambda \\ \cos\phi * \text{sen}\lambda \\ \text{sen}\phi \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

Las correcciones a las coordenadas de la estación debido a un movimiento de placas global en el intervalo de tiempo ($t - t_0$), está dado por:

$$r_{ij}(t) = r_{ij}(t_0) + (\Omega_j \times r_i) \cdot (t - t_0) \quad (1.13)$$

Es conveniente señalar que las variaciones de coordenadas de las estaciones, estimadas por este modelo consideran únicamente las componentes horizontales. Las deformaciones verticales también son un elemento importante a tener en cuenta. Estas deformaciones seculares pueden ser muy significativas y son esencialmente debidas a efectos Post-glaciales.

Las variaciones de coordenadas de estaciones debidas a estas deformaciones no están previstas por los modelos existentes, por lo tanto deben ser estimadas en el ajuste de las observaciones para el cálculo de la posición.

Los modelos globales de movimiento de placas, están en general basados en datos geológicos a escala de millones de años, suministrando una estimación global de las deformaciones de las placas de grandes dimensiones. Ciertas deformaciones, relativas por ejemplo a los bordes de las placas y a zonas complejas o más activas, no son consideradas en estos modelos. Se pueden realizar mejoramientos locales de los modelos de placas, con las nuevas técnicas de geodesia espacial.

Actualmente los movimientos relativos entre placas son observados por las técnicas espaciales (VLBI, SLR), confirmando cuantitativamente las predicciones del modelo. Se necesita sin embargo, esperar algunos años todavía para que la geodesia espacial aporte mejoramientos significativos a los modelos existentes a nivel global ya que si bien hay zonas de gran densidad de estaciones donde se conocen muy bien las velocidades, habrá que densificar suficientemente las redes de estaciones VLBI, SLR y GPS para poder realizar un control global de tales movimientos. Por otra parte las deformaciones internas en cada placa son de muy largo período y de pequeña amplitud, por lo tanto a fin de detectar este tipo de deformaciones, deben realizarse mediciones geodésicas de vectores sobre una misma placa con una precisión mejor que 1 mm /año.

Por todo lo expuesto en los párrafos precedentes es muy importante conocer la época a que están referidas las coordenadas de estaciones de un determinado marco de referencia para llevarlas mediante este tipo de transformación a la época de interés, ya sea para comparación o bien para su utilización como punto de apoyo en un determinado relevamiento.

2.4.2.- Efecto de mareas de la Tierra sólida

Las atracciones gravitacionales del Sol y de la Luna inducen a deformaciones de mareas en la Tierra sólida. El efecto que producen es una variación periódica de las coordenadas instantáneas de las estaciones. La amplitud y período de estas variaciones y la ubicación de la estación determinarán el efecto sobre la posición de la misma. En las mediciones, el error cometido por ignorar el efecto de mareas será generalmente más grave a medida que se incrementa la longitud del vector medido. En principio el modelo de mareas terrestres necesita ser parte de la definición del sistema de referencia terrestre. En primer orden, la deformación de mareas terrestres está dada por las conocidas mareas de la tierra sólida, donde se expresa la respuesta de la Tierra al potencial luni-solar mediante los coeficientes de Love y de Shida.

El potencial luni-solar varía naturalmente en función del tiempo ya que la posición de la Luna y el Sol varían en el tiempo.

Con respecto al efecto de mareas sobre el desplazamiento de estaciones, existen dos tipos de correcciones importantes:

- Una corrección que varía en función del tiempo, se aplica en la dirección radial y puede considerarse con una precisión suficiente, como una variación periódica de altitud de la estación. Según los standards IERS, se calcula de acuerdo a la ecuación (1.14):

$$dh = -0.0253 \sin \varphi \cdot \cos \varphi \sin(\theta + \lambda) \quad (1.14)$$

Con (φ, λ) : coordenadas de la estación y θ : tiempo sidéreo

$dh = 0,013$ máximo para $\phi = 45^\circ$

- Una corrección permanente de mareas terrestres debido al gradiente medio de atracción luni-solar, dado aproximadamente en metros, es función de la latitud geodésica y está dividida en dos partes según Virginia MacKern, 2003:

Una en dirección vertical

$$\Delta W = -0.12083 * \left(\frac{3}{2} \text{sen}^2 \varphi - \frac{1}{2} \right) \quad (1.15)$$

Y otra en la dirección norte

$$\Delta U * 0.05071 \cos \varphi * \text{sen} \varphi \quad (1.16)$$

2.4.3.- Efecto de los océanos

Es la respuesta elástica de la corteza terrestre sobre las mareas oceánicas. Para estaciones cercanas a los bordes continentales, el efecto es predominantemente en la dirección radial y puede alcanzar varios centímetros con frecuencias predominantemente semidiurnas y diurnas.

El modelo de (Scherneck H., 1991) incluye desplazamientos verticales y horizontales. Las once componentes de mareas han sido adoptadas por los standards del IERS (McCarthy, 1992).

2.4.4.- Presiones atmosféricas

El efecto atmosférico es la respuesta elástica de la corteza terrestre a variaciones de la distribución de presión atmosférica en el tiempo. Estudios recientes han mostrado que este efecto puede tener una magnitud de algunos milímetros en el desplazamiento vertical de las estaciones.

A diferencia de las mareas oceánicas, este no tiene un manejo periódico de fuerzas bien conocido. Un modelo simplificado requiere un conocimiento de la presión instantánea en el sitio y una presión promedio sobre una región circular de radio $R=2000$ km alrededor del sitio.

La expresión del desplazamiento vertical (en mm) está dada por la ecuación (1.17)

$$\Delta v = -0.35p_o - 0.55p \quad (1.17)$$

Donde: p_o es la anomalía de presión local (relativa a la presión standard de 1013.25 mbar) y p es la anomalía de presión dentro de la región de 2000 km. Se obtiene a partir de la presión media regional calculada a partir de datos meteorológicos regionales.

2.4.5.- Mareas del Polo

El movimiento del polo provoca una perturbación en el potencial centrífugo. Sus efectos sólo se notan en las coordenadas absolutas de la estación o en vectores de miles de km de longitud. Como el movimiento del polo no tiene una periodicidad sencilla, el efecto no se anula promediando los resultados de varios días de observación. La corrección que se recomienda, se obtiene a partir de la perturbación causada por el movimiento del polo en el potencial de rotación centrífugo terrestre. La respuesta de la Tierra al mismo, se calcula utilizando las constantes de Love y Shida, Resultando finalmente las expresiones siguientes (McCarthy, 1996)

$$S_r = -32 \cdot \text{sen}2\varphi \cdot [X_p \cdot \cos(\lambda) - Y_p \cdot \text{sen}(\lambda)] \quad (1.18)$$

$$S_\theta = -9 \cdot \text{cos}2\varphi \cdot [X_p \cdot \cos(\lambda) - Y_p \cdot \text{sen}(\lambda)] \quad (1.19)$$

$$S_\lambda = 9 \cdot \text{cos}2\varphi \cdot [X_p \cdot \cos(\lambda) - Y_p \cdot \text{sen}(\lambda)] \quad (1.20)$$

Donde los desplazamientos resultan expresados en mm y las ecuaciones se evalúan en función de la latitud y longitud de la estación (φ , λ) y las componentes del movimiento del polo (x_p , y_p) en segundos de arco.

Considerando que el movimiento del polo no presenta variaciones pico a pico mayores que 0.8 segundos de arco, estas deformaciones afectan la posición de las estaciones en hasta máximos de 25 mm en la dirección radial y 7 mm en la horizontal.

2.4.6.- Efectos postglaciales.

Este es un efecto causado por la redistribución de carga en la superficie terrestre, causada por la deglaciación que ocurre desde el último máximo glaciario. Existen modelos globales de este fenómeno, calculados a partir de la convolución de modelos de carga, obtenidos a partir de registros geológicos, con funciones de Green globales (Peltier, 1994) (Peltier, 1995).

2.4.7.- Efectos locales y regionales

Además de las deformaciones globales descritas anteriormente, deben considerarse las deformaciones locales. Estas deformaciones representan los movimientos propios de cada estación en función de su entorno. Pueden alcanzar amplitudes importantes.

Estas deformaciones son causadas por una variedad de fenómenos locales y regionales, como ser:

- 1) Deformaciones en los bordes de las placas tectónicas, con magnitudes de hasta 100 y 150mm / año
- 2) Deformaciones co-sísmicas y post-sísmicas con magnitudes hasta de algunos metros y algunos mm / día, respectivamente en importantes terremotos.
- 3) Inestabilidad monumental debido a variaciones de las condiciones locales.

2.4.8.- Efectos No físicos

Los errores en la medición de un sitio, no se deben a deformaciones pero contribuyen no obstante a determinar la posición de un sitio erróneamente. Por ejemplo, una antena GPS puede estar desplazada desde su ubicación de medición, no orientada correctamente y/o tener su altura sobre la monumentación tomada erróneamente o bien se puede introducir un error al vincular sitios donde se realizan mediciones VLBI y GPS en colocación. Errores en la medición de sitios de este tipo, son una de las causas de error más grandes, hoy en día, en la definición del marco de referencia terrestre en la combinación de técnicas geodésicas espaciales.

Un error similar se debe a diferencias entre los centros de fase de las diferentes antenas geodésicas GPS. En general, para lograr la mayor precisión, se debe referenciar el centro de fase a la posición monumentada y esto requiere una cuidadosa calibración de la antena. Intercambio de antenas en un sitio particular puede resultar en un cambio aparente de la posición principalmente vertical y en algunos casos también es posible un desplazamiento horizontal.

Por lo tanto es importante considerar todos estos factores de manera tal que no influyan significativamente en la estimación de los parámetros.

Sistemas GNSS

Al conjunto de sistemas de navegación por satélite, como son el GPS, GLONASS y el reciente Galileo. Es decir los sistemas que son capaces de dotar en cualquier punto y momento de posicionamiento espacial y temporal.

Sin embargo, el concepto de GNSS es relativamente reciente, puesto que su historia comienza en los años 70 con el desarrollo del sistema estadounidense GPS, que como ya hemos mencionado, tuvo en sus orígenes aplicaciones exclusivamente militares, y su cobertura a pesar de ser mundial, no era, como hoy se entiende “Global”, es decir, era un sistema de uso exclusivamente militar cuyo control estaba bajo el DoD (Department of Defense) de los Estados Unidos, y sometido a un estricto control gubernamental.

No es hasta que se empiezan a tener en cuenta sus aplicaciones civiles, cuando el Gobierno de los Estados Unidos encarga realizar diversos estudios a distintas agencias como a RAND, con el propósito de analizar la conveniencia de emplear esta tecnología con fines civiles.

Así pues, tras diversos estudios, es en los noventa, a partir de la segunda mitad, cuando esta tecnología comienza a emplearse con fines civiles, y a alcanzarse numerosos acuerdos entre el Gobierno Estadounidense y distintos países de todo el mundo. Siendo el GPS hasta el momento el único sistema de navegación por satélite plenamente operativo, y debido a que el gobierno ruso decide no seguir adelante con GLONASS, los estadounidenses tienen en este período el control de los sistemas de posicionamiento con sus satélites.

Con el segmento espacial (red de satélites) perteneciente de manera exclusiva a los EEUU, el resto de países, como Japón, Australia, y el continente europeo, se centran en el desarrollo del segmento de tierra, es decir, de los centros de control y recepción de las señales GPS, y de elaborar sistemas de aumento (SBAS y GBAS) para dicha tecnología, que les permitan obtener un posicionamiento más preciso a través de distintos métodos que veremos más adelante.

Esto plantea inquietudes a nivel internacional, ya que, la capacidad que tienen los EEUU para emitir la señal civil del GPS es también la misma para distorsionarla o dejar de emitirla en caso de guerra o conflictos entre países (lo que se entiende como disponibilidad selectiva), surge así la necesidad para los demás países de tener su propio sistema de navegación por satélite, que les permita de manera autónoma disponer de esta tecnología sin dependencia de los EEUU. Queda pues, un largo camino por recorrer para el resto de países en el desarrollo de nuevos sistemas de navegación por satélite. Europa plantea Galileo como sistema con un uso exclusivamente civil, si bien los gobiernos de los distintos países podrán emplearlo también con fines militares. Rusia relanza el proyecto GLONASS y otros países como China plantean el desarrollo de sistemas experimentales como COMPASS⁵, la India IRNSS⁶ y Japón QZSS⁷ como sistemas regionales.

Si el GNSS plantea un futuro lleno de posibilidades, primero han de resolverse multitud de cuestiones, como capacidades de los nuevos sistemas, interoperabilidad con el GPS o costes entre otras cosas. Factores que implican a multitud de organizaciones, como agencias espaciales encargadas del desarrollo del sistema, gobiernos y otras agencias nacionales e internacionales encargadas de cuestiones legislativas.

Han proliferado en multitud de países agencias, publicaciones, asociaciones de GNSS con el fin de proponer aplicaciones, soluciones y acuerdos así como educar sobre esta tecnología, debido en parte a su prometedor futuro, y en parte a su complejo entorno internacional.

⁵ El sistema de navegación por satélite COMPASS (también conocido como Beidou-2) es un proyecto que lleva a cabo la República Popular China y que tiene como objetivo desarrollar un sistema de navegación por satélite independiente. El actual sistema Beidou (constituido por 4 satélites) es de carácter experimental y tiene una cobertura y aplicaciones limitadas. Sin embargo, con el sistema COMPASS, China planea desarrollar un verdadero sistema global de navegación por satélite formado por 35 satélites.

⁶ El Indian Regional Navigational Satellite System (IRNSS), es un sistema autónomo regional de navegación por satélite desarrollado por la Organización India de Investigación Espacial, que estaría bajo el control total del gobierno de la India. El requisito de un sistema de navegación es impulsado por el hecho de que el acceso a los sistemas mundiales de navegación por satélite, GPS, no se garantiza en situaciones hostiles.

⁷ El Sistema por Satélite Quasi-Zenith (QZSS) es un sistema de corrección de señales de navegación global por satélite o SBAS, propuesto para uso complementario del GPS en Japón. Su nombre proviene del hecho de que la mayor parte del tiempo, al menos un satélite del sistema se posicionará en torno al zenit.

Hemos establecido ya un marco para definir qué características debe tener un sistema GNSS a estas alturas, ya que si bien el primero fue el GPS, su evolución así como el resto de sistemas que surjan en otros países deben tener una estructura básica muy similar para garantizar la interoperabilidad y las características entre distintos GNSS.

2.5.- Componentes del GNSS

El GNSS consiste en tres tecnologías principales de satélites: GPS, GLONASS y Galileo. Cada uno de ellos consiste principalmente en tres segmentos: (a) del segmento espacial, (b) segmento de control, y (c) del segmento de usuario. Estos segmentos son casi similares en las tres tecnologías de satélites, que son todos juntos el GNSS. A partir de hoy, la tecnología satelital completa es la tecnología GPS y la mayoría de las aplicaciones existentes en todo el mundo relacionados con la tecnología GPS. La tecnología GNSS llegó a ser clara después de la operación de Galileo y la reconstrucción de Glonass en los próximos años.

2.5.1.- GLONASS

El GLONASS (Global Navigation Satellite System o "NAVigatsionnaya GLObalnaya Sputnikovaya Sistema ") es casi idéntico al GPS. Basado en satélites, el sistema Glonass de radionavegación proporciona la posición y la información de tiempo a los usuarios. Es operado por el Ministerio de Defensa de la Federación de Rusia (GLONASS-ICD, 2002). Glonass segmento espacial está compuesto de 24 satélites, distribuidos equitativamente en tres órbitas separadas por 120° en el plano ecuatorial. Altitud orbital del satélite es de unos 19.130 kilómetros por encima de la superficie del suelo.

Estos resultados en una órbita periódica de 11:15:44 corresponde a $8/17$ de un día sideral. El futuro de GLONASS parece incierto debido a los problemas económicos que enfrenta la Federación de Rusia. El número de satélites operativos fue disminuyendo constantemente en los últimos años. El lanzamiento de tres satélites GLONASS nuevo en diciembre de 1998 fue el primer lanzamiento después de un lapso de 3 años.

A partir de enero de 2006, un total de 10 satélites GLONASS están en funcionamiento. La más antigua de los todavía satélites activos se inició en octubre de 2000. De acuerdo con funcionarios rusos. El sistema GLONASS volverá a ser restaurado en el 2008.

- **Las señales de los satélites GLONASS.**

Glonass transmite el código C / A sobre L1, código P en L1 y L2. Las observaciones de GLONASS (código y fase) son similares al de GPS. La principal diferencia entre GPS y GLONASS es que GLONASS utiliza Frequency Division Multiple Access (FDMA), tecnología para discriminar las señales de diferentes satélites, pero GPS y Galileo usan (Code Division Multiple Access, CDMA) para distinguir entre los satélites. Todos los satélites GLONASS transmiten los mismos códigos C/A- y P-, pero cada satélite tiene frecuencias portadoras ligeramente diferentes.

Las frecuencias de las señales de portadoras L1 y L2 se puede escribir como se muestra a continuación (Leick, 2003):

$$f_1^n = 1602 + 0.5625.nMHz \quad (1.21)$$

$$f_2^n = 1246 + 0.4375.nMHz \quad (1.22)$$

Con

$$\frac{f_1^n}{f_2^n} = \frac{9}{7} \quad (1.23)$$

donde n es el número de canal de frecuencia de $1 \leq n \leq 24$, que cubre un rango de frecuencia en la L1 de 1602.5625MHz a 1615.5MHz. Dado que algunas de las frecuencias GLONASS interfieren con frecuencias utilizadas por radio-astronomía, algunos cambios en el plan de frecuencias que se espera después de 2005 (GLONASS-ICD, 2002). El mensaje de navegación se encuentra en los llamados sub marcos, que tienen una duración de 2,5 minutos. Cada cuadro se compone de cinco sub-tramas con una duración de 30 segundos. El mensaje de navegación contiene información, similar al mensaje de navegación GPS, sobre las órbitas de satélites, sus relojes, entre otros.

Por el contrario, GPS, donde la efemérides de radiodifusión se definen por modificación de los elementos Kepler, las efemérides de difusión de los satélites GLONASS se definen por las posiciones y velocidades que se refiere a una Tierra centrada y los sistemas de Tierra-fijo (PZ-90). La transmisión de efemérides de los satélites Glonass se actualiza cada 30 minutos.

2.5.2.- GALILEO

Galileo es una iniciativa Europea hacia el sistema global de navegación por satélite, proporcionando una gran precisión, garantía de servicio de posicionamiento global bajo control civil. GALILEO no es muy diferente de otros GNSS (GPS y GLONASS modernizado (Salgado et al., 2001). Proporcionará navegación autónoma en los servicios de posicionamiento, pero al mismo tiempo, será interoperable con los otros dos sistemas mundiales de navegación por satélite; GPS y GLONASS. El usuario será capaz de tomar una posición con el mismo receptor de cualquiera de los satélites en cualquier combinación. Al ofrecer dos frecuencias de serie, sin embargo, Galileo ofrecerá en tiempo real, la precisión de posicionamiento hasta el rango métrico. Se garantiza la disponibilidad del servicio a todos, en las circunstancias más extremas se informará a los usuarios en cuestión de segundos del fallo de cualquier satélite. Esto hará que sea adecuado para aplicaciones donde la seguridad es de vital importancia, tales como en trenes que circulan, coches en incluso guiar el aterrizaje de aeronaves. El uso combinado de Galileo y otros sistemas GNSS puede ofrecer un rendimiento mucho mejor para todo tipo de usuarios en todo el mundo. GALILEO se espera que esté en funcionamiento para el año 2008. El primer satélite del sistema Galileo (GIOVE A) ya se ha lanzado el 27 de diciembre 2005.

Segmentos del GALILEO

Los segmentos de GALILEO son casi similares a los de GPS, pero con algunas modificaciones. La principal ampliación de Galileo frente a GPS es la implementación de un segmento global / regional para la integridad de monitoreo. El objetivo es ayudar a la seguridad de la navegación crítica de aeronaves, localizar y guiar trenes (Galileo, 2003).

Segmento espacial

El segmento espacial o las características de la constelación se compone de 30 órbitas terrestres medias (MEO) satélites (27 y 3 satélites de reserva activa), distribuidos de manera uniforme y regular en los tres planos órbita. La altura prevista es ligeramente mayor que la de GPS 23.616 kilometros y la inclinación es 56 °(Benedicto y Ludwig, 2002).

Segmento Terrestre

El segmento de tierra de Galileo es el responsable de la gestión de la constelación de satélites de navegación, control de las funciones principales de la misión de la navegación, tales como determinación de la órbita de los satélites, la sincronización del reloj, la determinación y difusión (a través de los satélites MEO) la integridad de la información, tales como la advertencia a alertas en los requisitos de tiempo de alarma a nivel global. El segmento de tierra a nivel mundial también proporcionan interfaces con los centros de servicio. El segmento de control terrestre estará compuesto aproximadamente de 12-15 estaciones de referencia, 5 estaciones de enlace ascendente y dos centros de control. El segmento terrestre también incluye las estaciones de seguimiento de 16 a 20 estaciones, tres estaciones de subida para la integridad de datos y dos estaciones centrales para los cálculos íntegros.

Segmento de usuario:

El segmento del usuario consiste en diferentes tipos de receptores de los usuarios, con diferentes capacidades en relación con las diferentes señales de Galileo con el fin de cumplir con los diversos servicios de GALILEO los cuales pueden ser observados en la figura 2.11.

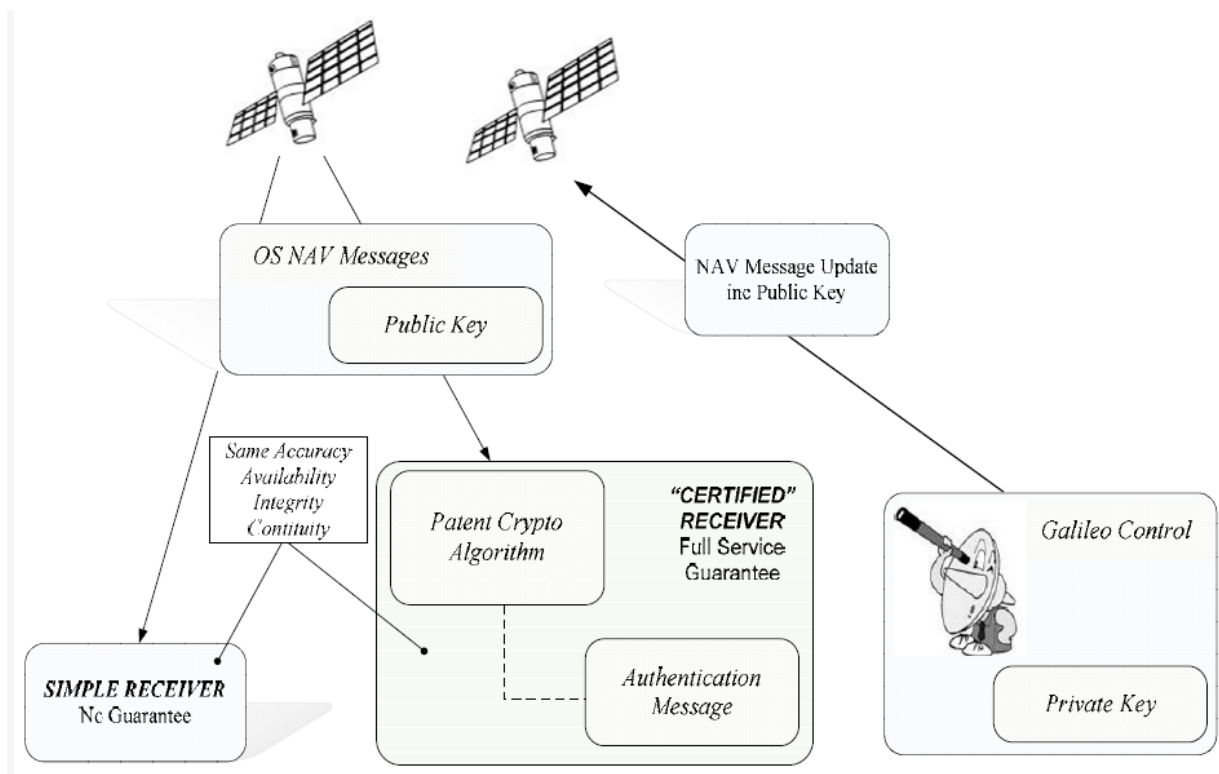


Figura 2.11. GALILEO System Architecture
Fuente: GALILEO, 2003

Señales de GALILEO

La frecuencia de Galileo deben respetar las normas de radio, ya que son discutidas y acordadas en International Telecommunications Union (ITU) foros tales como el World Radio-Communication Conference (WRC). Hubo diferentes estudios que se realizaron antes de la determinación de las asignaciones de señales Galileo con el fin de evitar interferencias con los sistemas GPS y GLONASS, que operan en la misma porción del espectro de radiofrecuencia (Hein et al., 2003). Galileo ofrecerá varias señales de navegación right-hand circular polarization (RHCP) en los rangos de frecuencia de 1164-1215 MHz (E5a y E5b), 1260-1300 MHz (E6) y 1559-1592 MHz (E2-L1-E1) que son parte de Radio Navigation Satellite Service (RNSS) de la asignación (Hein et al., 2003). Todos los satélites de Galileo compartirán la frecuencia nominal, haciendo uso de las técnicas de acceso múltiple por división de código (CDMA). Galileo utilizará un esquema de modulación diferente

para sus señales, el binario de portadora desplazada (BOC) y de fase cuadrática de salto de claves (QPSK).

Definición de los servicios

La constelación Galileo ofrece la capacidad de difusión a nivel mundial un conjunto de seis señales de apoyo a la intemperie, comercialización, seguridad de la vida y los servicios públicos regulados (Hein et al., 2003). Cada señal de navegación se compone de uno o dos códigos de distancia y datos de navegación, así como, en función de la señal, la integridad, comercialización y búsqueda de datos y salvamento (SAR). Por satélite para las mediciones de distancia de usuario basada en códigos de distancia y de datos que utilizan en los receptores de usuarios de GALILEO para cumplir con los diferentes servicios (Galileo, 2003). Los principales servicios son:

1. Servicio abierto (OS) de datos: Estos se transmiten en las frecuencias portadoras E5a, E5b y E2-L1-E1. Datos del sistema operativo están disponibles para todos los usuarios y consisten principalmente en la navegación y datos SAR. Servicio abierto ofrece señales de posicionamiento, navegación y temporización, que se puede acceder de forma gratuita.
2. Servicio Comercial (CS), de datos: Estos se transmiten en el E5b, E6 y transportistas E2-L1-E1. Todos los datos son encriptados y CS proporcionada por los proveedores de servicios que interactúan con el centro de control Galileo. El acceso a los datos comerciales se proporciona directamente a los usuarios por el servicio de proveedores. La señal ha sido diseñado para soportar aplicaciones diferenciales muy precisas (con precisión submétrica) usando la señal abierta (opción encriptada) superpuesta con la señal PRS de E6 y también con soporte de aplicaciones de posicionamiento GALILEO y las comunicaciones de redes inalámbricas.
3. La seguridad de la vida de Servicios (SOL) de datos: Estos incluyen, principalmente, la integridad y la precisión de la señal en el espacio (SISA) de datos.

La combinación de estos servicios en Galileo ya sea con el GPS actual, aumentada por las correcciones EGNOS, o la mejora en un futuro del GPS y EGNOS en su integridad. En particular, SOL se basa en las señales de navegación por satélite sin necesidad de utilizar elementos adicionales tales como WAAS, EGNOS. La precisión requerida es de unos 4 metros sobre el globo. Esto podría ser posible mediante la introducción del modelo de la ionosfera sobre la base de mediciones de frecuencia múltiple y modelado de los errores de otros GNSS.

4. Del servicio público regulado (PRS) de datos: Estos se transmiten en E6 y L1 en las frecuencias portadoras. El Servicio Público Regulado se proporciona en las frecuencias dedicadas a proporcionar la capacidad de una mayor continuidad de los servicios que se encuentren bajo control de la EU para las aplicaciones de los gobiernos públicos dedicados en Europea y / o seguridad nacional, tales como policía, protección civil, como algunos servicios de emergencia, así como otras actividades gubernamentales. El PRS es robusto para ser resistente a las interferencias y otras agresiones accidentales o intencionadas.

2.5.3.- GPS

El sistema GPS tiene una enorme versatilidad, respondiendo a las necesidades de una gran variedad de usuarios del posicionamiento. El posicionamiento puntual implica utilizar un solo receptor que determina su posición sobre la base de mediciones de pseudo distancia con códigos hacia al menos cuatro satélites, y efemérides, extraídas estas últimas del mensaje de navegación transmitido por los mismos satélites. Esta modalidad tuvo hasta el 30 de abril de 2000 una exactitud de hasta 100 m en latitud y longitud y hasta 156 m en altura para el 95% del tiempo, suponiendo un coeficiente de Dilución de la Precisión para la Posición (PDOP) menor que 6, según las especificaciones del Servicio de Posicionamiento Estándar (SPS). Desde el 1º de mayo de 2000, en que se eliminó la Disponibilidad Selectiva (SA) (IGS, 2000), las especificaciones del SPS deben dividirse por diez. Existe una modalidad algo más precisa o Servicio de Posicionamiento Preciso (PPS) pero es accesible solamente para usuarios autorizados por el DoD.

Si se necesita un posicionamiento de mejor calidad, existen varias alternativas. La mayoría implican el uso del método diferencial y del observable más preciso que da el sistema, la fase de la portadora o la comúnmente llamada frecuencia. El método diferencial implica calcular coordenadas de nuevos puntos respecto de al menos una estación de referencia, que debe tener coordenadas conocidas a priori, a partir de observaciones simultáneas en todas las estaciones o pares de ellas conformando una red. La situación deseable es que el cálculo diferencial no se encuentre afectado por errores sistemáticos apreciables. En este caso, la exactitud de las coordenadas calculadas estará determinada por la del observable utilizado y la distribución de los satélites en el cielo. El usuario debe ser capaz de controlar la incidencia de los errores sistemáticos en el cálculo de sus vectores a fin de poder obtener una solución precisa y exacta.

Las señales

Como se mencionó brevemente en la página 42, los satélites GPS emiten dos portadoras, L1 y L2. No será descrita aquí la generación de la señal en el satélite ni los detalles de la recepción. Un tratamiento general de estos temas puede encontrarse en (Kleusberg et al, 1996) o (Leick, 1995). La razón para el uso de dos frecuencias es que esto permite la eliminación del retardo producido por la ionosfera. Ambas portadoras están moduladas por varios códigos binarios que proveen las mediciones de pseudodistancia al satélite y su posición. La modulación utilizada es en fase de modo que cada transición en el código produce un cambio en la fase de la señal modulada de 180 grados.

La portadora L1 está modulada por el mensaje de navegación, sucesión de dígitos binarios, que principalmente indican al receptor la posición extrapolada del satélite y el estado de su reloj para el instante de medición (Van Dierendonck et al, 1978).

Tanto L1 como L2 se encuentran además moduladas por otros dos códigos. Esta segunda codificación tiene múltiples propósitos: identificar, desde el receptor, al satélite en que se originó la señal recibida y separarla de las señales de los demás, medir la pseudodistancia satélite-receptor, proteger las señales contra posibles interferencias casuales y/o deliberadas e impedir el uso de algunas capacidades del

sistema a usuarios no autorizados por el DoD. Los códigos utilizados son del tipo pseudo aleatorio. La asignación de un código diferente a cada satélite permite al receptor identificarlos aunque lleguen señales de varios satélites simultáneamente a la misma antena y sobre la misma frecuencia portadora.

El receptor busca el máximo de la autocorrelación del código recibido desde el satélite respecto de una copia del mismo código generada localmente en sincronización con el tiempo del satélite a menos de un error en el reloj local. Esto le permite medir el defasaje causado por la propagación y por la falta de sincronización del reloj local con respecto al patrón del satélite. Este defasaje, multiplicado por la velocidad de la luz es lo que se llama pseudo distancia o distancia afectada de errores de sincronización entre los relojes del satélite y del receptor. Si se dispone de las pseudo distancias a cuatro satélites simultáneamente, se puede calcular la posición de la antena y el error del reloj local respecto del tiempo patrón del sistema.

La precisión de la medición de pseudo distancia depende de la duración mínima de un estado del código o chip-rate . El sistema posee un código de Adquisición Rápida o Clara (C/A). Este es una secuencia con una duración de 1 ms, de frecuencia 1.023 MHz, de acceso público y que modula sólo a L1 . Además existe otro código, llamado P o Protegido. Es una secuencia de dígitos de 266 días de duración, de frecuencia 10.23 MHz, de acceso restringido y que modula a L1 y a L2. El código C/A tiene una frecuencia tal que durante uno de sus estados, la luz, puede desplazarse 300 metros, mientras que el código P tiene una frecuencia 10 veces más alta, por lo que deja trasladar la señal sólo 30 metros entre dos transiciones. Como la autocorrelación de los códigos por el receptor permite detectar desfases menores que 0.01 del chip-rate, la pseudodistancia con códigos permitiría un posicionamiento de precisión entre métrica y submétrica según el código que se utilice. Esto no resultaba así hasta el 30 de abril de 2000 para los usuarios o autorizados dado que el DoD degradaba el posicionamiento puntual en tiempo real, de importancia militar estratégica, mediante la Disponibilidad Selectiva (SA). La SA consistía en una degradación intencional de la marcha de los relojes de los satélites, y de las posiciones de los satélites que se transmiten dentro del mensaje de navegación, llamado proceso ϵ . El primer proceso era el más activo y también el más perjudicial ya que afectaba a las mediciones

mismas. Sus efectos tenían una variación muy rápida y no predecible, por lo que determinaban en la práctica las especificaciones del Servicio de Posicionamiento Estándar (SPS), referidas al comienzo de 2.5.3. El proceso ε en cambio implicaba errores en las efemérides que eran de pocos metros y tenían una variación lenta. Además, el DoD aplica aún en los satélites el Anti Spoofins (AS) o restricción de acceso al código P. Esto impide que terceros reproduzcan espuriamente la señal GPS con fines de utilizar el sistema. Un efecto secundario de la aplicación del AS es que, como el código C/A modula solamente a L1, a los usuarios civiles les resulta más difícil aprovechar las dos frecuencias de GPS, ya que se ha podido mitigar el problema pero esto ha requerido de receptores más complejos y costosos.

Además de las pseudo distancias con códigos, los receptores pueden realizar una medición equivalente sobre la fase de las portadoras L1 y L2. Dado que las frecuencias de L1 y L2 son del orden de 1000 veces mayores que las de los códigos, la precisión de esta observación resulta milimétrica. La precisión de las mediciones de código no es suficiente para las aplicaciones geodésicas que interesan en este trabajo por lo que no nos referiremos nuevamente a ellas.

La observación de fase

Cuando el receptor comienza a observar un satélite y mide por primera vez la diferencia de fase entre las ondas portadoras recibida y generada localmente por él mismo, esta diferencia de fase inicial es un número entero N de ciclos más una fracción de ciclo φ . Al ser todos los ciclos de la portadora idénticos, el receptor puede medir solamente la fracción φ , mientras que la cantidad N no puede ser observada y permanece como una incógnita en el problema del posicionamiento con fase. Llamaremos en adelante N_1^k a la ambigüedad para el satélite k respecto del receptor 1. La ambigüedad es un número entero de ciclos cuya longitud es de aproximadamente 19 cm o 24 cm según se trate de L1 o de L2, respectivamente. En lo subsiguiente se utilizarán las siguientes convenciones:

Observación de fase = φ_1^k ciclos

Pseudodistancia = $\lambda \cdot (\varphi_k^1 + N_1^k) = \Phi_1^k + \lambda \cdot N_1^k$ (metros)

Donde λ representa la longitud de onda de la portadora de que se trate mientras que φ y Φ indican las observaciones de fase en ciclos y en metros respectivamente.

La fase observada en el receptor 1 que recibe la señal del satélite k puede escribirse como en la ecuación 1.24:

$$\Phi_1^k = \sqrt{(X^k - X_1)^2 + (Y^k - Y_1)^2 + (Z^k - Z_1)^2} + c \cdot \delta t^k + c \cdot \delta t_1 - I_1^k + T_1^k + dm_1^k - \lambda \cdot N_1^k + \varepsilon_1^k \quad (1.24)$$

Expresión en la que pueden distinguirse, en orden y expresados en metros:

- la distancia geométrica entre satélite y receptor,
- el error de reloj del satélite,
- el error de reloj del receptor,
- los retardos ionosféricos y troposféricos
- el efecto del multicamino,
- el termino donde influye la ambigüedad y
- el error de observación.

Las magnitudes de los términos de la ecuación anterior son muy disímiles. El error de reloj del receptor $c \cdot \delta t_1$ implica típicamente cientos de km dada la baja calidad de los relojes internos de los receptores, que pueden acumular desfases de hasta 1 ms, equivalente a 300 km de error en el cálculo de la observación. El término $c \cdot \delta t^k$ incluía el proceso δ de la SA, por lo que al haber sido ésta eliminada, disminuyó de varias decenas a sólo pocos metros. La magnitud del efecto ionosférico I_1^k puede alcanzar decenas de metros y depende de la frecuencia. La troposfera es un medio no dispersivo para las frecuencias de las portadoras y su efecto T_1^k alcanza unos pocos metros, mientras que el efecto del multicamino dm_1^k tiene magnitudes de hasta unos pocos centímetros y depende de la frecuencia. Finalmente el últimotérmino, ε_1^k que

representa el error de observación, tiene valores típicos de 2 a 3 milímetros en los receptores geodésicos.

El método diferencial.

Para aprovechar la calidad de la observación de fase se deben modelar todos los términos con una exactitud comparable al error de observación. El primer problema se presenta con los errores de los relojes satelitales, de considerable magnitud, variación rápida y difícil predicción. Existen básicamente dos alternativas para resolver esto. Una de ellas es modelar la marcha de los relojes y demás fenómenos en el nivel de las observaciones crudas representadas en la ecuación (1.24). Un ejemplo de aplicación de esta estrategia para fines científicos es el paquete de procesamiento GPS GIPSY, desarrollado en el JPL (Sovers et al, 1990)(Webb et al.,1997). La otra alternativa posible, y que se emplea en este trabajo a través del Bernese GPS software (Rothacher et al., 1996b), es el método diferencial.

Consiste en el procesamiento de diferencias de observaciones simultáneas, realizadas por al menos dos estaciones a los mismos satélites. El método diferencial aprovecha principalmente el hecho de que los errores de reloj de un satélite tienen el mismo efecto sobre todos los receptores que lo observen en forma simultánea. Además aprovecha la correlación espacial de otros varios efectos: los errores orbitales de un satélite tienen efectos muy parecidos para dos receptores que lo observen simultáneamente separados por una distancia pequeña respecto de la que media entre receptor y satélite, que es del orden 20.000 km. En el caso de los errores por propagación atmosférica, tanto el efecto de la ionósfera cuanto el de la tropósfera están correlacionados espacialmente. Los efectos ionosféricos diferenciales son despreciables sólo para distancias entre receptores menores que 10 km. Si se pretende la máxima precisión en vectores más largos se debe eliminar la contribución significativa de la ionosfera por medio de una combinación adecuada de L1 y L2. Los efectos de la troposfera para dos estaciones que observan simultáneamente pueden considerarse iguales sólo para distancias entre receptores de muy pocos kilómetros. El multicamino y el error de observación, en cambio,

no están correlacionados para mediciones simultáneas por lo que no son atenuados al utilizar el método diferencial sino que sus efectos aumentan en la observación combinada.

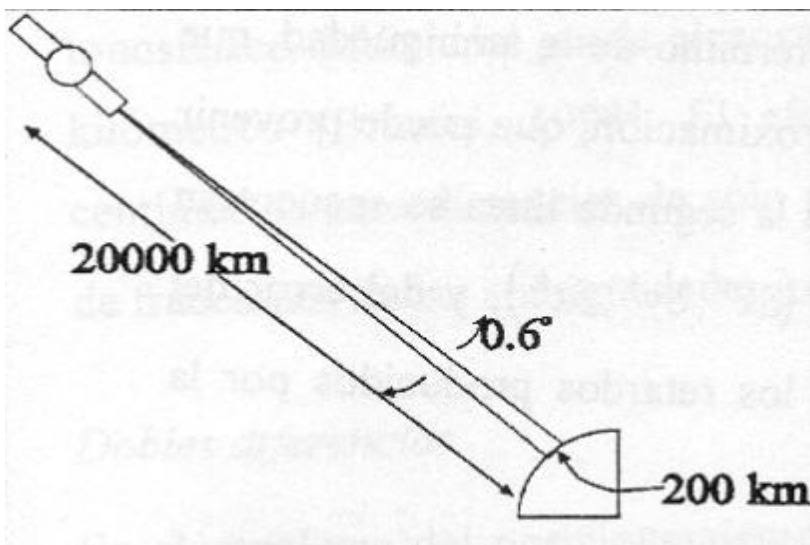


Figura. 2.12. Escalas relevantes para el posicionamiento diferencial.
Fuente: J. Moirano, 2000

En el ejemplo de la figura 2.12 se pueden apreciar las escalas asociadas al posicionamiento GPS diferencial. Las direcciones a un mismo satélite desde dos estaciones separadas unas decenas de km pueden considerarse idénticas, inclusive entre dos estaciones separadas por cientos de kilómetros son muy similares. En la medida que el vector entre estaciones se hace más corto, las señales son afectadas por prácticamente los mismos errores.

Según Virginia MacKern, 2003 a partir de las coordenadas y error de reloj de la estación 1, obtenidos en el posicionamiento puntual con códigos por ejemplo, y la posición del satélite k proveniente de las efemérides transmitidas o precisas, se puede obtener una primera aproximación de la observación de fase:

$$\Phi_{1,0}^k = \sqrt{(X_0^k - X_{1,0})^2 + (Y_0^k - Y_{1,0})^2 + (Z_0^k - Z_{1,0})^2} + c \cdot \delta t_{1,0} - \lambda \cdot N_{1,0}^k \quad (1.25)$$

Donde $N_{1,0}^k$ es una primera aproximación del valor de la ambigüedad correspondiente al satélite k y la estación 1. El valor buscado es $N_{11}^k = N_{1,0}^k + \delta N_1^k$ la incógnita que resta encontrar es la pequeña fracción δN_1^k .

Si el error de reloj local $\delta t_{1,0}$ es conocido con una precisión de un μs , la diferencia entre la fase observada y calculada puede ser aproximada linealmente como se muestra en la ecuación (1.26)

$$\Delta\Phi_1^k = \Phi_1^k - \Phi_{1,0}^k \cong (\cos\alpha_{1,0}^k \cdot \delta X_1 + \cos\beta_{1,0}^k \cdot \delta Y_1 + \cos\gamma_{1,0}^k \cdot \delta Z_1) + c \cdot \delta t_1 + dm_1^k + \varepsilon_1^k - \lambda \cdot N_1^k + (\cos\alpha_{1,0}^k \cdot \delta X^k + \cos\beta_{1,0}^k \cdot \delta Y^k + \cos\gamma_{1,0}^k \cdot \delta Z^k) c \cdot \delta t^k - I_1^k + T_1^k \quad (1.26)$$

Las incógnitas de la posición del receptor quedan expresadas en función de los cosenos directores de la dirección receptor-satélite. Estas direcciones deben provenir de coordenadas a priori para la estación y efemérides del satélite expresadas en el mismo sistema de referencia.

En la primera línea figuran los términos relacionados con el receptor, en orden: efecto del error en la posición a priori de la estación 1, $(\delta x_1, \delta y_1, \delta z_1)$, del error de reloj del receptor, del multicamino, del ruido de observación y finalmente el término de la ambigüedad, que implica la diferencia entre el valor correcto y la primera aproximación, que puede provenir por ejemplo de una solución previa a partir de códigos. En la segunda línea se encuentran los términos relativos al satélite: efectos del error orbital $(\delta x^k, \delta y^k, \delta z^k)$, y del error del reloj del satélite. Finalmente, en la tercera línea figuran los retardos producidos por la ionosfera y troposfera.

Las aproximaciones lineales de dos observaciones de fase simultáneas realizadas desde las estaciones 1 y 2 al mismo satélite k pueden expresarse como sigue:

$$\Delta\Phi_1^k = \Phi_1^k - \Phi_{1,0}^k \cong (\cos\alpha_{1,0}^k \cdot \delta x_1 + \cos\beta_{1,0}^k \cdot \delta y_1 + \cos\gamma_{1,0}^k \cdot \delta z_1) + c \cdot \delta t_1 + dm_1^k + \varepsilon_1^k - \lambda \cdot N_1^k (\cos\alpha_{1,0}^k \cdot \delta X^k + \cos\beta_{1,0}^k \cdot \delta Y^k + \cos\gamma_{1,0}^k \cdot \delta z^k) c \cdot \delta t^k - I_1^k + T_1^k \quad (1.27)$$

$$\Delta\Phi_2^k = \Phi_2^k - \Phi_{2,0}^k \cong (\cos\alpha_{2,0}^k \cdot \delta x_2 + \cos\beta_{2,0}^k \cdot \delta y_2 + \cos\gamma_{2,0}^k \cdot \delta z_2) + c \cdot \delta t_2 + dm_2^k + \varepsilon_2^k - \lambda \cdot N_2^k + (\cos\alpha_{2,0}^k \cdot \delta X^k + \cos\beta_{2,0}^k \cdot \delta Y^k + \cos\gamma_{2,0}^k \cdot \delta z^k) c \cdot \delta t^k - I_2^k + T_2^k \quad (1.28)$$

Restando estas expresiones entre sí se obtiene la ecuación (1.29). Es la aproximación lineal de una simple diferencia de fase, la cual se encuentra libre del error de reloj del satélite siempre que la simultaneidad de las observaciones en las dos ecuaciones esté asegurada al nivel del μs .

$$\Delta\Phi_{12}^k = \vec{\mu}_2^k \cdot \vec{\delta x}_{12} + \vec{\mu}_1^k \cdot \vec{\delta x}_1 + c \cdot \delta t_{12} + \lambda \cdot N_{12}^k + \vec{\mu}_{12}^k \cdot \vec{\delta x}^k - \Delta I_{12}^k + \Delta T_{12}^k + \Delta dm_{12}^k + \varepsilon_{12}^k \quad (1.29)$$

En la ecuación (1.29) aparecen en orden:

- (i) la corrección al vector a priori entre las dos estaciones, que deben ser estimados para obtener las coordenadas de la estación 2 respecto de la posición conocida del punto 1,
- (ii) el error de la posición a priori de la estación 1,
- (iii) la combinación de los errores de reloj de las dos estaciones receptoras, puede llegar a miles de metros, por lo que debe ser estimado o eliminado convenientemente del problema.
- (iv) la combinación de las dos fracciones desconocidas de las ambigüedades para el satélite k desde las estaciones 1 y 2,
- (v) el error orbital del satélite k,
- (vi) los efectos atmosféricos diferenciales entre las dos estaciones y
- (vii) las combinaciones de los errores por multicamino de las dos estaciones.
- (viii) las combinaciones de los errores de medición de las dos estaciones.

Los factores $\vec{\mu}_{12}^k$ representan diferencias entre los cosenos directores de las direcciones desde ambas estaciones al satélite y son muy pequeños, por lo tanto los términos ii) y v) pueden ignorarse sin perder exactitud en el cálculo de un vector corto. En 3.3.1 se mostrará lo antedicho con un ejemplo y también el papel de estos términos en el cálculo de vectores largos. El efecto ionosférico diferencial puede alcanzar valores de decenas de cm en vectores de cientos de kilómetros (Brunini, 1998). El efecto troposférico diferencial puede alcanzar varios centímetros para distancias de sólo pocos kilómetros. Por último queda una combinación de fracciones de las ambigüedades iniciales N_{12}^k que es un número entero estimar.

Dobles diferencias.

En el problema del posicionamiento diferencial con simples diferencias, aún queda entre las incógnitas la combinación de los errores de los relojes locales, que es preciso estimar época por época. Para evitar esto se pueden restar pares de simples diferencias simultáneas correspondientes al mismo par de estaciones hacia satélites diferentes. Tales ecuaciones contienen el tercer término idéntico por lo tanto se eliminan al hacer la diferencia. Se obtienen así las dobles diferencias de fase, cuya aproximación lineal puede escribirse como se muestra a continuación en la ecuación (1.30):

$$\Delta\Phi_{12}^{kl} = \vec{\mu}_2^{kl} \cdot \delta\vec{x}_{12} + \vec{\mu}_{12}^{kl} \cdot \delta\vec{x}_1 + \lambda \cdot N_{12}^{kl} + \vec{\mu}_{12}^{kl} \cdot \delta\vec{x}^k - \Delta I_{12}^{kl} + \Delta T_{12}^{kl} + \Delta dm_{12}^{kl} + \varepsilon_{12}^{kl} \quad (1.30)$$

Donde $\vec{\mu}_{12}^{kl} = \vec{\mu}_{12}^k - \vec{\mu}_{12}^l$ y convenciones de notación análoga valen para los índices de los efectos atmosféricos, el multicamino, las ambigüedades y el error de observación. Los órdenes de magnitud de los nuevos términos son los mismos que los que les corresponden en el análisis realizado para el caso de las simples diferencias ya que en general los satélites l y k pueden estar en cualquier parte del cielo siempre que sean visibles desde ambas estaciones.

El posicionamiento con fases

Se analizarán brevemente las características particulares del observable de fase y sus consecuencias en el posicionamiento.

Ambigüedades y ciclos perdidos.

La existencia de las ambigüedades agrega al problema del posicionamiento al menos una de estas incógnitas por satélite y por receptor. El hecho de que sean números enteros, tanto para las observaciones mismas cuanto para las simples y dobles diferencias, puede ser incorporado al problema para dar mayor confiabilidad al resultado. Se diferencian entonces las soluciones con ambigüedades de punto flotante de las soluciones con ambigüedades de punto fijo o enteras. En general, para todos los métodos de posicionamiento con GPS, si las ambigüedades se fijan correctamente, se obtendrá la solución más exacta posible.

Se mantendrá una incógnita de ambigüedad por satélite correspondiente a la primera observación a menos que el receptor pierda la señal. Si esto sucediera, deberá asumir que existe una nueva ambigüedad en la primera observación a partir de que la recepción se restablezca. Se dice entonces que la señal ha sufrido una pérdida o salto de ciclos enteros (ciclos perdidos). Este proceso puede verse en la ecuación 1.25. Para evitar un aumento excesivo de la cantidad de ambigüedades a estimar, todos los programas de procesamiento de fase realizan un preprocesamiento de las observaciones con el objeto de reparar los ciclos perdidos. Si la reparación se realiza en el nivel de las observaciones de fase directamente, se requiere la asistencia de por ejemplo observaciones de pseudo distancia con código P de muy buena calidad. Este enfoque se utiliza en el paquete de procesamiento GIPSY. Su principal inconveniente es que la presencia del AS hace que sólo algunos de los receptores geodésicos de mayor performance puedan proveer observaciones de código P de la calidad requerida.

Los paquetes de procesamiento que usan el método diferencial en cambio, reparan los ciclos perdidos en el nivel de las dobles diferencias. En este caso los saltos pueden individualizarse sin ayuda de otro observable verificando la continuidad de las observaciones a lo largo del tiempo. Un inconveniente de esta metodología es que al procesar una red de estaciones que miden simultáneamente, y a pesar de que los ciclos perdidos dependen solamente de las parejas satélite–receptor, el análisis debe hacerse vector por vector. En consecuencia, un cambio de configuración de la red que modifique las combinaciones entre estaciones obliga a realizar al menos parte del preproceso de fase nuevamente, sin importar que se trate de las mismas observaciones originales. El éxito del proceso de corrección depende de la causa del salto y de la calidad de las observaciones de fase. Cuanto mayor sea el intervalo de interrupción de la señal, tanto mayor será la dificultad para corregirlo. Las causas más comunes de ciclos perdidos son la presencia de obstrucciones momentáneas entre el receptor y los satélites, una extremadamente baja relación señal ruido, fenómeno que afecta especialmente a L2 y variaciones rápidas del efecto ionosférico, comunes en los períodos de alta actividad solar, que hacen que los receptores pierdan el seguimiento de la señal de fase.

Algunas combinaciones lineales de observaciones particulares útiles.

Se han descrito las simples y dobles diferencias de fase y sus ventajas en el posicionamiento diferencial. Se pueden construir otras combinaciones lineales de observaciones diferentes realizadas por un mismo receptor para obtener nuevas pseudo observaciones con características especialmente adecuadas para resolver problemas específicos. Estas combinaciones tienen la forma general:

$$\Phi_{1\Omega}^k = A \cdot \Phi_{1.1}^k + B \cdot \Phi_{1.2}^k \quad (1.31)$$

Donde Ω indica la combinación realizada mientras que A y B son coeficientes convenientemente elegidos para dar a la combinación resultante ciertas propiedades deseadas.

Las características más buscadas en estas combinaciones son: ambigüedades enteras, valores grandes de la longitud de onda equivalente, inmunidad ante el efecto ionosférico y bajo nivel de ruido. Esto hace que de las infinitas posibilidades existentes, sólo unas pocas combinaciones de observaciones de fase de L1 y L2, o incluso de fases y códigos, tengan utilidad práctica. Entre ellas, nos ocuparemos sólo de las combinaciones libre de ionosfera, widelane y narrowlane por su utilidad para resolver los dos problemas centrales que se presentan en el posicionamiento con fases de alta precisión en regiones extensas: La eliminación de los efectos de la ionosfera y la resolución de ambigüedades como números enteros.

Combinación libre de ionosfera

La ionosfera se extiende aproximadamente entre los 90 km y 1000 km de altura sobre la superficie terrestre. Se trata de una región de la atmósfera muy rica en electrones libres a causa de la ionización producida por la radiación solar en los gases allí presentes. La existencia de estas partículas cargadas provoca un retardo en la señal GPS que causa errores apreciables en el posicionamiento.

El retardo que sufren las señales GPS al atravesar la ionosfera es inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia de la onda portadora. El término del retardo

ionosférico en las señales GPS para una estación 1 que observa a un satélite k puede escribirse como:

$$I_1^k = \frac{K \cdot TEC_1^k}{f^2} \quad (1.32)$$

Donde κ es una constante, TEC_1^k es el contenido electrónico total encontrado por la señal en su paso por la ionosfera al viajar desde el satélite k al receptor 1, y f es la frecuencia de la onda portadora. Si se cuenta con receptores de doble frecuencia, se puede eliminar la parte significativa del efecto ionosférico mediante una combinación "libre de ionosfera" (Lo). Una combinación lineal de observaciones de fase con esta propiedad se muestra en la ecuación (1.33)

$$\Phi_{1,0}^k = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \Phi_{11}^k + \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \Phi_{12}^k \quad (1.33)$$

Donde Φ_{11}^k y Φ_{12}^k son las observaciones de fase en L1 y L2 respectivamente de la estación 1 al satélite k, siendo f_1 y f_2 las frecuencias portadoras. Desarrollando esta expresión usando la ecuación (1.24) y haciendo explícitos solamente los términos de la distancia, ambigüedades, efecto ionosférico y errores de observación, queda la ecuación (1.34):

$$\Phi_{1,0}^k = \sqrt{(x^k - x_1)^2 + (y^k - y_1)^2 + (z^k - z_1)^2} + \left[\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \frac{K \cdot TEC_1^k}{f_1^2} - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \frac{K \cdot TEC_1^k}{f_2^2} \right] - \left[c \cdot \frac{f_1 \cdot N_{1,1}^k - f_2 \cdot N_{1,2}^k}{f_1^2 - f_2^2} \right] + \left[\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \varepsilon_{12}^k - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \varepsilon_{12}^k \right] \quad (1.34)$$

En la primera línea puede verse que se cancela el término del efecto ionosférico. Otra consecuencia de la combinación realizada es que las ambigüedades resultantes no son ya enteras por lo que en principio su resolución será de tipo "flotante". La razón es que la combinación de términos de la ambigüedad que resulta no puede expresarse como un número entero multiplicado por una longitud de onda λ_0 que pueda asociarse a la señal resultante.

Esto se muestra en el primer término de la segunda línea. Finalmente se ve en el último término que el error de esta combinación, entendido como la desviación

estándar de los errores combinados, aumenta. En efecto, si se considera a las observaciones en las dos frecuencias L1 y L2 tienen varianzas iguales y no están correlacionados, se llega a que la desviación estándar de la observación combinada es aproximadamente tres veces mayor que la de cada una de las componentes, como puede verse en la tabla 2.7 Por esta razón, el uso de la combinación libre de ionosfera para posicionamiento de alta precisión se reserva para el trabajo con vectores de longitud mayor que 10 km; suficiente para que el efecto ionosférico diferencial no sea despreciable. En caso contrario una solución igualmente exacta pero más precisa será la calculada a partir de las observaciones de L1.

Combinaciones lineales útiles para resolver ambigüedades.

Cuando se desea resolver las ambigüedades como números enteros se parte de la mejor aproximación disponible de las coordenadas del punto de interés. A partir del error estimado para esa primera aproximación se puede definir un elipsoide alrededor de la solución a priori con un tamaño suficiente para asegurar que la solución verdadera se encuentre dentro de ella.

Existe en principio un conjunto de infinitas soluciones posibles para las coordenadas de la estación que caerán dentro del elipsoide de error. Sin embargo, si se exige que la solución tenga ambigüedades enteras, las posibles soluciones se reducen a un conjunto finito. Este número de soluciones posibles está controlado por la calidad de las coordenadas a priori, la cantidad de satélites observados, la longitud de onda de la observación de fase o de la combinación de portadoras que se emplee y por la precisión de las observaciones que se estén utilizando. Una vez identificado el conjunto de soluciones “candidatas” se debe seleccionar la correcta. Para una discusión más profunda acerca de la resolución de ambigüedades se recomienda referirse por ejemplo a (Teunissen, 1996).

El éxito de las estrategias de resolución de ambigüedades depende, en primer lugar, de que se pueda reducir convenientemente el conjunto de soluciones posibles o “candidatas” ya mencionado. La razón es que luego se deben ensayar tantas soluciones como candidatas haya. En consecuencia, un aumento del número de ellas implica un incremento enorme de la cantidad de operaciones matemáticas

necesarias para encontrar la mejor solución. En las ecuaciones 1.26 y 1.27 se muestra la reducción del número de soluciones candidatas al usar una combinación de observaciones con una longitud de onda equivalente grande. En segundo lugar, una vez reducido convenientemente el número de soluciones candidatas, es preciso discernir de entre ellas cuál es la correcta. En este proceso el éxito depende en gran medida de que la combinación del ruido de observación y el efecto del multicamino sea pequeña respecto de la longitud de onda asociada a la combinación utilizada. En vectores largos se agregan los efectos troposféricos e ionosférico, que deben ser controlados convenientemente. Las longitudes de onda de las portadoras L1 y L2 son aproximadamente 19 cm y 24 cm respectivamente. Sin embargo, si se dispone de ambas frecuencias, se puede construir la combinación denominada widelane o $L\Delta$, que se forma como se muestra en las ecuaciones (1.35) y (1.36) y cuya longitud de onda es 86 cm.

$$\Phi_{1,\Delta}^k = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \Phi_{1,1}^k + \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \Phi_{1,2}^k \quad (1.35)$$

$$\Phi_{1,\Delta}^k = \sqrt{(x^k - x_1)^2 + (y^k - y_1)^2 + (z^k - z_1)^2} - \frac{K.TEC_1^k}{f_1 \cdot f_2} - \frac{c}{f_1 - f_2} \cdot (N_{1,1}^k - N_{1,2}^k) + \frac{f_1 \cdot \varepsilon_{11}^k - f_2 \cdot \varepsilon_{12}^k}{f_1 - f_2} \quad (1.36)$$

donde:

$$\lambda_{\Delta} = \frac{c}{f_1 - f_2} \approx 86 \text{ cm}$$

La resolución de ambigüedades para $L\Delta$ en vectores cortos es mucho más sencilla que para L1 o L2 ya que para el mismo entorno de error alrededor de las coordenadas a priori se tienen considerablemente menos soluciones posibles. Los inconvenientes de esta combinación lineal son por un lado que su desviación estándar es alrededor de 5 veces superior al de L1, como puede verse en la tabla 2.7. Esto hace que las ambigüedades de $L\Delta$ puedan ser resueltas en forma confiable solamente para vectores de hasta pocas decenas de kilómetros de longitud y que la solución correspondiente tenga baja precisión respecto de la que puede lograrse usando L1. En consecuencia, se la utiliza sólo como paso previo para poder resolver

las ambigüedades de la combinación narrowlane o $L\Sigma$. Esta nueva pseudo observación es obtenida al combinar las observaciones de fase en L1 y L2, como se indica en la ecuación (1.37) y tiene una longitud de onda de aproximadamente 11 cm. La solución obtenida sobre la base de este nuevo observable no sufre del alto ruido de la combinación $L\Delta$ (ver tabla 2.7).

$$\Phi_{1,\Sigma}^k = \frac{f_1}{f_1+f_2} \cdot \Phi_{1,1}^k + \frac{f_2}{f_1+f_2} \cdot \Phi_{1,2}^k \quad (1.38)$$

$$\Phi_{1,\Sigma}^k = \sqrt{(x^k - x_1)^2 + (y^k - y_1)^2 + (z^k - z_1)^2} + \frac{K \cdot TEC_1^k}{f_1 \cdot f_2} - \frac{c}{f_1 + f_2} \cdot (N_{1,1}^k + N_{1,2}^k) + \frac{f_1 \cdot \varepsilon_{11}^k + f_2 \cdot \varepsilon_{12}^k}{f_1 + f_2} \quad (1.37)$$

donde:

$$\lambda_{\Delta} = \frac{c}{f_1 + f_2} \approx 11cm$$

Debe notarse sin embargo, que el efecto ionosférico sobre $L\Sigma$ tiene la misma magnitud que sobre widelane (ver tabla 2.7) y su longitud de onda es muy corta, por lo que la resolución de las ambigüedades se dificulta cuando los vectores no son cortos.

Tabla: 2.7 Características comparativas entre las combinaciones lineales más usadas.

Observable	Carácter de las N	Longitud de onda	Error de observación, relativo a L1	Efecto ionosférico, relativo a L1
L1	Enteras	19 cm	1	1
L2	Enteras	24 cm	1	1,6
Libre de ionosfera (L0)	No enteras	-	3	0
Widelane($L\Delta$)	Enteras	86 cm	5,7	1,3
Narrowlane($L\Sigma$)	Enteras	11 cm	0,7	-1,3

Además de las combinaciones antes apuntadas se utilizan también otras que involucran observaciones de códigos y de fases. Estas son empleadas por las

estrategias rápidas de resolución de ambigüedades aprovechando el carácter no ambiguo de las observaciones de código. Las combinaciones de código y fase permiten obtener estimaciones de la solución suficientemente buenas como para resolver las ambigüedades de la fase entre pocos candidatos. Para lograr ese objetivo estas estrategias necesitan observaciones de código P de alta calidad en las dos frecuencias, lo que permite resolver las ambigüedades de $L\Delta$ en el nivel de las observaciones sin diferenciar.

El posicionamiento diferencial con fase

En la ecuación (1.39) se plantea la aproximación lineal para el problema del posicionamiento con simples diferencias de fase en una época incluyendo, para mayor claridad, sólo a los términos de la geometría, relojes locales y ambigüedades.

$$\begin{aligned}
 \Delta\Phi_{12}^k &= \cos\alpha_1^k \cdot \Delta x_{12} + \cos\beta_1^k \cdot \Delta y_{12} + \cos\gamma_1^k \cdot \Delta z_{12} + c \cdot \Delta t_{12} - \lambda \cdot N_{12}^k \\
 \Delta\Phi_{12}^l &= \cos\alpha_1^l \cdot \Delta x_{12} + \cos\beta_1^l \cdot \Delta y_{12} + \cos\gamma_1^l \cdot \Delta z_{12} + c \cdot \Delta t_{12} - \lambda \cdot N_{12}^l \\
 \Delta\Phi_{12}^m &= \cos\alpha_1^m \cdot \Delta x_{12} + \cos\beta_1^m \cdot \Delta y_{12} + \cos\gamma_1^m \cdot \Delta z_{12} + c \cdot \Delta t_{12} - \lambda \cdot N_{12}^m \\
 \Delta\Phi_{12}^n &= \cos\alpha_1^n \cdot \Delta x_{12} + \cos\beta_1^n \cdot \Delta y_{12} + \cos\gamma_1^n \cdot \Delta z_{12} + c \cdot \Delta t_{12} - \lambda \cdot N_{12}^n
 \end{aligned} \tag{1.39}$$

Donde $N_{12}^k = N_1^k - N_2^k$. Se ve que es preciso resolver las tres incógnitas de posición relativa, la combinación de los errores de reloj de los receptores, y además una ambigüedad por cada satélite. El sistema de ecuaciones es sub abundante, por lo que no puede resolverse con esta información ni tampoco aumentando el número de satélites observados. Es fácil deducir que para dobles diferencias de fase la situación es análoga, ya que se cancela la combinación de errores de los relojes locales, pero las ambigüedades se combinan y siguen permaneciendo en el problema, una por cada doble diferencia.

Se ve que la resolución de las ambigüedades requiere de información adicional a la disponible en las observaciones de fase en sólo una época de observación. La inclusión de, por ejemplo, las observaciones de la época siguiente, no resuelve el problema. La razón es la lentitud con que varía la configuración geométrica de satélites y receptores. En efecto, en las ecuaciones de simples diferencias (1.39), se ve que las incógnitas de posición relativa están multiplicadas por los cosenos

directores de las direcciones desde la estación 1 a los distintos satélites. Las posiciones de los satélites en el cielo varían a razón de aproximadamente 30° por hora, por lo que agregar en el problema las ecuaciones correspondientes a una época muy cercana no aportará información relevante ya que sería casi como repetir las mismas ecuaciones. En otras palabras, el problema se hace deficiente de rango ya que las tres columnas de su matriz de diseño que contienen los cosenos directores antes mencionados resultan linealmente dependientes. Se necesita incorporar observaciones separadas por un intervalo mayor que media hora a fin de que la configuración geométrica varíe lo suficiente como para resolver adecuadamente el problema.

En zonas de trabajo pequeñas existen alternativas menos costosas en términos de productividad para resolver las ambigüedades. Estas técnicas incorporan información adicional a la fase de L1 para cada época de observación. Las más robustas son las que incorporan las observaciones de la fase de L2 y del código P. Para una discusión más detallada de estos métodos referirse a (Kleusberg, et al, 1996) o (Leick, 1995).

En zonas de trabajo extensas las estrategias para resolver las ambigüedades son más limitadas. La presencia del efecto ionosférico dificulta la resolución de las ambigüedades de $L\Delta$ en vectores de longitudes mayores que unas pocas decenas de km. La solución a partir de L0 es confiable si se mide el tiempo suficiente como para resolver las ambigüedades flotantes.

Una estrategia utilizada por muchos paquetes de procesamiento es la siguiente: se obtiene primero una solución con L0 (ambigüedades flotantes). Luego se calcula una solución $L\Delta$ estimando solamente las ambigüedades y dejando las coordenadas provenientes del cálculo anterior (L0) fijas. Este paso es delicado ya que, como se mencionó antes, $L\Delta$ sufre 1.3 veces el efecto que la ionosfera produce en L1. Esto, combinado con el alto ruido que presenta $L\Delta$ hace que para las distancias consideradas aquí pueda producirse una solución errónea. Si se ha logrado resolver las ambigüedades $L\Delta$, puede reescribirse el término de la ambigüedad en la ecuación de la combinación libre de ionosfera L0 de la siguiente manera:

$$\Phi_{1,0}^k = \sqrt{(x^k - x_1)^2 + (y^k - y_1)^2 + (z^k - z_1)^2} + \left[\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \frac{K.TEC_1^k}{f_1^2} - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \frac{K.TEC_1^k}{f_2^2} \right] - \left[c \cdot \frac{f_2}{f_1^2 - f_2^2} N_{1,\Delta}^k + \frac{c}{f_1 + f_2} N_{1,1}^k \right] + \Delta T_1^k + \left[\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \varepsilon_{11}^k - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \varepsilon_{12}^k \right] \quad (1.40)$$

Donde vemos que la ambigüedad desconocida restante $N_{1,1}^k$, es entera. Su longitud de onda asociada es $c/(f_1 + f_2)$ que como se vió antes vale 11 cm por lo que se la denomina narrowlane ($L\Sigma$). Su longitud de onda efectiva es sin embargo el doble ya que siempre vale que si $N_{1,\Delta}^k$ es par (impar), entonces $N_{1,\Sigma}^k$ será par (impar). El paso siguiente en esta estrategia es resolver las ambigüedades narrowlane como números enteros en la combinación L0 junto con las componentes del vector medido. Este observable se encuentra libre del efecto ionosférico, pero sí es sensible al efecto troposférico diferencial, al multicamino, y al ruido de la observación L0, que es tres veces el de L1. Como se mencionó anteriormente, la perturbación ionosférica hace que esta estrategia implique siempre cierto riesgo. En consecuencia resulta conveniente, antes de adoptar la solución L0 de ambigüedades fijas como final, compararla con una solución L0 de ambigüedades flotantes y controlar que las diferencias estén bien por debajo del tamaño del ciclo de la portadora.

La resolución de ambigüedades enteras se facilita si se mide durante mucho tiempo ya que esto permite producir mejores estimaciones flotantes de las mismas y por ende menor cantidad de candidatos posibles para la solución. Sin embargo cuando se miden vectores durante más de 4 horas, la diferencia entre fijar o no las ambigüedades se hace casi despreciable como se muestra en la figura 2.13.

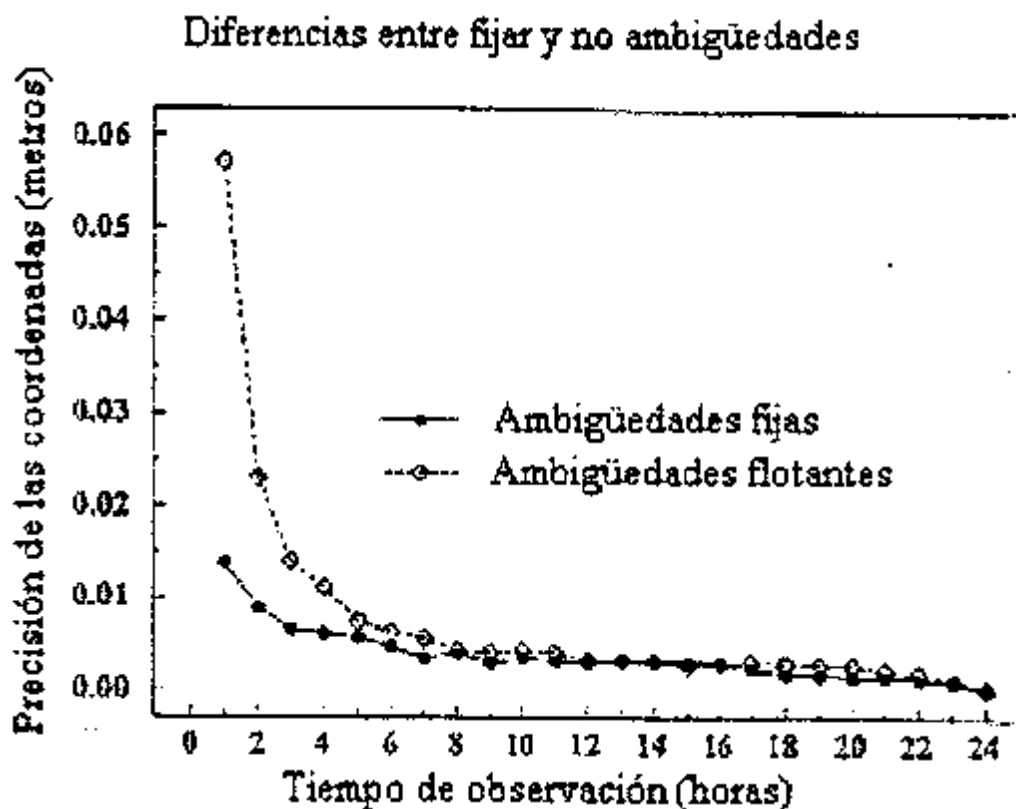


Figura 2.13. Ventaja de la solución de ambigüedades enteras en función de la longitud de la sesión

Fuente: J. Moirano, 2000

Por esto, en casos en que se buscan muy altas precisiones en vectores largos, una práctica segura es medir durante varias horas y calcular luego el vector mediante una solución libre de ionosfera con ambigüedades flotantes. Si, en cambio, se busca llevar la exactitud de los resultados al límite tratando de mejorar el modelo de las observaciones, sería recomendable trabajar con soluciones de ambigüedades fijas.

Problemas particulares del posicionamiento de alta precisión.

En esta sección se describe el estado del arte del posicionamiento con GPS para la materialización de sistemas de referencia de alta precisión. Se abordan en principio los problemas que actualmente ponen el límite a la exactitud del posicionamiento con GPS.

Errores orbitales y de las coordenadas de la estación de referencia.

En la ecuación (1.41) se escribe nuevamente la aproximación lineal de la ecuación de simples diferencias de fase.

$$\Delta\Phi_{12}^k = \vec{\mu}_{12}^k \cdot \delta\vec{x}_{12} + \vec{\mu}_{12}^k \cdot \delta\vec{x}_1 + c \cdot \delta t_{12} + \lambda \cdot N_{12}^k + \vec{\mu}_{12}^k \cdot \delta\vec{x}^k - \Delta I_{12}^k + \Delta T_{12}^k + \Delta dm_{12}^k + \varepsilon_{12}^k \quad (1.41)$$

En el método diferencial, los errores de las coordenadas de la estación de referencia y de las efemérides de los satélites actúan de forma atenuada. El término $\vec{\mu}_{12}^k \cdot \Delta\vec{x}_1$ de la ecuación (1.41) es el error que se introduce en el cálculo de la observación debido a la aproximación de las coordenadas de la estación de referencia. Este término puede acotarse mediante:

$$\vec{\mu}_{12}^k \cdot \Delta\vec{x}_1 \leq \|\vec{\mu}_{12}^k\| \cdot \|\Delta\vec{x}\| = \frac{\sqrt{(x_{20}-x_{10})^2+(y_{20}-y_{10})^2+(z_{20}-z_{10})^2}}{\sqrt{(x^k-x_{10})^2+(y^k-y_{10})^2+(z^k-z_{10})^2}} \cdot \|\Delta\vec{x}\| = \frac{dist(2,1)km}{\approx 20.000km} xerror_1 \quad (1.42)$$

La expresión equivalente para el término del error orbital es análoga y no la escribiremos, la única diferencia respecto de la ecuación (1.42) es que se reemplaza el módulo del error de las coordenadas de la estación de referencia 1 por el error orbital del satélite k. Estas expresiones son de utilidad para realizar una estimación de los efectos de los errores orbitales y de las coordenadas de la estación de referencia en el posicionamiento relativo.

Como ejemplo, se calcula primero el efecto de estos términos en las coordenadas del punto desconocido para un vector de 30 km de longitud considerando un error en las efemérides transmitidas de 3 metros y que se conocen las coordenadas de la estación de referencia con un error de 10 metros. Entonces, los valores de los términos correspondientes serán: 4.5 mm por el error orbital, que considerando 5 satélites a la vista y un PDOP igual a 4, se propaga a un error de 8 mm en las coordenadas calculadas. El error en las coordenadas de la estación de referencia introduce 15 mm en el cálculo de las observaciones, que considerando 5 satélites a la vista y un PDOP igual a 4, se propaga a un error de aproximadamente 26 mm en las coordenadas calculadas. Sumando ambas contribuciones se obtiene un total de

34 mm, que representa algo más que una parte por millón de la longitud de la línea de base.

Multicamino y dispersión de la señal

Ya se hizo una descripción breve de estos fenómenos en lo que se trató como método diferencial. No se trata de efectos constantes, sino que su amplitud depende de la variación de la configuración geométrica de los satélites, la antena y obstáculos reflectores cercanos a ella. Por tal motivo estos efectos tienen períodos en un rango que abarca desde unos pocos minutos a decenas de minutos. Para las observaciones de fase la amplitud del efecto alcanza un límite teórico de 5 cm en L1 considerando las peores condiciones de reflectividad, pero en general es algo más pequeño. De todos modos, debe recordarse que al utilizar combinaciones de las dos portadoras el efecto resultante puede ser mayor. Por ejemplo, al formar la combinación libre de ionosfera, el efecto resultante del multicamino es 2.5 veces el que afecta a L1 menos 1.5 veces el que afecta a L2. En consecuencia, según como sean los signos de los efectos en ambas frecuencias, el efecto neto resultante puede llegar a ser varias veces mayor que el que afecta a L1.

El multicamino es muy difícil de eliminar una vez que ha afectado a las observaciones, por lo que se han ideado varias medidas para rechazarlo implementadas en antenas y receptores de uso geodésico: el uso de antenas preparadas para la recepción de señales de polarización circular derecha asegura un alto grado de atenuación a eventuales señales con el sentido de polarización invertido por reflexiones en el suelo. El máximo rechazo del multicamino se logra en las antenas equipadas con el sistema "Choque ring", consistente en anillos de disposición concéntrica alrededor de la antena propiamente dicha cuya separación produce una máxima atenuación de las señales reflejadas o provenientes de debajo del plano de tierra.

El multicamino puede minimizarse seleccionando sitios abiertos, libres de obstáculos y monturas para la antena que no contengan superficies metálicas horizontales. Además, sus efectos pueden ser atenuados en mediciones estáticas que duren varios días, lo que obedece a su dependencia de la distribución de satélites y

reflectores cercanos a la antena: dado que la configuración de los satélites se repite casi exactamente cada día sidéreo, dos días de observación consecutivos en una estación están afectados por aproximadamente el mismo multicamino si se desfasa el tiempo del primero de ellos en 23h56m4s. Este hecho puede ser aprovechado en las estaciones de rastreo GPS permanente como por ejemplo la red IGS.

Otro problema de naturaleza similar es la dispersión de la señal por objetos muy cercanos a la antena. Este efecto puede producirse en antenas permanentes montadas sobre pilares y produce un error que varía lentamente con la elevación de los satélites, por lo que afecta la determinación de coordenadas y parámetros de corrección troposférica (Johansson, 1998).

Una manera de atenuar este problema que ha sido probada con éxito es la colocación de material absorbente en la banda de las microondas entre la antena y el pilar. (Clark et al., 1999).

Variación de la posición de los centros de fase de las antenas receptoras.

Uno de los problemas más graves de la técnica GPS para materializar un sistema de referencia de exactitud subcentimétrica es la definición física de los puntos de recepción de las señales en las antenas. En general se necesita referir las mediciones GPS a alguna marca física en el terreno.

Una parte de este problema se resuelve midiendo el vector que media entre la marca de interés y alguna referencia física en la antena. Cuando la antena se encuentra centrada sobre la marca esto se reduce a medir la "altura de antena". La medición de la altura de antena es un problema delicado ya que de su correcta ejecución depende el resultado de todo el trabajo. La otra parte del problema es conocer el vector que media entre la referencia física de la antena o Antenna Reference Point (ARP) y el punto efectivo de recepción de la señal o centro eléctrico de la antena. Este vector está especificado por los fabricantes de antenas en sus tres componentes. Sin embargo, calibraciones independientes han detectado diferencias significativas respecto de los valores de fábrica. En general las diferencias horizontales son de pocos milímetros, pero las verticales alcanzan algunos centímetros para muchas antenas. Más aún, la altura del centro de recepción de fase

cambia con la elevación del satélite recibido, siendo sus variaciones mayores que un centímetro para algunas antenas tanto en L1 cuanto en L2. El nombre comúnmente usado para referirse a este problema es antenna Phase Center Variations (PCV) y es el que se usará en lo sucesivo en este trabajo. Su efecto se elimina en posicionamiento solamente si se miden vectores cortos con antenas iguales o igualmente orientadas, como por ejemplo al norte. Análogamente al caso del multicamino, este efecto puede amplificarse para alcanzar varios centímetros si se usan combinaciones de ambas portadoras.

La solución a este problema es una precisa calibración de las antenas GPS y la posterior aplicación de las correcciones por la PCV. Existen dos enfoques básicos diferentes para hacerlo: Las calibraciones absolutas consisten en la determinación de correcciones a la posición del centro de fase para cada elevación a partir de mediciones en laboratorio entre la antena y una fuente emisora, ambas con posiciones conocidas. Esto debe realizarse en un recinto cubierto de material absorbente para microondas para evitar reflexiones múltiples, disponiendo de los instrumentos adecuados para controlar la posición y orientación de la antena durante las operaciones (Schupler, et al., 1994) (Menge, et al., 2000). El otro método es la calibración relativa. Consiste en calcular, mediante posicionamiento diferencial con GPS en una base muy corta, de componentes conocidas a priori con mucha precisión, las PCV para una antena respecto de la otra considerada como patrón (Rothacher, et al., 1995).

Las calibraciones relativas son más comunes que las absolutas debido a que son más económicas y confiables (Rothacher, et al., 1995).(Johansson, 1998). Se utiliza como patrón la antena AOA Dorne Margolin T, un tipo de antena GPS de alta calidad que tiene PCV absolutas pequeñas (Rothacher, et al., 1995).

El Servicio Internacional de GPS (IGS) utiliza estas antenas en la gran mayoría de sus estaciones y ha publicado correcciones de altura para los centros de fase de la mayoría de las otras antenas de uso geodésico existentes en el mercado. El uso de estos coeficientes es recomendable si se pretende obtener alturas de exactitud centimétrica o mejor con GPS, tanto en los casos en que los vectores involucrados

sean de cientos de kilómetros, cuanto en aquellos en que se utilicen antenas diferentes para medir vectores de cualquier longitud (Rothacher, et al., 1996a). Queda sin embargo sin resolver el problema de la calibración absoluta de las antenas patrón. Este no es un problema menor, ya que el error sistemático que provoca en las alturas es invocado hoy día por el IERS como una de las dos razones por las cuales recomienda que las soluciones globales de GPS no sean utilizadas para definir la escala de los marcos ITRF (Blewitt et al., 1999). La otra razón es la dificultad para modelar el efecto troposférico como se verá más adelante.

Efecto de las protecciones de las antenas o radomes

Muchos fabricantes de antenas GPS proveen protecciones para sus productos para el caso en que deban trabajar por tiempos prolongados a la intemperie o en regiones en que nieva.

En general, los radomes producen un retardo adicional en la señal GPS que afecta especialmente la determinación de la altura de la estación pudiendo provocar errores de varios centímetros cuando en el cálculo se determinan parámetros de corrección al modelo troposférico además de coordenadas (Johansson, 1998)(Kaniuth, et al., 1999c). Este retardo depende del material del radome, de su forma, espesor y del dispositivo usado para fijar este accesorio a la antena GPS. A partir del análisis de la influencia de estos factores se han diseñado radomes de forma semiesférica, espesor de 1/8 de pulgada y soporte no conductor, cuyo efecto en el posicionamiento es de muy pocos milímetros (UNAVCO, 1997). El uso de radomes modifica de todos modos el comportamiento eléctrico de la antena GPS al nivel de al menos unos pocos milímetros. Esto, sumado a los efectos de dispersión de la señal por la montura sobre el pilar son argumentos a favor de la determinación in situ de las PCV de las antenas GPS para las estaciones permanentes que contribuyen a la materialización del ITRS.

El retardo ionosférico.

Como ya mencionamos en el posicionamiento con fases, cuando la distancia entre estaciones es mayor que unos pocos kilómetros, los efectos de la ionosfera y troposfera dejan de cancelarse totalmente en las simples diferencias y sus efectos relativos en la ecuación de observación (1.30) superan rápidamente el nivel del error de medición.

El efecto de la ionosfera diferencial puede alcanzar decímetros para distancias de cientos de kilómetros (Brunini, 1998). La disponibilidad de las dos frecuencias permite por un lado el posicionamiento preciso con vectores largos y por otro, la detección y análisis de la distribución de electrones en la ionosfera a escala regional o global, como se muestra por ejemplo en (Brunini, 1998) o (Schaer, et al, 1996).

En vectores largos y disponiendo de las dos frecuencias, el efecto ionosférico tiene aún consecuencias negativas indirectas. Es la principal causa de la dificultad para resolver las ambigüedades como números enteros si se dispone sólo de observaciones de fase. Además puede causar problemas de recepción que deriven en la aparición de gran cantidad de ciclos perdidos, lo que puede complicar significativamente el preprocesamiento. Como se mencionara en el posicionamiento con fases, la combinación $L\Delta$ sufre un efecto ionosférico pronunciado, que a pesar de su gran longitud de onda, dificulta la resolución de ambigüedades en vectores largos. Los efectos ionosféricos diferenciales a que se hace referencia, se deben a pronunciados gradientes regionales en la densidad de electrones en la ionosfera, fenómeno que ocurre mayormente en las regiones ecuatoriales, y también a causa de las TID (Travelling Ionospheric Disturbances), que afectan a todas las regiones del globo. Para superar este problema contando sólo con observaciones de fase se pueden utilizar estrategias como Quasi Iono-Free (QIF) (Rotacher et al., 1996b) que consiste en agregar un retardo ionosférico diferencial por época, por frecuencia y por satélite en el modelo de las observaciones de $L1$ y $L2$. Se agrega además como condición una estimación a priori del retardo diferencial mencionado acompañado de su desviación estándar. Este modelo se utiliza en la determinación de las ambigüedades enteras para $L1$ y $L2$ a partir de una solución flotante y luego se utiliza la combinación $L0$ como se muestra en la ecuación (1.40) para aprovechar las

ambigüedades enteras ya estimadas. Para vectores de cientos de km de longitud la determinación de los retardos ionosféricos a priori es realizada con la asistencia de un modelo ionosférico regional que puede provenir de un procesamiento previo de los mismos datos GPS o por ejemplo de una determinación global independiente como las que se muestran en (Brunini, 1998) o las producidas rutinariamente por el (IGS, 1999a). Esta estrategia ayuda a resolver satisfactoriamente la mayoría de las ambigüedades en vectores de hasta 2000 km de longitud (Rotacher et al., 1996b). Para vectores más largos la combinación de fases y códigos llamada usualmente de Melbourne-Wübbena por haber sido propuesta independientemente por ambos autores, es la opción más efectiva. Se describe aquí un enfoque debido a (Blewitt, 1989): consiste en construir una combinación de códigos y fases en ambas frecuencias que da directamente la ambigüedad $L\Delta$, libre de cualquier efecto sistemático excepto el multicamino y el ruido de las observaciones combinadas. Esta combinación puede ser expresada como se muestra en la ecuación (1.43), donde la

$$\phi_{i2}^k - \phi_{i1}^k + \frac{f_1 - f_2}{f_1 + f_2} \cdot (P_1 + P_2) = n_{i2}^k - n_{i1}^k + e_{i(n_2 - n_1)}^k \quad (1.43)$$

notación minúscula usada para las observaciones de fase indica que están expresadas en ciclos de cada portadora.

Como fuera mencionado en posicionamiento con fases, el éxito de esta estrategia requiere disponer de observaciones de código P de muy buena calidad en ambas frecuencias ya que el término del error está dominado por la combinación de dos componentes: la precisión de la observación y el efecto del multicamino de las observaciones de código. Para que la estrategia de Melbourne-Wübbena permita resolver las ambigüedades de $L\Delta$ la precisión de la combinación de la ecuación (1.43) debe ser mejor que 0.5 metros.

El retardo troposférico.

El efecto de la troposfera es más pequeño y mucho más local que el de la ionosfera. Como no depende de la frecuencia para la banda del espectro electromagnético en que se encuentran las portadoras, debe ser siempre modelado. En el

posicionamiento diferencial, la correlación espacial del efecto y el empleo de modelos sencillos permiten mantener sus consecuencias por debajo de las tolerancias para prácticamente todas las aplicaciones en el caso de vectores de unos pocos kilómetros. Cuando se miden vectores largos, el retardo troposférico diferencial puede introducir errores en la determinación de la altura de varios centímetros por lo que debe ser modelado cuidadosamente si se requieren resultados de la máxima exactitud.

La troposfera es la capa más baja de la atmósfera. Está definida por el hecho de que en ella, la temperatura disminuye linealmente al aumentar la altura. Su espesor es variable entre los extremos de 9 km en los polos y 16 km en el Ecuador. Dentro de esta capa, las ondas electromagnéticas interactúan con átomos y moléculas neutros, lo que produce su refracción, que resulta en un retraso de las señales respecto de una señal ideal que se propagara en el vacío. Este fenómeno ocurre también para capas atmosféricas más altas, pero dado que la mayor parte del efecto proviene de la troposfera por su mayor densidad, es tratado en conjunto y denominado convencionalmente retardo troposférico en lugar de retardo por efecto de la atmósfera neutra, que sería estrictamente más apropiado.

El retardo en una señal que viaja desde un satélite a un receptor en la superficie terrestre causado por la troposfera, suponiendo una distribución de densidad atmosférica dependiente solo del radio se expresa mediante la ecuación (1.44):

$$d_{trop} = \int_{r_s}^{r_a} [n(r) - 1] \cdot \csc\theta(r) \cdot dr + d_{geo} \quad (1.44)$$

Donde θ es la elevación o refractada del satélite y d_{geo} es el retardo geométrico, debido a la diferencia entre el camino real de la señal y el camino recto.

Se han desarrollado muchos modelos para calcular el retardo troposférico dependiendo de las hipótesis que se utilicen para poder integrar la ecuación (1.44).

La gran mayoría expresa finalmente al retardo total como una combinación del tipo:

$$d_{trop} = d_d^z \cdot m_d(Z) + d_w^z \cdot m_w(Z) \quad (1.45)$$

Donde el retardo total por el camino inclinado se obtiene de combinar los retardos cenitales hidrostático y húmedo. El primero depende solamente de la presión

atmosférica en superficie, siendo el segundo también función de la temperatura y humedad superficiales.

En ambos casos, la conversión al retardo inclinado se realiza multiplicándolos por funciones de mapeo adecuadas.

2.6.- Archivo SINEX

SINEX (Solution (Software/technique) INdependent EXchange Format) El acrónimo SINEX fue sugerido por Blewitt et al. (1994) y las primeras versiones, 0,04, 0,05, 1,00 evolucionando a partir de la labor y las aportaciones del Grupo de Trabajo SINEX del IGS. Los Centros de Análisis IGS y Centros Asociados de Análisis utilizan el formato SINEX para sus soluciones semanales desde mediados de 1995. Aunque el formato SINEX fue desarrollado por el IGS, el IVS ILRS y decidió utilizarlo para sus proyectos piloto debido a que SINEX fue diseñado para modular y manejar el GPS así como otras técnicas. Para cumplir con todos los requisitos de soluciones para SLR y VLBI algunos elementos nuevos y más especificaciones detalladas fueron agregados por el grupo de análisis de trabajo para el ILRS y el IVS. Estas extensiones fueron unidas con la anterior versión de SINEX 1.00 para obtener una definición de formato único para todas las técnicas geodésicas espaciales, y después de un intenso debate de la nueva versión llamada SINEX 2.00 se pudo finalizar. Hay que agradecer al grupo de trabajo del marco del referencia del IGS que fue dirigido por R. Ferland, al coordinador del grupo de análisis de trabajo del ILRS R. Noomen, el coordinador de análisis del IVS A. Nothnagel y Altamimi Z., de la sección de IGN para ITRF y sus contribuciones y el asesoramiento sobre una definición nuevo formato SINEX. Mayor información sobre archivos SINEX se encuentra en la página web del IERS.

CAPITULO 3: PROCESAMIENTO DE LINEAS BASE

3.1.- Planificación del proyecto

Con el objeto de realizar una experiencia de aplicación de los fundamentos teóricos y el uso de un software científico en el procesamiento de datos para la adquisición de coordenadas de alta precisión, se trabajó con información correspondiente a las estaciones de monitoreo continuo de Bogotá, Riobamba, Arequipa y Brasil procedentes de la red IGS, durante los meses de abril a agosto del 2011, como se puede ver en la figura 3.1

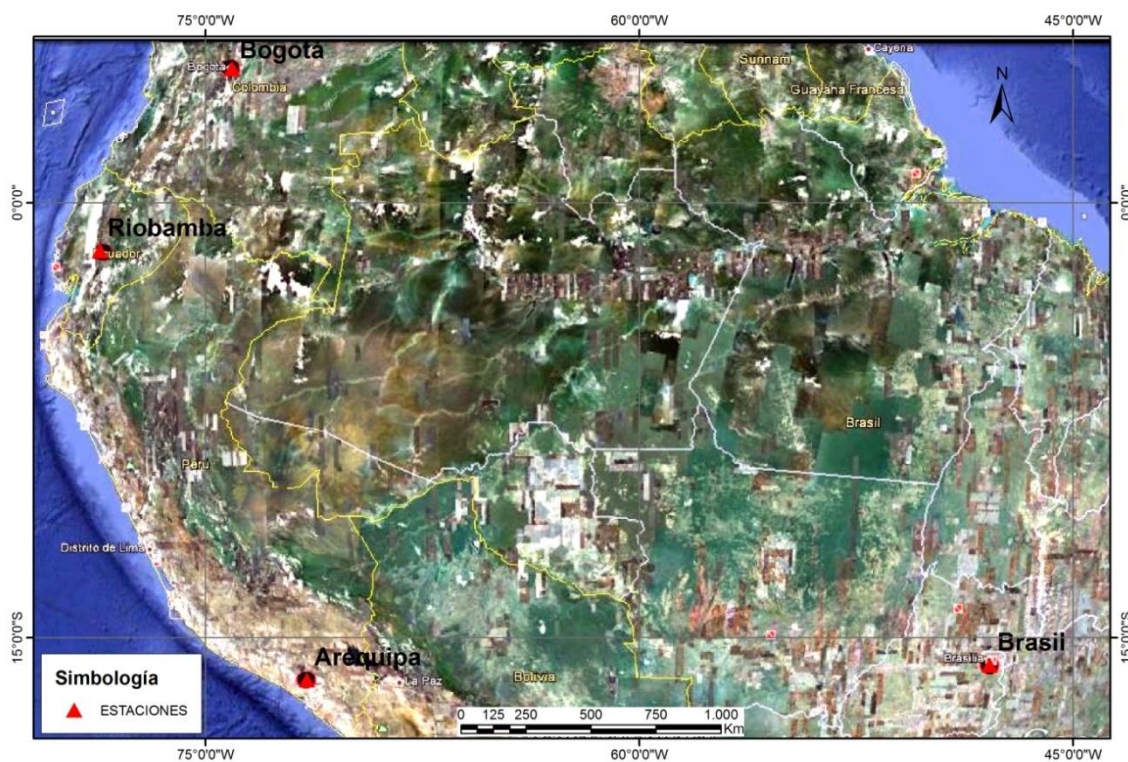
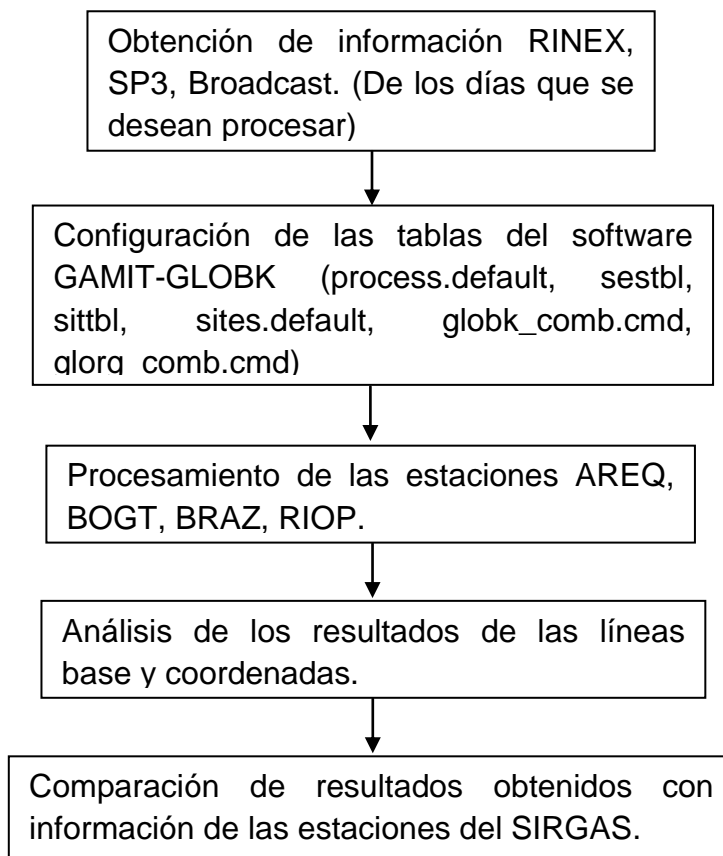


Figura 3.1: Ubicación de las estaciones de monitoreo continuo del IGS utilizadas para el procesamiento. Fuente: imagen google earth.

De forma general se realizaron las siguientes actividades:



3.2.- Software GAMIT-GLOBK

GAMIT es un programa de análisis GPS para la estimación de líneas base, coordenadas y velocidades de estaciones, así como la representación estocástica o funcional de deformaciones, retardos atmosféricos (y vapor de agua precipitable), órbitas de satélites y parámetros de orientación terrestres (EOPs).

GLOBK es un programa para combinar soluciones de distintas redes (GPS, VLBI, SLR) y distintas épocas en una solución única, e imponer a esta solución un marco de referencia apropiado. Los datos de entrada son estimaciones de coordenadas, datos orbitales y de rotación terrestre, junto con sus matrices de covarianza, sin condicionar (ajuste libre), en formato h-file (procedentes de GAMIT) o en formato estándar SINEX, así como un fichero con las coordenadas y velocidades de las

estaciones que definan el marco de referencia. GLOBK utiliza la técnica de filtro de Kalman para combinar las soluciones y ajustar el marco de referencia, dando como resultados coordenadas y velocidades de los vértices de puntos posicionados con GPS.

3.3.- Procesamiento automático con GAMIT/GLOBK

GAMIT se compone de distintos programas que llevan a cabo las funciones de preparación de los datos para su procesamiento (makexp y makex), generación de orbitas de referencia y valores de rotación para los satélites (arc, yawtab), interpolación de tiempo y lugar específico de valores de modelos atmosféricos y cargas (grdtab), observaciones residuales informáticas (O-C's) y las derivadas parciales a partir de un modelo geométrico (model), detectar anomalías o cycle slips en los datos (autcln), y la realización de un análisis de mínimos cuadrados (solve). A pesar que los módulos pueden ejecutarse individualmente, ellos están unidas a través de un flujo de datos, particularmente archivos convencionales de nombres, de tal manera que la mayor parte del procesamiento se hace mejor con los scripts de shell y una secuencia de archivos por lotes creado por un módulo de controlador (fixdrv) para modelar, editar y estimar. Aunque la edición de datos casi siempre se realiza de forma automática, los residuos de la solución se puede mostrar o trazar para que los datos problemáticos se pueden identificar (cview).

Del mismo modo, GLOBK opera a través de distintos programas, los cuales pueden ser llamados con un solo comando o ejecutarse por separado. Entre las funciones principales están: combinar quasiobservaciones - ya sea GAMIT / GLOBK "h-files" o el formato internacionalmente aceptado SINEX - de múltiples redes y / o épocas (glred o globk), y de imponer a esta solución a un marco de referencia adecuado para el objetivo científico (glorg). Se debe tomar en cuenta que globk y glred son el mismo programa, solo que son llamados de distintos modos; glred es usado para leer datos de un día a la vez y generar series de tiempo, globk es usado para apilar épocas múltiples y para obtener una posición media y / o velocidad.

La secuencia completa de pasos para tomar los datos de la fase de series de tiempo se logra con dos scripts shell: sh_gamit busca los datos en bruto o RINEX en un rango de días y llama a los programas de GAMIT para producir restricciones y las estimaciones de coordenadas junto con los datos de fase como un registro del tratamiento; sh_glred utiliza los resultados GAMIT para producir series de tiempo de repetición del día a día o una combinación de horas de archivos que pueden combinarse además con los de otras épocas para estimar la velocidad de la estación. La única preparación que se requiere es el montaje de meta-datos de los registros de la estación, la creación de los archivos de control, la mayoría son comunes en todos los análisis de una época determinada, y la preparación de datos de fase no pertenecientes al IGS en uno o varios directorios en el sistema.

Los programas mencionados anteriormente tanto para GAMIT como para GLOBK se detallan minuciosamente en los correspondientes manuales de cada uno, en ellos se indica de forma puntualizada la función que cumple cada uno para ejecutarlos en un procesamiento de forma manual y controlada.

A continuación se hace un resumen de los archivos generados:

- A - file: versión ASCII de T-file (tabla de efemérides).
- B - file: controla el modo por grupos del procesamiento de datos
- C - file: observaciones – computarizadas (O-C's), derivadas parciales
- D - file: controlador de archivos de las sesiones y los receptores
- E - file: difusión de las efemérides, en RINEX navegación de archivos o FICA Blk 9 format
- G - file: condiciones iniciales orbitales y valores de parámetros no gravitatorios.
- H - file: ajustes completos de la matriz de varianza-covarianza para la entrada a GLOBK
- I - file: reloj del receptor, polinomio de entrada
- J - file: reloj del satellite, coeficientes del polinomio.

- K - file: los valores de reloj del receptor durante el período de observación de compensación, de pseudodistancia
- L - file: coordenadas de estaciones
- M - file: los controles de fusión de datos (C-) para resolver los archivos y edición de programas
- N - file: peso de datos invalida para solve creado a partir de autcln.sum.postfit
- O - file: registro de los análisis (forma reducida de Q-file) para el análisis post-procesamiento
- P - file: registro de ejecución de model
- Q - file: registro de los análisis (solve run)
- S - file: controles de simulación
- T - file: efemérides tabuladas
- U - file: datos meteorológicos y de cargas para model.
- V - file: edición de salida de SCANRMS
- W - file: datos meteorológicos de RINEX met-file format
- X - file: entrada de observaciones
- Y - file: parámetros de orientación del satélite
- Z - file: datos meteorológicos de salida.

3.4.- Archivos de entrada y de salida de GAMIT/GLOBK

La Tabla 3.1 permitirá conocer de forma práctica los archivos utilizados por los distintos programas, así como muestra los archivos resultantes en cada uno de ellos con lo cual permite al usuario conocer mejor el ambiente del programa GAMIT/GLOBK y conocer en gran parte los archivos que son generados por el mismo dentro de sus procesos. Cabe recalcar que información sobre estos y más archivos se los podrá encontrar de forma detallada en los manuales tanto del GAMIT como del GLOBK.

Tabla 3.1 Archivos de entrada y salida del software GAMIT/GLOBK

	ENTRADA	SALIDA
makexp	<ul style="list-style-type: none"> - RINEX (or X-) files - station.info - session.info 	<ul style="list-style-type: none"> - D-file - session.info (optional) - Input batch files for makexp, makej, bctot
makej	<ul style="list-style-type: none"> - RINEX nav file - C-file (optional--See 4.6) 	<ul style="list-style-type: none"> - J-file (satellite clock file)
makex	<ul style="list-style-type: none"> - raw observations (RINEX or FICA) - station.info (rcvr, ant, firmware, HI) - session.info (scenario file) - RINEX nav file - J-file (satellite clock file) - L-file (coordinates of stations) 	<ul style="list-style-type: none"> - K-file (receiver clock) - X-file (input observations)
arc	<ul style="list-style-type: none"> - arc.bat (batch input file) - G-file (orbital initial conditions) 	<ul style="list-style-type: none"> - arcout.ddd (output print file) - T-file (tabular ephemeris for all sat. ses.)
fixdrv	<ul style="list-style-type: none"> - D-file (list of X-, J-, L-, T-files) - sestbl. (session control) - .sittbl. (site control) - T, J, L, X (or C) input 	<ul style="list-style-type: none"> - B-file (bexpy.bat : primary batch file) - B-file (bexpy.nnn : secondary batch files) - I-file (rcvr clock polynomials)
model	<ul style="list-style-type: none"> - L-file (site coordinates) - station.info (ant heights) - X-file - I, J, T-files - antmod.dat (PCV models) - RINEX met file - otl.list/grid, atml.list/grid 	<ul style="list-style-type: none"> - C-file (residuals and partials) - P-file (documentation of models)
autcln	<ul style="list-style-type: none"> - C-file 	<ul style="list-style-type: none"> - C-file (cleaned)
cfmrg	<ul style="list-style-type: none"> - C-file 	<ul style="list-style-type: none"> - M-file (points to the C-files)
solve	<ul style="list-style-type: none"> - C-file - M-file 	<ul style="list-style-type: none"> - Q-file - G-file - H-file - L-file
Cview	<ul style="list-style-type: none"> - M-file and C-files 	<ul style="list-style-type: none"> C-files (cview only)
scandd		
makek	<ul style="list-style-type: none"> - RINEX nav file - J-file - L-file - X-file 	<ul style="list-style-type: none"> - K-file

ngstot	SP3-file	- G-file - T-file
bctot	- RINEX nav file	- G-file - T-file

3.5.- Características generales de procesamiento según la guía para los centros de análisis SIRGAS

1. Intervalo de muestreo: 30 segundos;
2. Máscara de elevación: 3°;
3. Ponderación de las observaciones: asignar peso a las observaciones en función de la elevación, a menor elevación, menor peso. Aquellos Centros de Procesamiento que no puedan incluir este tipo de ponderación, deberán utilizar como máscara de elevación 15°;
4. Introducir, como parámetros conocidos en el ajuste, las órbitas satelitales, las correcciones a los relojes de los satélites y los parámetros de orientación terrestre contenidos en las soluciones finales del IGS. Estos productos se encuentran disponibles en http://igscb.jpl.nasa.gov/components/prods_cb.html;
5. Utilizar los valores absolutos de las correcciones a las variaciones de los centros de fase de las antenas GNSS publicados por el IGS, incluyendo los valores dependientes de la elevación. Éstos se encuentran disponibles en http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/station/general/pcv_archive/. La combinación de antenas con cubiertas protectoras (radomes) debe ser estrictamente considerada en la aplicación de las correcciones a las variaciones de los centros de fase. La identificación de los equipos (receptor + antena) con la que se hace el procesamiento, debe coincidir estrictamente con el contenido de los site log files, los cuales pueden ser consultados en: <ftp.sirgas.org/pub/gps/DGF/station/log>. Una tabla actualizada de los equipos de las estaciones SIRGAS-CON en formato Bernese (AMSUR_YYYYMMDD.STA) puede obtenerse en <ftp.sirgas.org/pub/gps/DGF/station/STA>;

6. Desplazamiento por mareas: debe corregirse el movimiento periódico de las estaciones generado por la carga oceánica. Para el efecto, las correcciones deben estimarse con el modelo de mareas oceánicas FES2004. Dichas correcciones pueden obtenerse de M.S. Bos y H.-G. Scherneck en el sitio web <http://www.oso.chalmers.se/~loading/>.

7. Refracción troposférica: el retardo de la señal en el cenit de la estación causado por la refracción troposférica (parte húmeda) debe calcularse simultáneamente con las coordenadas de la red a un intervalo de dos horas, es decir, doce valores de corrección troposférica por cada día y por cada estación. Para obtener el retardo total y en todas las direcciones (no solamente en el cenit) se recomienda utilizar la función de interpolación (mapping function) de Niell (1996), utilizando ± 5 m como sigma a priori para el primer valor absoluto y ± 5 cm para los once valores relativos siguientes;

8. Para generar la solución final, se recomienda hacer que las ambigüedades de fase correspondan con un número entero;

9. Las características de procesamiento no mencionadas explícitamente en esta sección, se dejan a discreción de los Centros de Análisis

Bajo estas condiciones se procesaron las semanas GPS 1632 hasta la 1650 pertenecientes a los meses de abril a agosto del 2011.

3.6.- RESULTADOS

En consecuencia de un exhaustivo procesamiento se obtuvo las coordenadas semanales de las siguientes estaciones Arequipa, Bogotá, Brasil, Riobamba. Las cuales se muestran en las tablas: 3.2, 3.3, 3.4, 3.5

Tabla 3.2: Coordenadas Cartesianas procesadas por el software GAMIT/GLOBK pertenecientes a la estación de Arequipa

AREQ						
semana GPS	X(m)	Y(m)	Z(m)	$\sigma X(m)$	$\sigma Y(m)$	$\sigma Z(m)$
1632	1942826,21802	-5804070,34078	-1796894,21409	0,00039	0,00099	0,00053
1633	1942826,21785	-5804070,34252	-1796894,21502	0,00041	0,00102	0,00055
1634	1942826,21848	-5804070,34215	-1796894,21555	0,00041	0,00101	0,00054
1635	1942826,21859	-5804070,34303	-1796894,21570	0,00038	0,00096	0,00052
1636	1942826,21768	-5804070,34228	-1796894,21434	0,00043	0,00107	0,00057
1637	1942826,21905	-5804070,34292	-1796894,21543	0,00039	0,00098	0,00053
1638	1942826,21892	-5804070,34364	-1796894,21546	0,00039	0,00096	0,00052
1639	1942826,21887	-5804070,34405	-1796894,21554	0,0004	0,00099	0,00052
1640	1942826,21902	-5804070,34591	-1796894,21633	0,0004	0,00099	0,00052
1641	1942826,21894	-5804070,34500	-1796894,21632	0,0004	0,00099	0,00053
1642	1942826,21898	-5804070,34531	-1796894,21588	0,0004	0,00102	0,00054
1643	1942826,21923	-5804070,34597	-1796894,21630	0,00041	0,00103	0,00056
1644	1942826,21867	-5804070,34656	-1796894,21604	0,00038	0,00097	0,00053
1645	1942826,21862	-5804070,34690	-1796894,21626	0,00039	0,00096	0,00053
1646	1942826,21853	-5804070,34668	-1796894,21572	0,0004	0,00099	0,00054
1647	1942826,21866	-5804070,34593	-1796894,21560	0,00039	0,00098	0,00054
1648	1942826,21813	-5804070,34776	-1796894,21559	0,00041	0,00101	0,00056
1649	1942826,21929	-5804070,34866	-1796894,21645	0,00038	0,00097	0,00053
1650	1942826,21977	-5804070,34751	-1796894,21490	0,00039	0,00099	0,00054

Tabla 3.3 : Coordenadas Cartesianas procesadas por el software GAMIT/GLOBK pertenecientes a la estación de Bogotá

BOGT						
semana GPS	X(m)	Y(m)	Z(m)	$\sigma X(m)$	$\sigma Y(m)$	$\sigma Z(m)$
1632	1744398,935	-6116037,222	512731,7886	0,00061	0,00168	0,00056
1633	1744398,93495	-6116037,21910	512731,78870	0,00063	0,00175	0,00059
1634	1744398,93444	-6116037,21884	512731,78938	0,00062	0,00172	0,00058
1635	1744398,93477	-6116037,21768	512731,78960	0,0006	0,00165	0,00056
1636	1744398,93432	-6116037,21369	512731,78925	0,00058	0,00158	0,00055
1637	1744398,93408	-6116037,21561	512731,78935	0,00058	0,00164	0,00056
1638	1744398,93396	-6116037,21555	512731,79004	0,00059	0,00166	0,00056
1639	1744398,93372	-6116037,21549	512731,79094	0,00062	0,00172	0,00057
1640	1744398,93408	-6116037,21428	512731,79119	0,00059	0,00167	0,00057

1641	1744398,93329	-6116037,21342	512731,79246	0,00059	0,00168	0,00057
1642	1744398,93315	-6116037,21333	512731,79251	0,00059	0,00165	0,00056
1643	1744398,93293	-6116037,21165	512731,79233	0,00059	0,00165	0,00057
1644	1744398,93313	-6116037,20983	512731,79316	0,00058	0,00163	0,00056
1645	1744398,93276	-6116037,20848	512731,79363	0,00057	0,00159	0,00056
1646	1744398,93107	-6116037,20946	512731,79310	0,0006	0,00164	0,00056
1647	1744398,93079	-6116037,21002	512731,79481	0,00063	0,00175	0,0006
1648	1744398,93148	-6116037,20701	512731,79464	0,00059	0,00168	0,00059
1649	1744398,93101	-6116037,21182	512731,79562	0,0006	0,00171	0,00059
1650	1744398,93188	-6116037,21315	512731,79608	0,0006	0,00172	0,00059

Tabla 3.4 : Coordenadas Cartesianas procesadas por el software GAMIT/GLOBK pertenecientes a la estación de Brasil.

BRAZ						
semana GPS	X(m)	Y(m)	Z(m)	σX(m)	σY(m)	σZ(m)
1632	4115014,053	-4550641,585	-1741443,87	0,00113	0,00051	0,00061
1633	4115014,05186	-4550641,58461	-1741443,86845	0,00126	0,00056	0,00067
1634	4115014,05210	-4550641,58495	-1741443,86843	0,00116	0,00052	0,00062
1635	4115014,05243	-4550641,58492	-1741443,86805	0,00108	0,00048	0,00057
1636	4115014,05139	-4550641,58485	-1741443,86729	0,00134	0,0006	0,00071
1637	4115014,05214	-4550641,58504	-1741443,86759	0,0011	0,00049	0,00058
1638	4115014,05296	-4550641,58536	-1741443,86766	0,00109	0,00048	0,00058
1639	4115014,05363	-4550641,58575	-1741443,86777	0,00114	0,00051	0,0006
1640	4115014,05322	-4550641,58525	-1741443,86679	0,0011	0,00049	0,00058
1641	4115014,05429	-4550641,58615	-1741443,86724	0,0011	0,00049	0,00058
1642	4115014,05402	-4550641,58606	-1741443,86701	0,00115	0,00051	0,00062
1643	4115014,05384	-4550641,58596	-1741443,86647	0,00116	0,00051	0,00062
1644	4115014,05634	-4550641,58689	-1741443,86697	0,00107	0,00047	0,00058
1645	4115014,05719	-4550641,58734	-1741443,86701	0,00109	0,00048	0,00059
1646	4115014,05789	-4550641,58796	-1741443,86766	0,00124	0,00055	0,00066
1647	4115014,06097	-4550641,58947	-1741443,86901	0,00114	0,0005	0,00061
1648	4115014,06181	-4550641,58939	-1741443,86840	0,00119	0,00052	0,00064
1649	4115014,06215	-4550641,58957	-1741443,86897	0,00113	0,0005	0,00061
1650	4115014,06131	-4550641,58942	-1741443,86908	0,00115	0,00051	0,00062

Tabla 3.5 : Coordenadas Cartesianas procesadas por el software GAMIT/GLOBK pertenecientes a la estación de Riobamba.

RIOP						
semana GPS	X(m)	Y(m)	Z(m)	$\sigma X(m)$	$\sigma Y(m)$	$\sigma Z(m)$
1632	1255144,95798	-6253609,43380	-182569,80241	0,00076	0,00194	0,00047
1633	1255144,95793	-6253609,43508	-182569,80231	0,00077	0,00198	0,00048
1634	1255144,95820	-6253609,43525	-182569,80174	0,00075	0,00195	0,00048
1635	1255144,95773	-6253609,43454	-182569,80166	0,00074	0,00191	0,00046
1636	1255144,95838	-6253609,43791	-182569,80123	0,00078	0,00204	0,00049
1637	1255144,95722	-6253609,43573	-182569,80087	0,00071	0,0019	0,00046
1638	1255144,95717	-6253609,43518	-182569,80086	0,00073	0,0019	0,00046
1639	1255144,95727	-6253609,43532	-182569,80074	0,00078	0,00205	0,00049
1640	1255144,95649	-6253609,43494	-182569,80130	0,00071	0,0019	0,00046
1641	1255144,95758	-6253609,43665	-182569,80085	0,00076	0,00201	0,00048
1642	1255144,95747	-6253609,43504	-182569,80045	0,00078	0,00203	0,00049
1643	1255144,95717	-6253609,43586	-182569,79992	0,00078	0,00196	0,00049
1644	1255144,95728	-6253609,43717	-182569,79985	0,00081	0,00204	0,0005
1645	1255144,95728	-6253609,43959	-182569,79946	0,0008	0,00199	0,00049
1646	1255144,95723	-6253609,44065	-182569,79918	0,00077	0,00194	0,00047
1647	1255144,95767	-6253609,44261	-182569,79828	0,00087	0,0022	0,00053
1648	1255144,95669	-6253609,44380	-182569,79895	0,00083	0,00212	0,00053
1649	1255144,95561	-6253609,44056	-182569,79820	0,00078	0,00203	0,0005
1650	1255144,95404	-6253609,43803	-182569,79899	0,0008	0,00209	0,00051

Fue necesario extraer información de la página (<ftp://ftp.sirgas.org/pub/gps/SIRGAS/.../sir11p....crd>) de SIRGAS correspondiente a las coordenadas cartesianas finales, ajustadas al marco de referencia IGS08, para realizar una comparación entre las coordenadas procesadas y las oficiales. Y determinar la exactitud obtenida, las coordenadas de semanales oficiales de SIRGAS se muestran en las tablas 3.6, 3.7, 3.8, 3.9.

Tabla 3.6: Coordenadas cartesianas finales de la estación Arequipa

AREQ			
semana GPS	X(m)	Y(m)	Z(m)
1632	1942826,214	-5804070,329	-1796894,21
1633	1942826,215	-5804070,331	-1796894,21
1634	1942826,216	-5804070,334	-1796894,21
1635	1942826,219	-5804070,338	-1796894,211

1636	1942826,218	-5804070,336	-1796894,211
1637	1942826,217	-5804070,336	-1796894,21
1638	1942826,216	-5804070,336	-1796894,209
1639	1942826,216	-5804070,339	-1796894,211
1640	1942826,217	-5804070,342	-1796894,211
1641	1942826,218	-5804070,342	-1796894,211
1642	1942826,216	-5804070,34	-1796894,21
1643	1942826,219	-5804070,342	-1796894,212
1644	1942826,218	-5804070,343	-1796894,211
1645	1942826,218	-5804070,34	-1796894,212
1646	1942826,219	-5804070,341	-1796894,212
1647	1942826,219	-5804070,34	-1796894,214
1648	1942826,218	-5804070,341	-1796894,213
1649	1942826,22	-5804070,343	-1796894,214
1650	1942826,219	-5804070,341	-1796894,212

Tabla 3.7: Coordenadas cartesianas finales de la estación Bogotá

BOGT			
semana GPS	X(m)	Y(m)	Z(m)
1632	1744398,95	-6116037,226	512731,7985
1633	1744398,951	-6116037,226	512731,7995
1634	1744398,951	-6116037,226	512731,7982
1635	1744398,952	-6116037,226	512731,7993
1636	1744398,95	-6116037,22	512731,7984
1637	1744398,95	-6116037,221	512731,799
1638	1744398,949	-6116037,221	512731,7996
1639	1744398,949	-6116037,222	512731,7988
1640	1744398,951	-6116037,225	512731,7993
1641	1744398,949	-6116037,22	512731,8
1642	1744398,949	-6116037,219	512731,8012
1643	1744398,948	-6116037,216	512731,7998
1644	1744398,949	-6116037,219	512731,8002
1645	1744398,948	-6116037,217	512731,7997
1646	1744398,947	-6116037,215	512731,8004
1647	1744398,948	-6116037,217	512731,7994
1648	1744398,949	-6116037,217	512731,7996
1649	1744398,948	-6116037,218	512731,8013
1650	1744398,948	-6116037,22	512731,8016

Tabla 3.8: Coordenadas cartesianas finales de la estación Brasil

BRAZ			
semana GPS	X(m)	Y(m)	Z(m)
1632	4115014,056	-4550641,581	-1741443,871
1633	4115014,059	-4550641,583	-1741443,87
1634	4115014,058	-4550641,582	-1741443,869
1635	4115014,06	-4550641,583	-1741443,87
1636	4115014,058	-4550641,582	-1741443,872
1637	4115014,058	-4550641,582	-1741443,87
1638	4115014,06	-4550641,584	-1741443,87
1639	4115014,058	-4550641,585	-1741443,872
1640	4115014,059	-4550641,585	-1741443,872
1641	4115014,063	-4550641,587	-1741443,872
1642	4115014,063	-4550641,588	-1741443,871
1643	4115014,066	-4550641,591	-1741443,872
1644	4115014,068	-4550641,591	-1741443,872
1645	4115014,069	-4550641,592	-1741443,872
1646	4115014,069	-4550641,593	-1741443,872
1647	4115014,073	-4550641,594	-1741443,874
1648	4115014,074	-4550641,594	-1741443,874
1649	4115014,075	-4550641,595	-1741443,875
1650	4115014,071	-4550641,591	-1741443,874

Tabla 3.9: Coordenadas cartesianas finales de la estación Riobamba

RIOP			
semana GPS	X(m)	Y(m)	Z(m)
1632	1255144,964	-6253609,427	-182569,792
1633	1255144,963	-6253609,428	-182569,7909
1634	1255144,964	-6253609,431	-182569,7905
1635	1255144,966	-6253609,433	-182569,7902
1636	1255144,965	-6253609,433	-182569,7924
1637	1255144,964	-6253609,434	-182569,7907
1638	1255144,964	-6253609,434	-182569,7888
1639	1255144,964	-6253609,439	-182569,7889
1640	1255144,964	-6253609,439	-182569,7899
1641	1255144,965	-6253609,439	-182569,7898
1642	1255144,963	-6253609,436	-182569,7882
1643	1255144,965	-6253609,436	-182569,7905
1644	1255144,965	-6253609,437	-182569,7903

1645	1255144,965	-6253609,438	-182569,7905
1646	1255144,964	-6253609,437	-182569,7899
1647	1255144,964	-6253609,439	-182569,7909
1648	1255144,966	-6253609,445	-182569,7909
1649	1255144,964	-6253609,44	-182569,7901
1650	1255144,964	-6253609,441	-182569,7899

A partir de las coordenadas se obtuvieron las distancias euclidianas y con ello la formación de seis vectores semanalmente (Arequipa-Bogotá, Arequipa-Brasil, Arequipa-Riobamba, Bogotá-Brasil, Bogotá-Riobamba, Brasil-Riobamba), como se muestran en las tablas 3.10, 3.11, En las que se indica de forma semanal la conformación de vectores obtenidas de las coordenadas procesadas por software científico GAMIT/GLOBK y las coordenadas finales ajustadas al marco de referencia IGS08.

Tabla 3.10: Distancias euclidianas a partir de coordenadas procesadas con GAMIT/GLOBK.

semana GPS	areq-bogt (m)	areq-braz (m)	areq-riop (m)	bogt-braz (m)	bogt-riop (m)	braz-riop (m)
1632	2339031,636	2508497,235	1811362,531	3626511,744	861243,212	3675464,473
1633	2339031,636	2508497,235	1811362,531	3626511,742	861243,2125	3675464,472
1634	2339031,638	2508497,234	1811362,533	3626511,743	861243,2122	3675464,473
1635	2339031,638	2508497,235	1811362,533	3626511,743	861243,2129	3675464,473
1636	2339031,636	2508497,235	1811362,532	3626511,74	861243,2128	3675464,473
1637	2339031,637	2508497,234	1811362,534	3626511,741	861243,2124	3675464,474
1638	2339031,638	2508497,235	1811362,534	3626511,742	861243,2129	3675464,474
1639	2339031,639	2508497,236	1811362,534	3626511,743	861243,2133	3675464,474
1640	2339031,639	2508497,237	1811362,534	3626511,742	861243,2148	3675464,474
1641	2339031,64	2508497,237	1811362,534	3626511,744	861243,2148	3675464,475
1642	2339031,64	2508497,237	1811362,534	3626511,743	861243,2142	3675464,474
1643	2339031,64	2508497,237	1811362,535	3626511,742	861243,2141	3675464,474
1644	2339031,64	2508497,239	1811362,535	3626511,743	861243,2153	3675464,477
1645	2339031,641	2508497,24	1811362,536	3626511,744	861243,2157	3675464,479
1646	2339031,64	2508497,24	1811362,536	3626511,746	861243,2142	3675464,48
1647	2339031,642	2508497,242	1811362,537	3626511,749	861243,2146	3675464,483
1648	2339031,641	2508497,244	1811362,536	3626511,748	861243,2167	3675464,484
1649	2339031,643	2508497,243	1811362,538	3626511,751	861243,2159	3675464,484
1650	2339031,642	2508497,242	1811362,536	3626511,751	861243,2177	3675464,484

Tabla 3.11: Distancias euclidianas a partir de coordenadas finales publicadas por SIRGAS

semana GPS	areq-bogt (m)	areq-braz (m)	areq-riop (m)	bogt-braz (m)	bogt-riop (m)	braz-riop (m)
1632	2339031,643	2508497,237	1811362,534	3626511,748	861243,2151	3675464,475
1633	2339031,643	2508497,238	1811362,535	3626511,748	861243,216	3675464,477
1634	2339031,642	2508497,238	1811362,536	3626511,747	861243,2141	3675464,477
1635	2339031,643	2508497,24	1811362,536	3626511,747	861243,2154	3675464,478
1636	2339031,641	2508497,238	1811362,535	3626511,746	861243,2162	3675464,477
1637	2339031,642	2508497,239	1811362,536	3626511,746	861243,2157	3675464,478
1638	2339031,641	2508497,241	1811362,536	3626511,748	861243,2142	3675464,48
1639	2339031,641	2508497,241	1811362,538	3626511,747	861243,2142	3675464,481
1640	2339031,642	2508497,242	1811362,537	3626511,748	861243,2161	3675464,482
1641	2339031,643	2508497,244	1811362,538	3626511,749	861243,216	3675464,483
1642	2339031,642	2508497,243	1811362,537	3626511,748	861243,2162	3675464,482
1643	2339031,643	2508497,243	1811362,537	3626511,748	861243,2162	3675464,482
1644	2339031,643	2508497,246	1811362,537	3626511,75	861243,2167	3675464,484
1645	2339031,643	2508497,245	1811362,538	3626511,75	861243,2163	3675464,485
1646	2339031,643	2508497,243	1811362,538	3626511,749	861243,2162	3675464,484
1647	2339031,645	2508497,246	1811362,54	3626511,752	861243,2167	3675464,488
1648	2339031,644	2508497,248	1811362,54	3626511,753	861243,2174	3675464,491
1649	2339031,646	2508497,248	1811362,541	3626511,756	861243,2179	3675464,491
1650	2339031,645	2508497,247	1811362,54	3626511,755	861243,2177	3675464,49

A continuación se muestra las diferencias entre coordenadas cartesianas finales publicadas por SIRGAS con las coordenadas obtenidas con GAMIT/GLOBK como se muestran en las tablas: 3.12, 3.13, 3.14, 3.15, con el fin de determinar el error del procesamiento con GAMIT/GLOBK.

Tabla 3.12: Diferencia entre coordenadas cartesianas finales publicadas de SIRGAS con coordenadas cartesianas procesadas con software científico GAMIT/GLOBK correspondientes a la estación de Arequipa

semana GPS	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)	error xyz (mm)
1632	3,8	-12,3	-3,8	13,4
1633	2,8	-11,7	-5,4	13,2
1634	2,2	-8,2	-5,3	9,9
1635	0,1	-5,3	-5,0	7,3
1636	-0,7	-6,1	-3,5	7,1
1637	2,2	-7,3	-5,1	9,2
1638	3,4	-8,0	-6,7	11,0
1639	2,9	-4,8	-5,0	7,5
1640	2,5	-4,0	-5,1	7,0
1641	1,3	-2,8	-5,0	5,9
1642	3,2	-5,1	-6,1	8,6
1643	0,6	-3,8	-4,4	5,8
1644	1,0	-3,8	-4,6	6,1
1645	0,6	-6,6	-4,0	7,7
1646	-0,6	-6,1	-4,2	7,4
1647	-0,6	-5,8	-1,9	6,2
1648	-0,1	-6,6	-2,4	7,0
1649	-0,2	-5,3	-2,5	5,8
1650	1,0	-6,5	-3,0	7,2

Tabla 3.13: Diferencia entre coordenadas cartesianas finales publicadas de SIRGAS con coordenadas cartesianas procesadas con software científico GAMIT/GLOBK correspondientes a la estación de Bogotá.

semana GPS	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)	error xyz (mm)
1632	-15,1	4,8	-9,9	18,7
1633	-16,4	7,3	-10,8	21,0
1634	-16,1	7,3	-8,8	19,7
1635	-17,6	8,3	-9,7	21,8
1636	-15,5	5,8	-9,2	18,9
1637	-15,6	5,8	-9,7	19,3

1638	-14,5	5,6	-9,6	18,3
1639	-15,1	6,3	-7,9	18,1
1640	-16,7	10,8	-8,1	21,5
1641	-16,0	6,9	-7,5	19,0
1642	-15,6	5,4	-8,7	18,7
1643	-15,5	4,7	-7,5	17,8
1644	-15,7	8,7	-7,0	19,2
1645	-15,5	8,8	-6,1	18,9
1646	-15,9	5,1	-7,3	18,3
1647	-17,4	6,8	-4,6	19,2
1648	-17,0	10,1	-5,0	20,4
1649	-17,1	6,4	-5,7	19,1
1650	-16,1	6,6	-5,5	18,3

Tabla 3.14: Diferencia entre coordenadas cartesianas finales publicadas de SIRGAS con coordenadas cartesianas procesadas con software científico GAMIT/GLOBK correspondientes a la estación de Brasil.

semana GPS	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)	error xyz (mm)
1632	-3,4	-4,0	1,6	5,5
1633	-7,1	-1,2	1,6	7,4
1634	-5,4	-2,9	0,9	6,2
1635	-7,5	-1,6	2,1	7,9
1636	-6,5	-3,1	4,6	8,5
1637	-5,4	-3,3	2,2	6,7
1638	-6,9	-1,1	2,5	7,5
1639	-4,7	-1,2	4,2	6,4
1640	-6,2	-0,4	4,9	7,9
1641	-8,8	0,9	4,3	9,8
1642	-8,9	2,2	3,5	9,8
1643	-12,4	5,2	5,8	14,6
1644	-11,9	4,5	4,7	13,5
1645	-11,9	4,9	5,2	13,9
1646	-10,6	4,8	4,2	12,4
1647	-11,8	4,9	5,1	13,8
1648	-11,8	5,0	5,6	14,0
1649	-12,4	5,3	6,1	14,9
1650	-9,9	1,9	4,5	11,0

Tabla 3.15: Diferencia entre coordenadas cartesianas finales publicadas de SIRGAS con coordenadas cartesianas procesadas con software científico GAMIT/GLOBK correspondientes a la estación de Riobamba.

semana GPS	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)	error xyz (mm)
1632	-5,7	-6,5	-10,4	13,5
1633	-5,5	-6,9	-11,4	14,4
1634	-6,1	-4,3	-11,2	13,5
1635	-7,8	-2,0	-11,5	14,0
1636	-6,9	-5,1	-8,8	12,3
1637	-7,1	-1,3	-10,2	12,5
1638	-6,8	-1,1	-12,1	13,9
1639	-7,1	3,6	-11,8	14,3
1640	-7,6	3,6	-11,4	14,2
1641	-7,5	2,2	-11,1	13,5
1642	-5,9	1,1	-12,2	13,7
1643	-7,7	-0,0	-9,4	12,2
1644	-7,2	-0,0	-9,6	12,0
1645	-7,4	-2,0	-9,0	11,8
1646	-7,2	-3,3	-9,3	12,2
1647	-6,7	-3,9	-7,4	10,7
1648	-8,8	1,0	-8,1	12,0
1649	-8,2	-0,8	-8,1	11,5
1650	-9,9	2,5	-9,1	13,6

Con el fin de determinar la exactitud de los vectores en estudio, se realizó las diferencias entre vectores obtenidos de coordenadas finales publicados por SIRGAS y los vectores obtenidos a partir de coordenadas procesadas por GAMIT/GLOBK como se indica en la tabla 3.16.

Tabla 3.16: Diferencia de vectores a partir de coordenadas finales y vectores de coordenadas procesadas por GAMIT/GLOBK expresado en milímetros.

semana GPS	areq- bogt (mm)	areq- braz (mm)	areq- riop (mm)	bogt- braz (mm)	bogt- riop (mm)	braz- riop (mm)
1632	-6,7	-2,0	-3,7	-3,4	-3,1	-2,2
1633	-6,2	-3,2	-3,4	-5,3	-3,5	-4,2
1634	-4,0	-3,8	-3,2	-3,5	-1,9	-4,0
1635	-5,0	-4,5	-3,6	-5,0	-2,5	-5,3
1636	-5,9	-3,3	-2,6	-6,5	-3,4	-4,4
1637	-4,7	-4,4	-2,4	-4,6	-3,3	-4,8
1638	-3,2	-5,3	-2,6	-5,4	-1,3	-6,3
1639	-2,7	-4,6	-4,3	-4,0	-0,9	-7,1
1640	-3,3	-5,5	-3,6	-6,1	-1,4	-7,7
1641	-2,3	-6,8	-3,2	-5,2	-1,2	-8,1
1642	-2,4	-6,6	-3,6	-4,5	-2,0	-8,4
1643	-2,8	-6,5	-2,2	-6,0	-2,1	-7,7
1644	-2,6	-6,8	-2,2	-6,6	-1,4	-7,6
1645	-2,8	-4,9	-2,5	-6,3	-0,6	-6,3
1646	-3,2	-3,1	-2,7	-3,8	-2,0	-4,6
1647	-2,9	-4,2	-3,0	-3,2	-2,1	-5,2
1648	-3,3	-4,2	-3,6	-5,3	-0,7	-6,3
1649	-3,2	-5,1	-3,0	-4,8	-2,0	-6,5
1650	-2,8	-5,0	-3,5	-4,2	-0,0	-6,1

3.7 Análisis de resultados

En tablas anteriores se presentaron como resultados, la obtención de las coordenadas cartesianas finales y vectores así como sus respectivas diferencias, a continuación se realiza el cálculo de la *media aritmética*, el *valor mínimo*, el *valor máximo* y la *desviación estándar* para determinar la exactitud obtenida con el software científico GAMIT/GLOBK con respecto a valores oficiales publicados por SIRGAS.

En la tabla 3.17 se puede apreciar los resultados obtenidos respecto a cada una de las estaciones procesadas desde la semana GPS 1632 hasta la 1650, cuyos resultados son expresados en el orden de los milímetros.

Tabla 3.17: Resultados estadísticos de las diferencias entre coordenadas finales oficiales de SIRGAS respecto a las coordenadas procesadas con software científico GAMIT/GLOBK.

AREQ				
	ΔX(mm)	ΔY(mm)	ΔZ(mm)	error XYZ (mm)
máximo	3,8	-2,8	-1,9	13,4
mínimo	-0,7	-12,3	-6,7	5,8
media aritmética	1,3	-6,3	-4,4	8,1
desviación estándar	1,5	2,5	1,3	2,3
BOGT				
	ΔX(mm)	ΔY(mm)	ΔZ(mm)	error XYZ (mm)
máximo	-14,5	10,8	-4,6	21,8
mínimo	-17,6	4,7	-10,8	17,8
media aritmética	-16,0	6,9	-7,8	19,3
desviación estándar	0,8	1,7	1,8	1,1
BRAZ				
	ΔX(mm)	ΔY(mm)	ΔZ(mm)	error XYZ (mm)
máximo	-3,4	5,3	6,1	14,9
mínimo	-12,4	-4,0	0,9	5,5
media aritmética	-8,6	1,1	3,9	10,1
desviación estándar	3,0	3,4	1,6	3,3
RIOP				
	ΔX(mm)	ΔY(mm)	ΔZ(mm)	error XYZ (mm)
máximo	-5,5	3,6	-7,4	14,4
mínimo	-9,9	-6,9	-12,2	10,7
media aritmética	-7,2	-1,2	-10,1	12,9
desviación estándar	1,1	3,2	1,5	1,1
TOTAL				
	ΔX(mm)	ΔY(mm)	ΔZ(mm)	error XYZ (mm)
máximo	3,8	10,8	6,1	21,8
mínimo	-17,6	-12,3	-12,2	5,5
media aritmética	-7,6	0,1	-4,6	12,6
desviación estándar	6,5	5,5	5,6	4,7

Al observar la tabla 3.17, se puede destacar que la media aritmética de todas las estaciones procesadas es 12.6mm por lo que se entiende que dicho resultado es bueno, es decir que las diferencias entre coordenadas finales de SIRGAS en

comparación con las coordenadas procesadas con el software científico GAMIT/GLOBK es pequeño.

A continuación se muestra la tabla 3.18 la cual muestra resultados sobre los vectores

Tabla 3.18: Resultados estadísticos de las diferencias entre Líneas Base (vectores) a partir de coordenadas finales y coordenadas procesadas por GAMIT/GLOBK.

	areq- bogt (mm)	areq- braz (mm)	areq- riop (mm)	bogt- braz (mm)	bogt- riop (mm)	braz- riop (mm)
máximo	-2,3	-2,0	-2,2	-3,2	0,0	-2,2
mínimo	-6,7	-6,8	-4,3	-6,6	-3,5	-8,4
media aritmética	-3,7	-4,7	-3,1	-4,9	-1,9	-5,9
desviación estándar	1,4	1,3	0,6	1,1	1,0	1,7

Los resultados obtenidos de la diferencia entre líneas base es bueno ya que en promedio la mayor diferencia en valor absoluto es de 5,9 mm, Aclarando que se trata de la línea base con mayor longitud, la misma que representa a la distancia entre la estación de Brasil a Riobamba con una longitud aproximada de 3675,464 km. Como también al observar la línea base entre Bogotá y Riobamba tratándose de la más pequeña con una longitud de 861,243 Km se determina un error promedio en valor absoluto de 1,9 mm.

A continuación se muestra en la figura 3.2, la ubicación de las estaciones y la conformación de los 6 vectores tratados anteriormente.

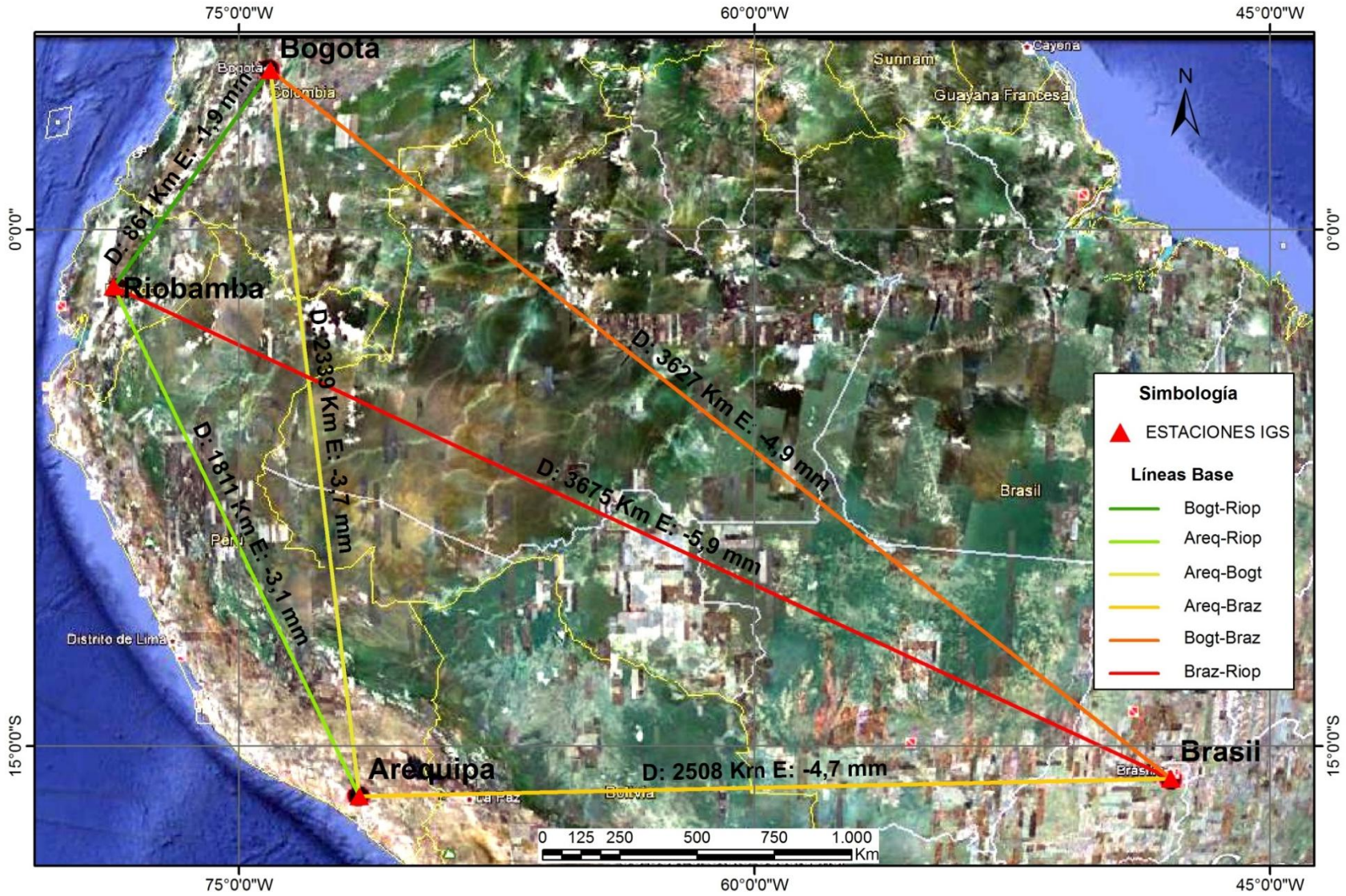


Figura 3.2: Estaciones procesadas y sus respectivas líneas base. Fuente: imagen google earth

De forma posterior se analizan algunos vectores para analizar el error en relación a las distancia entre las estaciones, como se muestra en la figura 3.3

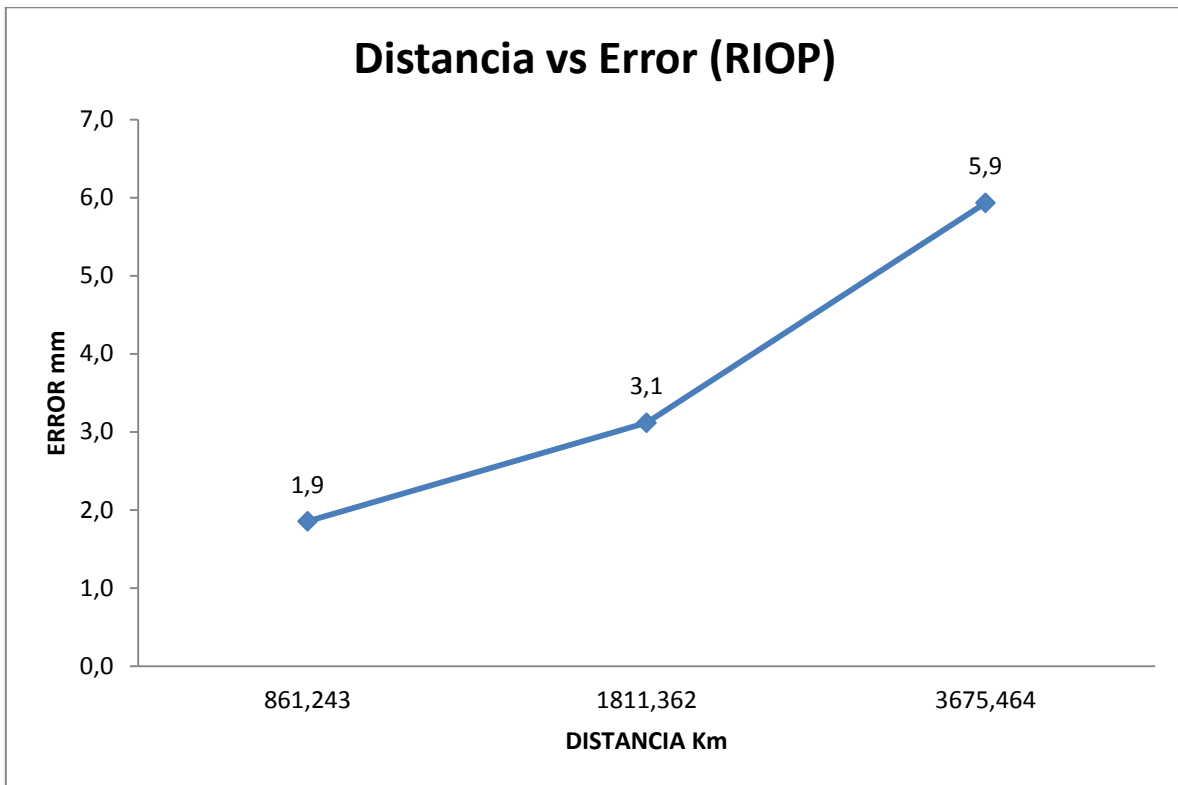


Figura 3.3: Distancia en Km vs Error en mm tomando como centro a la estación RIOP

Al analizar la figura 3.1 se observa un notorio incremento en el error a medida que la línea base incrementa su longitud, ya que la distancia entre RIOP y BOGT es de 861 Km aproximadamente y se observa un error promedio en valor absoluto de 1,9 mm en comparación con la línea base de las estaciones RIOP a BRAZ la cual tiene aproximadamente 3675 Km y posee un error promedio en valor absoluto de 5,9 mm en dicha longitud. Hay que recalcar que se toma el valor absoluto del promedio de cada estación para que la gráfica no se preste para confusiones al existir valores negativos en ella. Lo que se trata de explicar es que el error aumenta conforme la línea base tiene mayor longitud.

A continuación se presenta la figura 3.4 que pertenece a otra línea base para poderla analizar.

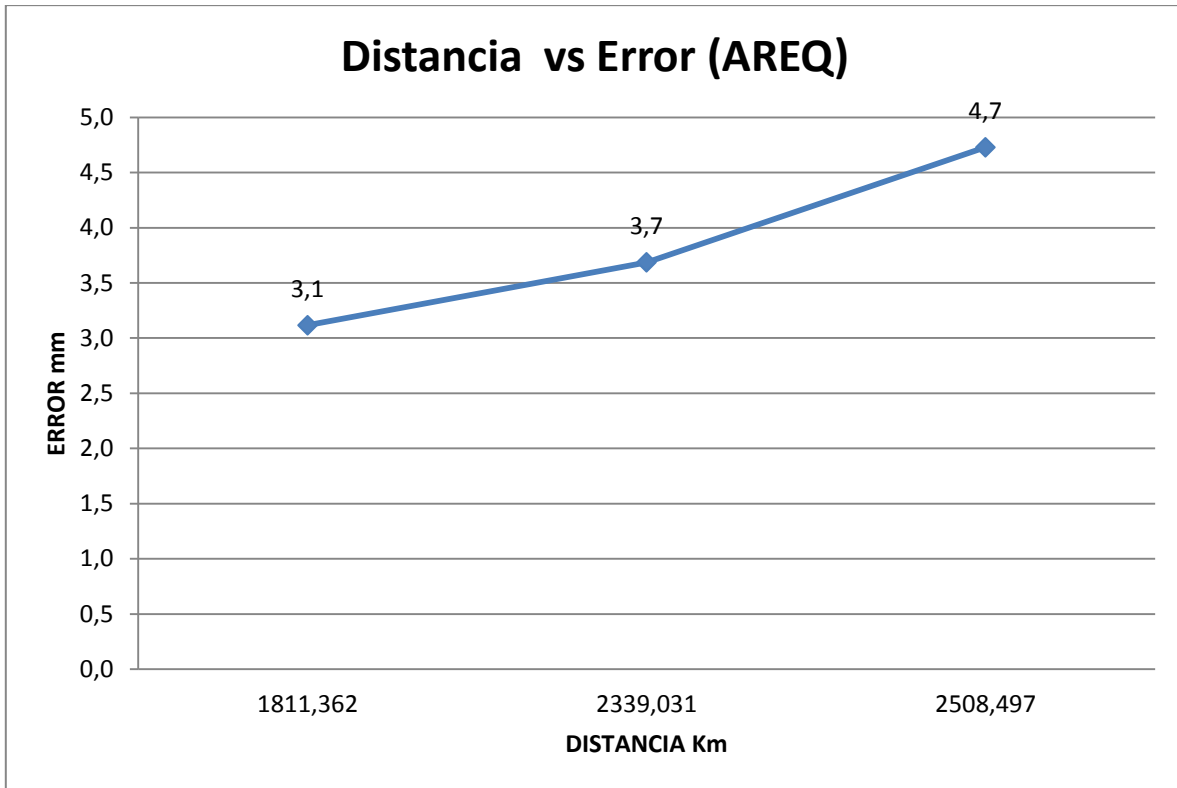


Figura 3.4: Distancia en Km vs Error en mm tomando como centro a la estación AREQ

Se observa en la figura 3.4, las distancia desde la estación de Arequipa y se puede observar que mantiene el mismo comportamiento de los datos, es decir que es notorio el incremento del error conforme aumente la longitud del vector, siendo menor en el primer punto del gráfico, pudiéndose observar una distancia de 1811 Km para la línea base Arequipa – Riobamba con un error promedio absoluto de 3,1 mm y aumentando paulatinamente hasta el último punto que pertenece a una distancia aproximada de 2508 Km para la línea base Arequipa – Brasil con un error promedio absoluto de 4,7 mm.

Para comprobar lo antes dicho se cita la figura 3.5 a continuación lo cual ratificará lo antes expuesto.

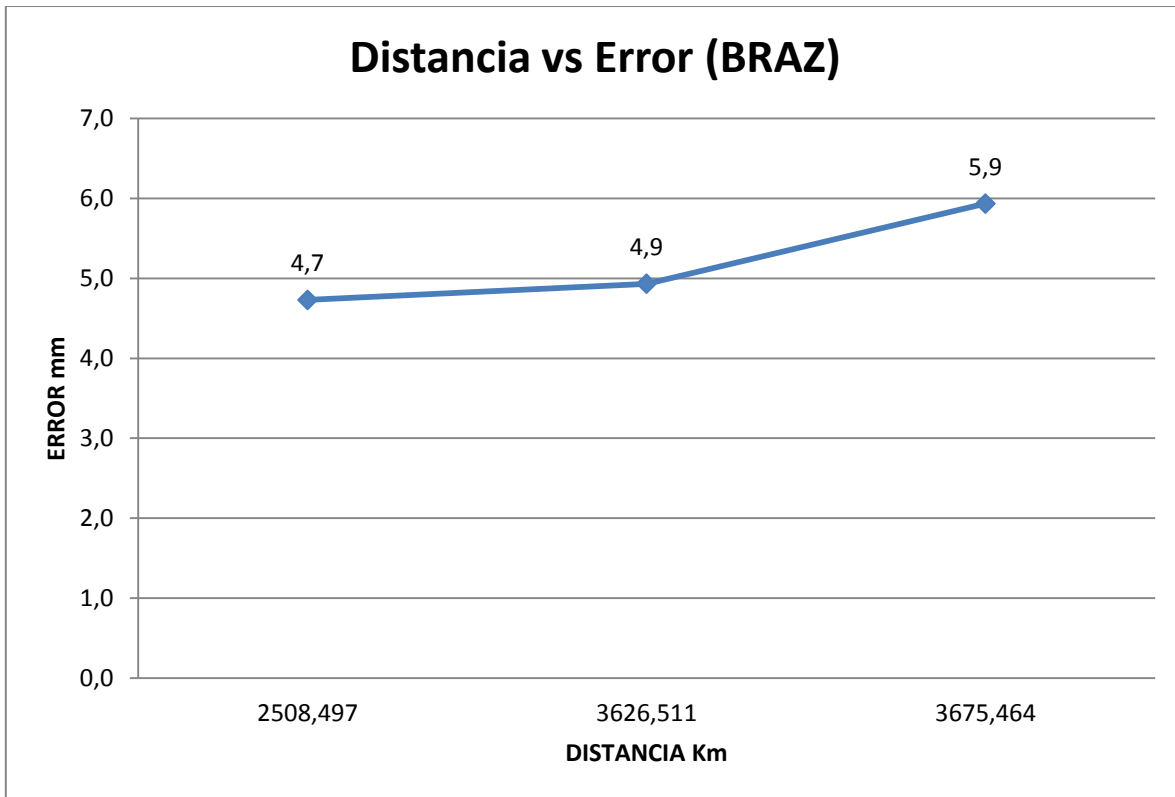


Figura 3.5: Distancia en Km vs Error en mm tomando como centro a la estación BRAZ

En la figura 3.5, se muestran las distancias desde la estación Brasil al resto de estaciones en las cuales también se puede observar el incremento del error a medida que la longitud del vector crece, se escogió dichos vectores puesto que corresponden a los de mayor longitud. Para este gráfico la menor distancia corresponde a la línea base entre las estaciones Brasil - Arequipa con una longitud de 2508 Km. aproximadamente y posee un error promedio en valor absoluto de 4,7 mm en dicha longitud, así como la mayor longitud pertenece a la línea base entre Brasil y Riobamba con una longitud de 3675 Km aproximadamente y un error promedio en valor absoluto de 5.9 mm. Hay que recalcar que se toma el valor absoluto del promedio de cada estación para que la gráfica no se preste para confusiones al existir valores negativos en ella. Lo que se trata de explicar es que el error aumenta conforme la línea base tiene mayor longitud.

CAPITULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1.- Conclusiones

- Es notorio que el procesamiento con software científico es mucho más laborioso debido a que incluye en el proceso a varios factores ignorados por un procesamiento con software comercial, factores como cargas oceánicas, movimientos de polo, efemérides precisas entre otras.
- Al realizar la comparación entre coordenadas finales publicadas por SIRGAS con las coordenadas procesadas con el software científico GAMIT/GLOBK se determinó que el error promedio de cada una de las estaciones en estudio pasaron la exactitud requerida al tener un error promedio inferior a los 2 cm propuestos en esta tesis. Es necesario indicar que la mejor estación fue Arequipa con un error promedio de $\pm 8,1$ mm seguida por la estación de Brasil con $\pm 10,1$ mm de error promedio, a continuación la estación Riobamba con 12,9 mm y la estación Arequipa con un error promedio de $\pm 19,3$ mm que aún está bajo los ± 2 cm de error establecidos como límite. Hay que recalcar que el error promedio de todo el proceso es de $\pm 12,6$ mm lo cual sugiere un buen resultado respecto a la exactitud de las coordenadas procesadas.
- Con respecto a la precisión obtenida en el procesamiento de coordenadas con software científico se puede decir que los resultados fueron excelentes puesto que el error promedio en general respecto a la precisión es $\pm 1,7$ mm. La estación con mejor precisión fue Arequipa puesto que su precisión o error promedio fue de $\pm 1,2$ mm y la estación que peor resultado con respecto a su precisión fue Arequipa ya que la precisión en promedio obtenida fue de $\pm 2,2$ mm. Lo cual indica que los resultados obtenidos cumplen con las metas de esta tesis lo cual requería una precisión y exactitud mejores a ± 2 cm.

- Al analizar las líneas base que a mayor distancia, mayor es el error en los vectores puesto que en las líneas base estudiadas es notorio el incremento del error conforme la longitud aumenta, siendo el más evidente el caso de los vectores Riobamba – Bogotá con una longitud aproximada de 861 Km y un error promedio de -1.9 mm siendo este el vector más pequeño y Brasil-Riobamba con un error promedio de -5,9 mm en una línea base con una longitud aproximada de 3675 Km perteneciendo esta al vector más grande.
- Es importante también dar a conocer que en el procesamiento de las coordenadas cartesianas obtenidas con el software científico GAMIT/GLOBK, se las pudo definir al marco de referencia el cual fue ITRF08.
- Hay que destacar que el software científico GAMIT/GLOBK tiene un gran valor agregado ya que es un software libre y por ello acata las políticas de Estado por lo cual es importante el aprendizaje y la difusión del mismo con fines científicos.

4.2.- Recomendaciones

- En el procesamiento se tomó el archivo ITRF08.apr propio del software, el cual fue utilizado para darle un marco de referencia a las coordenadas procesadas, pero al analizar el contenido de dicho archivo existen las coordenadas de estaciones de monitoreo pertenecientes al IGS pero no todas las estaciones están en la misma época de referencia, por lo cual para futuros procesamientos es necesario generar un nuevo archivo que contenga las estaciones que utiliza SIRGAS pero en una misma época de referencia.
- El software GAMIT/GLOBK fue instalado bajo la plataforma de Linux Ubuntu y funcionó sin problema en las versiones 10.1 a 11.04 pero es recomendable al instalarlo el asesoramiento de un técnico en el tema, pues el software requiere de varios procesos previos a su funcionamiento, en el Anexo B se da información sobre como instalarlo pero es conveniente hacerlo con una persona técnica en ello.
- El software GAMIT/GLOBK tiene un gran potencial, ya que en esta tesis se ha logrado procesar coordenadas de alta precisión en líneas bases mayores a

100 Km y se lo ha hecho de forma automática en el software. Hay que manifestar que éste procesamiento se lo puede hacer de forma manual y con ello se controlarían más los datos al examinar de forma personal la información.

- El software GAMIT/GLOBK tiene otras funciones que no han sido desarrolladas en esta tesis, las cuales son motivo de estudio para que de este modo se pueda ocupar el software en todo su potencial, entre estas puede medir velocidades, información para el cálculo de la cantidad de vapor de agua en la atmósfera, dichas funciones son importantes para nuevos estudios y proyectos sobre diversos temas de interés científico.
- En la configuración del archivo *sestbl* existen métodos para el cálculo de ambigüedades, lo cual sería prudente tratar con LC_HELP, L1_ONLY, L2_ONLY, y L1, L2_INDEP, en el procesamiento de los mismos lugares pero probando cada uno de ellos para así comprobar el tamaño de los errores de la ionosfera.

CAPITULO 5: REFERENCIAS

- Altamimi Z., Combinaison de techniques spatiales pour la détermination et la maintenance d'un système de référence centimétrique, Thèse de Doctorat de l'Observatoire de Paris, 1990.
- Arias E., M. Feissel and J. Lesttrade, An extragalactic celestial reference frame consistent with the BIH terrestrial system, BIH annual report for 1987, pp. DD-113-DD-121. 1988
- Blewitt G., Carrier phase ambiguity resolution for the Global Positioning System applied to geodetic baselines up to 2000 km, Journ. Of Geophys. Research, (94) No B8 pp 10187- 10203, 1989.
- Blewitt G., C. Boucher, R. Eanes, M. Feissel, M. Heflin, T. Herring, J. Kouba, C. Ma, H. Montag, J. Ray, P. Willis, IERS Working Group on the ITRF Datum, Final Report, <ftp://hpiers.fr/iers/itrf/ITRF-WG.Report>, 1999.
- Boucher C., Z. Altamimi, M. Feissel, P. Sillard, Results and analysis of the ITRF94. IERS Paris, Technical Note No.20, 1996b
- Boucher C., Z. Altamimi, P. Sillard, Results and analysis of the ITRF96. IERS Paris, Technical Note No.24, 1998a
- Boucher C., Z. Altamimi, P. Sillard, CONTRIBUTION OF DORIS TO THE INTERNATIONAL TERRESTRIAL SYSTEM ITRS, Institut Geographique National/LAREG, France, Presentado en DORIS Days 98, 1998b.
- Boucher, Claude; Altamini, Zuheir; Sillard, Patrick and Feissel-Verner, Martinen, "The ITRF2000", IERS Technical Note; No. 31, 2004.
- Brunini C., Global Ionospheric models from GPS measurements, Tesis Doctoral, FCAG, Universidad Nacional de La Plata, 1998.

- Clark T., B. Schupler, What are phase center variations and why should I worry? Presentación en GPS'99, Tsukuba, Japón, Comunicación personal, 1999.
- Curso Avanzado de Sistemas de Posicionamiento por Satélite, Madrid, Julio 2006.
- Drewes H., Combination of VLBI, SLR and GPS determined station velocities for actual plate kinematic and crustal deformation models, Springer, IAG Symposia, No. 119, 377- 382, 1998.
- Drewes, H, and O. Heidbach (2009). "The 2009 horizontal velocity model for South America and the Caribbean". Submitted to C. Pacino et al.(Eds.). IAG Scientific Assembly "Geodesy for Planet Earth". IAG Symposia, Buenos Aires, August 31 to September 4, 2009.
- IERS Home, <http://www.iers.org/iers/en/iershome/home.html>, Septiembre 2009.
- IGS Annual Report 1998, Jet Propulsion Laboratory, JPL publication 400-839, 1999a
- IGS, Statement by the president of the United States regarding the decision to stop degrading the Global Positioning System accuracy, IGSMail#2816, <ftp://igscb.jpl.nasa.gov/pub/mail/igsmail/2816>, 2000.
- [IGSMail-5447]; Proposed IGS05 Realization, <http://igscb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/2006/msg00170.html>, Diciembre, 2009.
- IGS, <http://igscb.jpl.nasa.gov>, 2011.
- Imagen de SIRGAS95, <http://www.sirgas.org/fileadmin/images/Mapas/Sirgas95C.jpg>, Diciembre, 2009.
- Imagen de SIRGAS00, <http://sirgas.org/fileadmin/imagenes/Mapas/Sirgas2000C.jpg>, Diciembre 2009.
- ILRS, <http://ilrs.gsfc.nasa.gov>, 1999.
- ITRF 2000, http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2000/datum.php, Diciembre 2009.
- IVS, <http://ivscc.gsfc.nasa.gov>, 1999.

- Johansson J., GPS antenna and site effects, IAG Symposia, Vol. 118, pp. 228-236, 1998.
- Kaniuth K., K. Stuber, Einfluss von Antennen-Radomen auf die GPS-Höhenbestimmung, AVN 7, 234-238, 1999c.
- Kleusberg A., P. Teunissen (Eds.), GPS for Geodesy, Lecture notes on Earth Sciences, 60, Springer, 1996.
- Leick A., GPS satellite surveying. John Wiley & Sons, New York, Second Edition, 1995.
- Leiva, César, Determinación de Parámetros de Transformación entre los Sistemas PSAD56 Y WGS84 Para El País, 20 de Febrero de 2003.
- Lieske J., T. Lederle, W. Fricke and B. Morando, Expression of the precession quantities on. And Astrophys., 58 pp. 1-16, 1977.
- Mackern, Virginia, Materialización de un Sistema de Referencia Geocéntrico de alta precisión mediante observaciones GPS, Tesis Doctoral, FCAG, Universidad Nacional de La Plata, 2003.
- McCarthy D., IERS Standards (1992). IERS Paris, Technical Note 13, 1992.
- McCarthy D., IERS Standards (1996). IERS Paris, Technical Note 21, 1996.
- McCarthy, Dennis and Petit, Gerard, "IERS Conventions 2003". IERS technical Note: No. 32, 2004.
- Melbourne W., Very Long Baseline Radio Interferometry, Project MERIT-A, review of the techniques..., Wilkins (Ed.), Roy. Greenwich Obs, 1980.
- Menge F. And M. Schmitz, AOAD/M_T choke ring antenna absolute phase center variations: results of absolute PCV field calibrations at ife and Geo-, http://www.ife.uni-hannover.de/~web/AOA_DM_T, 2000.
- Minster, B. et Jordan, T.H., Present day plate motions, Journ. Geophys. Res. (83) 5331, 1978.
- Moirano J., Materialización del Sistema de Referencia Terrestre mediante observaciones GPS. Tesis doctoral. FCAG. UNLP. 2000.
- Peltier, W., Ice age paleotopography, Science, 265, pp. 195-201, 1994.
- Peltier, W., VLBI baseline variations from the ICE-4G model of postglacial rebound, Geophys. Res. Lett., 22, pp. 465-468, 1995.

- Realizaciones SIRGAS95, <http://www.sirgas.org/index.php?id=76>, Octubre, 2011
- Realizaciones SIRGAS00, <http://www.sirgas.org/index.php?id=77>, Octubre, 2011.
- Red SIRGAS-CON, <http://www.sirgas.org/index.php?id=61>, Octubre, 2011
- Rothacher M., S. Schaer, L. Mervart, G. Beutler, Determinatio of antena phase center variations using GPS data, IGS workshop proceeding on special topics and new directions, G. Gendt y G. Dick (Eds.) pp. 77-92, GFZ, Pootsdam, Germany, 1995.
- Rothacher M., G. Mader, Combination of antena phase center offsets and variations, antenna calibration set IGS_01. International GPS Service for Geodynamics, [ftp://ubecu.unibe.ch/AIUB\\$FTP/ANTENNAS](ftp://ubecu.unibe.ch/AIUB$FTP/ANTENNAS), 1996a
- Rothacher M. And Leos Mervart (Eds), G. Beutler, E. Brockmann, S. Frankhauser, W. Gurtner, J. Johnson, L. Mervart, M. Rothacher, S. Shaer, T. Springer, R. Weber, Bernese GPS Software Version 4.0 Astronomical Institute-University of Berne, 1996b.
- Schaer S., G. Beutler, M. Rothacher, L. Mervart and A. Springer, Daily global ionosphere maps based on GPS carrier phase routinely produced by CODE analysis centre, Paper presented at the IGS AC Workshop, Silver Spring, MD, USA, 1996.
- Scherneck H., A parametrized solid earth tide model and ocean tide loading effects for global geodetic baseline measurements. *Geophys. J. Int.* (106) 677-694, 1991.
- Schupler B., R. Allhouse, T. Clark, Signal characteristics of GPS user antennas, *Navigation*, Vol.41, No.3, pp.277-295, 1994.
- Seidelman P., 1980 IAU nutation: The final report of the IAU working group on nutation, *Celest. Mech.*, 27, pp. 79-106, 1982.
- Sovers O., J. Border, Observation model and parameter partials for the JPL geodetic GPS modelling software "GPSOMC", JPL publication 87-21 rev. 2, 1990.

- T. A. Herring, R. W. King, S. C. McClusky, Introduction to GAMIT/GLOBK, Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology, Julio 2011.
- T. A. Herring, R. W. King, S. C. McClusky*, GAMIT Reference Manual, Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology, Julio 2011.
- T. A. Herring, R. W. King, S. C. McClusky*, GLOBK Reference Manual, Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology, Julio 2011.
- Teunissen P., Carrier phase ambiguity fixing concepts, en Kleusberg A., P. Teunissen (Eds.), GPS for Geodesy, Lecture notes on Earth Sciences, 60, Springer, 1996.
- UNAVCO, The effect of antenna covers on GPS baseline solutions. http://www.unavco.ucar.edu/science_tech/publications/dome_report, 1997.
- Van Dierendonck A., S. Russel, E. Koptzke, M. Birnbaum, The GPS navigation message, Journal of the Institute of Navigation, Vol. 25 No. 2 pp. 147-165, 1978.
- Wahr J., The forced nutations on an elliptical rotating, elastic and oceanless Earth, Geophys. J., Royal Astron. Soc. 64, pp 705-727, 1981.
- Webb F. And J. Zumberge, An introduction to GYPSY/OASIS-II, JPL publication D- 11088, 1997.
- Wübbena G., Zur Modellierung von GPS-Beobachtungen für die hochgenaue Positionsngetimmung, Universidad de Hannover, 1991.
- Zurutuza, J, "Primer Taller Técnico sobre Cartografía y Topografía", Nuevas Infraestructuras de Referencia, Sistemas Tridimensionales, 13 de Febrero de 2009.