



**ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO**

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

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

**“ESTUDIO METODOLÓGICO DE LA DINÁMICA ESPACIAL  
DE LA ESTACIÓN DE MONITOREO CONTINUO RIOBAMBA  
(RIOP) Y SU INFLUENCIA EN LA DETERMINACIÓN DEL  
MODELO DE VELOCIDADES DEL ECUADOR”**

**REALIZADO POR:**

**CHRISTIAN GONZALO PILAPANTA AMAGUA**

**SANGOLQUÍ – ECUADOR**

**FEBRERO – 2013**

## **CERTIFICACIÓN**

Dr. Alfonso Tierra

Ing. Cesar Leiva

### **CERTIFICAN QUE:**

El proyecto de grado titulado: “ESTUDIO METODOLÓGICO DE LA DINÁMICA ESPACIAL DE LA ESTACIÓN DE MONITOREO CONTINUO RIOBAMBA (RIOP) Y SU UNFLUENCIA EN LA DETERMINACIÓN DEL MODELO DE VELOCIDADES DEL ECUADOR”, realizado por el señor CHRISTIAN GONZALO PILAPANTA AMAGUA, ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple con las normas estatutarias establecidas en el Reglamento de Estudiantes de la Escuela Politécnica del Ejército, 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, los cuales contienen el documento en formato portátil de Acrobat (pdf)

Sangolquí, 04 de Febrero de 2013

---

Dr. Alfonso Tierra, PhD  
DIRECTOR

---

Ing. Cesar Leiva  
CODIRECTOR

## **DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, Christian Gonzalo Pilapanta Amagua

### **DECLARO QUE:**

El proyecto de grado titulado: “ESTUDIO METODOLÓGICO DE LA DINÁMICA ESPACIAL DE LA ESTACIÓN DE MONITOREO CONTINUO RIOBAMBA (RIOP) Y SU UNFLUENCIA EN LA DETERMINACIÓN DEL MODELO DE VELOCIDADES DEL ECUADOR”, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme a las citas que constan al pie de las páginas correspondientes y 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, 04 de Febrero de 2013

---

Christian Gonzalo Pilapanta Amagua

## **AUTORIZACIÓN**

Yo, Christian Gonzalo Pilapanta Amagua

Autorizo a la Escuela Politécnica del Ejército la publicación en la biblioteca virtual de la Institución del proyecto de grado titulado: “ESTUDIO METODOLÓGICO DE LA DINÁMICA ESPACIAL DE LA ESTACIÓN DE MONITOREO CONTINUO RIOBAMBA (RIOP) Y SU UNFLUENCIA EN LA DETERMINACIÓN DEL MODELO DE VELOCIDADES DEL ECUADOR”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, 04 de Febrero de 2013

---

Christian Gonzalo Pilapanta Amagua



## **RESUMEN**

Una de las principales fuentes de error a ser eliminadas en el desarrollo y uso de soluciones posicionales multitemporales, es la relacionada con los diversos procesos geodinámicos a los cuales está sometido el territorio nacional; para ello, cientos de investigadores han enfocado sus estudios en el denominado modelamiento matemático, asumiendo que, calculado un valor medio de desplazamiento en diversos puntos de observación, es posible interpolar dichos resultados y así obtener valores quasi-reales para n-puntos de interés.

Sin embargo y pese a que la asunción antes planteada posee una alta validez en términos prácticos, mediante un análisis más detenido, se puede evidenciar como las precisiones resultantes de los modelos de predicción distan en gran medida de las esperadas debido principalmente a que el cálculo de sus velocidades solo ha sido generado mediante el uso de modelos de regresión básicos y no con modelos más estructurados capaces de asimilar la presencia de movimientos no lineales en el proceso.

De esta manera, el presente estudio tiene como objetivo fundamental, el desarrollo de una metodología básica a partir de la cual, se pueda predecir con eficacia las variaciones posicionales lineales y/o no lineales de un punto en particular, mediante el análisis de series temporales y el uso de funciones matemáticas básicas.

## **SUMMARY**

One of the main sources of error to be disposed of in the development and use of multi-temporal positional solutions, is related to the different geodynamic processes, that affect to the national territory in one form or another; for which, hundreds of researchers have focused their studies on the so-called “mathematical modeling”, assuming that, calculated a mean value for the displacement in different observational points, it is possible interpolate these results and obtain quasi-real values for n-points of interest.

However and despite of the last assumption, which has a high validity in practical terms, through a more exhaustive analysis, we can observed how the resultant precisions of the prediction models are much larger than expected; the principal reason of this, are the diverse forms used for calculating the velocities, which only use basic regression models and exclude more structured models capable of assimilating the presence of non-linear movements in the processes.

For this reason, the present study has as its main goal, the development of a basic methodology, which can be used in the prediction of linear and/or non-linear variations of the crust using the time series analysis and basic mathematical functions.

## **DEDICATORIA**

La presente investigación, así como todo el esfuerzo que ella representa, va dedicada a cada una de las personas, quienes de una u otra forma, me brindaron su apoyo y confianza a lo largo de mi vida estudiantil y personal. De manera especial:

A mis padres y mi hermana, Gonzalo, Martha y Mónica, los tres pilares fundamentales de mi vida, seres incondicionales quienes han estado a mi lado en todo momento y quienes con sus sabios consejos, recomendaciones y bendiciones, son el engrane y la fuerza necesaria que impulsa mi diario caminar.

A mis abuelitos, Esther, Rosario y Luis, aquellos seres amados, quienes fueron, son y serán ejemplo de vida para mi ser y cuyo amor y cariño siempre me han abrigado en cada una de las etapas de mi vida.

Finalmente, al mayor ser de todos, mi Señor Dios, quien siempre me ha brindado su mano amiga en los momentos más necesitados y quien con su manto sagrado me ha cobijado de todo mal y peligro día tras día.

Christian Gonzalo Pilapanta Amagua

## **AGRADECIMIENTO**

A mis padres, quienes con sus palabras, consejos, recomendaciones, anécdotas y sobre bendiciones han sabido inculcar en mí buenas costumbre y acciones, ya sea en el ambiente personal o profesional. Gracias de corazón por ser la luz que alumbra mi camino y por ser el más grande ejemplo de vida.

A mi hermana, uno de los mayores ejemplos de lucha y dedicación, quien con sus consejos, me ha sabido guiar por la rienda del éxito y el profesionalismo, teniendo siempre en el horizonte el ideal de ser cada día mejor.

A cada uno de mis abuelitos, quienes con palabras sencillas, pero muy acertadas lograron plasmar en mi algo mucho más primordial que el estudio, como es el cariño y el respeto hacia el hogar y la familia.

A mis tíos y primos, por estar presentes de una u otra forma en cada momento de mi vida estudiantil y sobretodo por soportar en muchas ocasiones mi mal genio ocasionado por el trajín de mis estudios.

A mis amigos y a mi Andre, por haberme brindado su apoyo y su mano amiga, por cada uno de los momentos que compartieron junto a mi y por los consejos y anécdotas que nunca faltan en el día a día.

A mis maestros e ingenieros, de forma especial a mis directores de tesis y a mis asesores externos, gracias por confiar en el desarrollo y ejecución de este proyecto y por haber aportado en mi vida profesional los más sabios y valiosos consejos.

Y finalmente a mi maestro, al Dr. Alfonso R. Tierra Criollo, por haber sido como la palabra lo dice mi “maestro”. Gracias por haber inculcado en mi la cultura del estudio y sobretodo por haberme direccionado hacia un nuevo camino que estoy dispuesto a seguir por toda mi vida, el de la investigación.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

## CAPÍTULO I. ASPECTOS GENERALES

1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Definición del Problema .....	3
1.3 Justificación .....	4
1.4 Descripción del Área de Estudio .....	5
1.5 Objetivo General .....	7
1.6 Objetivos Específicos .....	7
1.7 Hipótesis .....	7
1.8 Metas .....	7

## CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 SISTEMAS DE REFERENCIA .....	8
2.1.1 Generalidades .....	8
2.1.2 El Sistema de Referencia Celeste Internacional, ICRS .....	9
2.1.3 El Sistema de Referencia Terrestre Internacional, ITRS .....	10
2.1.4 Relación entre el ICRS y el ITRS .....	11
2.1.5 Movimientos de Precesión y Nutación .....	12
2.1.6 Movimientos del Polo y Variación de la Rotación Terrestre .....	13
2.1.7 Solución IGS08 como Marco de Referencia para los productos IGS y SIRGAS ...	14
2.2 EL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO SATELITAL. GPS .....	15
2.2.1 Generalidades .....	15
2.2.2 Señal GPS .....	16
2.2.3 Estructura matemática de las ondas portadoras L1 y L2 .....	17
2.2.4 Mediciones de Código o Pseudo Rango .....	18
2.2.5 Mediciones de Fase o Diferencias de Fase .....	20

2.3 ERRORES EN EL POSICIONAMIENTO GPS Y POSIBLES SOLUCIONES .....	22
2.3.1 Error en la posición del satélite .....	22
2.3.2 Error en los relojes del satélite y receptor .....	23
2.3.3 Variaciones en el centro de fase de la antena .....	24
2.3.4 Refracción atmosférica .....	25
2.3.5 Refracción ionosférica .....	26
2.3.6 Refracción troposférica .....	27
2.3.7 Efecto multicamino (Multipath) .....	29
2.3.8 Cargamento oceánicas y atmosféricas .....	30
2.3.9 Modelo mejorado del posicionamiento satelital .....	31
2.4 OBSERVACIONES DERIVADAS Y COMBINACIONES LINEALES .....	32
2.4.1 Generalidades .....	32
2.4.2 Simples Diferencias .....	33
2.4.3 Dobles Diferencias .....	34
2.4.4 Triples Diferencias .....	35
2.4.5 Formulación de Combinación Lineales .....	36
2.5 PARAMETRIZACIÓN DE OBSERVACIONES .....	38
2.5.1 Conceptualización .....	38
2.5.2 Principio de Mínimos Cuadrados .....	39
2.5.3 Formulación del modelo fundamental .....	40
2.6 MODELAMIENTO DE VELOCIDADES .....	43
2.6.1 Generalidades .....	43
2.6.2 Análisis de Series Temporales .....	45
2.6.3 Principales modelos matemáticos utilizados en el modelamiento .....	46
2.7 SERIES DE FOURIER .....	47
2.7.1 Generalidades .....	47
2.7.2 Importancia de las series para el proyecto .....	47
2.7.3 Definición .....	48

## **CAPÍTULO III. PROCESAMIENTO DE DATOS GNSS**

3.1 INTRODUCCIÓN .....	49
3.2 SOFTWARE CIENTÍFICO GAMIT-GLOBK. VERSIÓN 10.4 .....	50
3.2.1 Estructura física y lógica .....	50
3.2.2 Módulos principales. sh_gamit y sh_glred .....	51
3.2.3 Funcionamiento. Proceso interno .....	52
3.2.4 Principales archivos generados por el programa .....	53
3.2.5 Módulos auxiliares .....	54
3.2.6 Archivos de control. Configuración .....	55
3.3 PROCESAMIENTO DE DATOS GNSS .....	57
3.3.1 Selección de puntos a procesar .....	57
3.3.2 Flujograma de procesamiento .....	58
3.3.3 Control de Calidad de Archivos de Observación. Análisis de Resultados .....	60
3.3.4 Establecimiento de parámetros de procesamiento y modelos de corrección .....	61
3.3.5 Ajuste de observaciones. Inicialización del módulo sh_gamit .....	64
3.3.6 Análisis de resultados. Resumen estadístico .....	66
3.3.7 Análisis de residuales. Gráficas de residuales .....	68
3.3.8 Materialización de soluciones. Inicialización del módulo sh_glred .....	69
3.3.9 Transformación de soluciones IGS05 a IGS08 .....	72
3.4 GENERACIÓN DE LA SOLUCIÓN MULTIANUAL CIE10 – 11 .....	73
3.4.1 Combinación de soluciones y Materialización de coordenadas y velocidades .....	73
3.4.2 Comparación entre velocidades resultantes y velocidades SIRGAS .....	74
3.4 EVALUACIÓN DE LA SOLUCIÓN SEMANALES .....	76
3.4.1 Prueba de hipótesis sobre las medias de las diferencias entre coordenadas .....	76
3.4.2 Prueba de hipótesis sobre las medias de las diferencias entre velocidades .....	77

## **CAPÍTULO IV. MODELAMIENTO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

4.1 GENERALIDADES .....	79
-------------------------	----

4.2 ESTADÍSTICAS GENERALES DE LAS FUNCIONES DE AJUSTE .....	81
4.2.1 Funciones de Ajuste para la Componente X .....	81
4.2.2 Funciones de Ajuste para la Componente Y .....	82
4.2.3 Funciones de Ajuste para la Componente Z .....	83
4.3 FUNCIONES DE AJUSTE FINALES POR COMPONENTE .....	85
4.3.1 Serie de Fourier. Componente X .....	85
4.3.2 Serie de Fourier. Componente Y .....	86
4.3.3 Serie de Fourier. Componente Z .....	87
4.4 ESTADÍSTICAS GENERALES DE LAS FUNCIONES FINALES .....	88
4.4.1 Estadísticas de la Serie de Fourier. Componente X .....	88
4.4.2 Estadísticas de la Serie de Fourier. Componente Y .....	88
4.4.3 Estadísticas de la Serie de Fourier. Componente Z .....	88
4.5 DETERMINACIÓN DE LA IDONEIDAD DEL MODELO POR COMPONENTE	89
4.5.1 Prueba de hipótesis t sobre los coeficientes de correlación de cada componente ...	89
4.5.2 Prueba de hipótesis F sobre los coeficientes de determinación .....	90

## **CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

5.1 Conclusiones .....	93
5.2 Recomendaciones .....	95

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

## **ANEXOS**

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Coordenadas UTM de la Estación GNSS RIOP (Zona 17 Sur)	5
Tabla 2.1	Principales combinaciones utilizadas en el posicionamiento GPS	37
Tabla 2.2	Principales funciones utilizadas en el análisis de series temporales	46
Tabla 3.1	Principales archivos generados por GAMIT-GLOBK	53
Tabla 3.2	Módulos auxiliares más utilizados por GAMIT-GLOBK	54
Tabla 3.3	Archivos de configuración del software científico GAMIT-GLOBK	55
Tabla 3.4	Estaciones GNSS utilizadas en el estudio	57
Tabla 3.5	Principales parámetros de procesamiento y modelos de corrección	61
Tabla 3.6	Parámetros de transformación entre IGS05 e IGS08. Época 2005.0	72
Tabla 3.7	Velocidades obtenidas a través del software GAMIT-GLOBK	74
Tabla 3.8	Velocidades multianuales procesadas por SIRGAS. Sol. SIR11P01	75
Tabla 3.9	Diferencias obtenidas entre velocidades calculadas y oficiales	75
Tabla 4.1	Estadísticas generales por función de ajuste para la componente X	81
Tabla 4.2	Estadísticas generales por función de ajuste para la componente Y	82
Tabla 4.3	Estadísticas generales por función de ajuste para la componente Z	83
Tabla 4.4	Coefficientes de Fourier calculados para la componente X	85
Tabla 4.5	Coefficientes de Fourier calculados para la componente Y	86
Tabla 4.6	Coefficientes de Fourier calculados para la componente Z	87
Tabla 4.7	Estadísticas generales de la función de ajuste para la componente X	88
Tabla 4.8	Estadísticas generales de la función de ajuste para la componente Y	88
Tabla 4.9	Estadísticas generales de la función de ajuste para la componente Z	88
Tabla 4.10	Valores obtenidos para la prueba de hipótesis t	89
Tabla 4.11	Valores obtenidos para la prueba de hipótesis F	91



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Monumento de la estación GNSS RIOP y croquis de ubicación	5
Figura 1.2	Mapa base de la Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador	6
Figura 2.1	Sistema de referencia celeste internacional	9
Figura 2.2	Sistema de referencia terrestre internacional	10
Figura 2.3	Extracto del boletín A. Parámetros de orientación terrestre	11
Figura 2.4	Movimientos de precesión y nutación de la Tierra	12
Figura 2.5	Movimiento del polo terrestre	13
Figura 2.6	Estaciones GNSS que conforman el Marco de Referencia IGS08	14
Figura 2.7	Funcionamiento básico del sistema GPS	15
Figura 2.8	Estructura fundamental de la señal GPS	16
Figura 2.9	Esquema básico del retardo en la señal	18
Figura 2.10	RMS de las órbitas IGS finales. Período AGO 11 – NOV 12	22
Figura 2.11	Modelamiento de las variaciones en los centros de fase de 2 antenas	24
Figura 2.12	Esquema básico del proceso de refracción atmosférica	25
Figura 2.13	Modelamiento del contenido total de electrones	26
Figura 2.14	Principio básico del proceso de refracción troposférica	28
Figura 2.15	Esquema básico del efecto multicamino	29
Figura 2.16	Modelo de cargamento oceánico mundial. FES2004	30
Figura 2.17	Esquema básico de la simple diferencia de fase	33
Figura 2.18	Esquema básico de la doble diferencia de fase	34
Figura 2.19	Esquema básico de la triple diferencia de fase	35
Figura 2.20	Matriz de cofactores $Q_{xx}$	42
Figura 2.21	Modelos de velocidades VEMOS09 y PB2002	44
Figura 2.22	Serie temporal para la Estación GNSS RIOP- Periodo 2000 – 2012	45
Figura 3.1	Directorio de Instalación del software GAMIT-GLOBK	50
Figura 3.2	Estructura básica de funcionamiento del software GAMIT-GLOBK	51
Figura 3.3	Proceso interno del software GAMIT-GLOBK, Versión 10.4	52
Figura 3.4	Flujograma de procesamiento de datos GNSS	58
Figura 3.5	Extracto del archivo de resumen RIOP3590.11S	60

Figura 3.6	Ejemplo gráfico del funcionamiento general del módulo sh_gamit	64
Figura 3.7	Principales carpetas creadas por el módulo sh_gamit	65
Figura 3.8	Extracto del archivo de resumen sh_gamit_365.summary	66
Figura 3.9	Extracto de las gráficas de residuales	68
Figura 3.10	Ejemplo gráfico del funcionamiento general del módulo sh_glred	69
Figura 3.11	Extracto del archivo de resumen globk_espe_11359-365.org	70
Figura 3.12	Serie temporal final para la estación de monitoreo continuo RIOP	71
Figura 3.13	Prueba de hipótesis sobre medias de las diferencias entre coordenadas	77
Figura 3.14	Prueba de hipótesis sobre medias de las diferencias entre velocidades	78
Figura 4.1	Módulo Curve Fitting Tool de MATLAB. Versión R2011b	79
Figura 4.2	Flujograma general del modelamiento de funciones	80
Figura 4.3	Ajuste de las variaciones posicionales a partir de una regresión lineal	84
Figura 4.4	Serie de Fourier calculada para la componente X de la estación RIOP	85
Figura 4.5	Serie de Fourier calculada para la componente Y de la estación RIOP	86
Figura 4.6	Serie de Fourier calculada para la componente Z de la estación RIOP	87
Figura 4.7	Prueba de hipótesis t sobre los coeficientes de correlación	90
Figura 4.8	Prueba de hipótesis F sobre los coeficientes de determinación	92

## GLOSARIO

Ambigüedad. Número de oscilaciones y/o ciclos enteros existentes en la señal GPS emitida desde un satélite  $j$  hasta un receptor  $A$ .

Baricéntrico. Relativo al centro de masas o centro de gravedad. En geodesia y astronomía, se dice que el sistema de referencia celeste internacional es un sistema baricéntrico, debido a que su origen se encuentra en el baricentro del sistema solar acorde a la teoría de la relatividad.

Cinética. Trabajo necesario para acelerar un cuerpo de una masa determinada desde el reposo hasta la velocidad indicada. Movimiento de una partícula o cuerpo rígido reinada por magnitudes vectoriales.

Compilador. Programa informático que traduce un programa escrito en un lenguaje de programación a otro lenguaje de programación, generando un programa equivalente que la máquina será capaz de interpretar.

Covarianza. Medida de dispersión conjunta de dos variables estadísticas que mide el valor esperado del producto de las desviaciones con respecto a la media.

Deriva. Desvío de la trayectoria real de un objeto con respecto a la verdadera dirección de su rumbo.

Efeméride. Tabla de valores que da las posiciones de los objetos astronómicos en el cielo en un momento o momentos dados.

Elipsoide. Superficie curva cerrada cuyas tres secciones ortogonales principales son elípticas, es decir, son originadas por planos que contienen dos ejes cartesianos.

Escala Richter. Escala logarítmica arbitraria que asigna un número para cuantificar la energía liberada en un terremoto.

Estocástico (proceso). concepto matemático que sirve para caracterizar una sucesión de variables aleatorias (estocásticas) que evolucionan en función de otra variable, generalmente el tiempo.

Extrapolación. Proceso matemático a partir del cual se estima un valor mas allá del intervalo de observación original.

Fase (señal). Fracción del periodo transcurrido desde el instante correspondiente al estado tomado como referencia. La fase indica la situación instantánea en el ciclo, de una magnitud que varía cíclicamente.

Función (matemática). Relación entre un conjunto dado  $X$  (el dominio) y otro conjunto de elementos  $Y$  (el codominio) de forma que a cada elemento del dominio le corresponde un único elemento del codominio.

Geocéntrico. Relativo al centro de masas o centro de gravedad de la tierra. En el caso de un sistema de coordenadas quiere decir que éstas tienen el origen en el centro de la Tierra y/o núcleo.

Inercial (sistema). Sistema de referencia en el que las leyes del movimiento cumplen las leyes de Newton y, por tanto, la variación del momento lineal del sistema es igual a las fuerzas reales sobre el sistema.

Interferometría. Técnica utilizada en astronomía que consiste en combinar la luz proveniente de diferentes receptores, telescopios o antenas de radio para obtener una imagen de mayor resolución

Interpolación. Obtención de nuevos puntos partiendo del conocimiento de un conjunto discreto de puntos.

Modelo, Modelación, Modelamiento. Tipo de modelo científico 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.

Nutación (terrestre). Oscilación periódica del eje de rotación de la Tierra alrededor de su posición media en la esfera celeste, debido a las fuerzas externas de atracción gravitatoria entre la Luna y el Sol con la Tierra.

Outlier. Elemento perteneciente a un conjunto de datos significativamente diferente a los otros de la colección, lo cual implica la existencia de un patrón inconsistente con el grueso de la evidencia de datos

Parámetro. Incógnitas de un problema. Constante o variable que aparece en una expresión matemática y cuyos distintos valores dan lugar a distintos casos en un problema.

Precesión (terrestre). Cambio lento y gradual en la orientación del eje de rotación de la Tierra, que hace que la posición que indica el eje de la Tierra en la esfera celeste se desplace alrededor del polo de la eclíptica, trazando un cono y recorriendo una circunferencia completa cada 25776 años.

Redes neuronales artificiales. Paradigma de aprendizaje y procesamiento automático inspirado en la forma en que funciona el sistema nervioso de los animales. Se trata de un sistema de interconexión de neuronas que colaboran entre sí para producir un estímulo de salida.

Refracción. Cambio de dirección que experimenta una onda al pasar de un medio material a otro.

Secular. Movimiento unidireccional y persistente que describe la evolución temporal de una determinada variable, una vez depurada de sus variaciones estacionales, cíclicas y accidentales.

Sesgo. Diferencia estadística existen entre la esperanza matemática de un estimador y el valor numérico del parámetro que estima.

Subducción (placas). Proceso de hundimiento de una placa litosférica bajo otra en un límite convergente.

Varianza. Medida de dispersión definida como la esperanza del cuadrado de la desviación de una variable aleatoria respecto a su media.

## ACRÓNIMOS Y SIGLAS

<b>ANTEX</b>	Antenna Exchange Format
<b>ARP</b>	Antenna Reference Point
<b>CEPGE</b>	Centro de Procesamiento de Datos GNSS del Ecuador
<b>CIO</b>	Conventional International Origin
<b>CTP</b>	Conventional Terrestrial Pole
<b>CIP</b>	Coordinates of Instantaneous Pole
<b>CODE</b>	Center for Orbit Determination in Europe
<b>DGFI</b>	Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut
<b>DORIS</b>	Doppler Orbitography by Radiopositioning Integrated on Satellite
<b>EOP</b>	Earth Orientation Parameters
<b>ERP</b>	Earth Rotation Parameters
<b>FES2004</b>	Finite Element Solution Global Tide Model 2004
<b>FORTRAN</b>	Formula Translating System
<b>GAST</b>	Greenwich Apparent Sidereal Time
<b>GMO</b>	Greenwich Mean Observatory
<b>GNSS</b>	Global Navigation Satellite System
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>GRS80</b>	Geodetic Reference System, 1980
<b>IAU</b>	International Astronomical Union
<b>IAU2000A</b>	International Astronomical Union Model, 2000
<b>IBGE</b>	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
<b>ICRF</b>	International Celestial Reference Frame
<b>ICRS</b>	International Celestial Reference System
<b>IERS</b>	International Earth Rotation and Reference Systems Service
<b>IGM</b>	Instituto Geográfico Militar del Ecuador
<b>IGS</b>	International GNSS Service
<b>ITRF</b>	International Terrestrial Reference Frame
<b>ITRS</b>	International Terrestrial Reference System
<b>LEGOS</b>	Laboratoire d'etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales

<b>LLR</b>	Lunar Laser Ranging
<b>LOD</b>	Length of Day
<b>MIT</b>	Massachusetts Institute of Technology
<b>NAVSTAR</b>	Navigation System with Time and Ranging
<b>NNR-NUVEL</b>	No Net Rotation Northwestern University Velocity Model
<b>PB2002</b>	2002 Plate Boundaries Model
<b>PRN</b>	Pseudo Random Noise
<b>REGME</b>	Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador
<b>RINEX</b>	Receiver Independent Exchange Format
<b>SDI</b>	Strategic Defense Initiative
<b>SINEX</b>	Solution Independent Exchange Format
<b>SIRGAS</b>	Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas
<b>SIRGAS-CON</b>	Red de Monitoreo Continuo de SIRGAS
<b>SLR</b>	Satélite Laser Ranging
<b>TEC</b>	Total Electron Content
<b>TEQC</b>	Translation, Edition & Quality Check Toolkit
<b>UNAVCO</b>	University NAVSTAR Consortium
<b>UNIX</b>	Uniplexed Information and Computing System
<b>UT1</b>	Universal Time 1 Model
<b>VEMOS09</b>	2009 Velocities Model for South America and the Caribbean
<b>VLBI</b>	Very Long Baseline Interferometry

# CAPÍTULO I

## ASPECTOS GENERALES

### 1.1 ANTECEDENTES

En los últimos años, la necesidad de generar información posicional de alta precisión, ha llevado a la mayoría de científicos e involucrados en la materia, a desarrollar nuevas técnicas y metodologías encaminadas a minimizar al máximo los errores sistemáticos ocasionados por los diferentes fenómenos físico-químicos presentes al momento del levantamiento.

Una de las técnicas más utilizadas y con mayor fiabilidad, es la modelación matemática, puesto que permite compensar las discrepancias en los resultados a partir del uso de formulismos y del manejo de relaciones unidireccionales y bidireccionales entre sus variables. Algunos ejemplos de esto son: la modelación de los diferentes parámetros climatológicos causantes de la refracción de la señal transmitida; el cargamento oceánico, hidrológico y atmosférico a partir del cual la superficie se deforma y cambia su aspecto, y de forma particular, el error por motivo del desplazamiento continuo de la corteza terrestre, objeto de nuestro estudio.

Por lo general, todo desplazamiento ocurrente en un tiempo finito, es capaz de ser representado en función de la magnitud física de “velocidad”, es decir, si analizáramos un punto en particular definido sobre la superficie terrestre, materializado en un sistema de coordenadas predefinido y cuya dinámica local se encuentra reinada por los diferentes procesos geofísicos generados en el planeta, la variación producida sobre sus coordenadas podría ser compensada simplemente con la inclusión de su vector de velocidad o a partir de la predicción de un vector promedio calculado desde un modelo matemático de interpolación y/o extrapolación y el uso de valores referenciales deducidos para un conjunto de estaciones próximas al punto en cuestión.



Modelos como el PB2002, desarrollado por Bird, P.<sup>1</sup>, en el 2003 para todas las regiones del mundo, el VEMOS09, diseñado por Drewes, H. & Heidbach, O.<sup>2</sup>, como parte del Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas, o a nivel nacional, modelos como el elaborado por Tierra, A.<sup>3</sup>, a partir del uso de Redes Neuronales Artificiales, son los más representativos hoy en día.

Lamentablemente, la eficacia que cada uno de estos modelos posee, se ha visto limitada en un principio por la falta de inclusión de las variaciones no lineales inmersas en el movimiento de la corteza continental; razón por la cual, en el marco de la reunión SIRGAS, llevada a cabo en la ciudad de Heredia, Costa Rica, en el mes de agosto del 2011, se plantea la necesidad de incorporar un nuevo concepto al análisis cinemático de su marco de referencia; la principal meta de este nuevo concepto, es lograr la construcción de un modelo de predicción, que no solo permita entender el dinamismo lineal de sus puntos, sino que a su vez, sea capaz de evolucionar paralelamente a los movimientos que cada uno de ellos genera.

Una de las instituciones con gran interés en lograr este objetivo a nivel nacional, es el Centro de Investigaciones Científicas de la Escuela Politécnica del Ejército, el cual, desde inicios del 2012, mediante su Centro de Investigaciones Espaciales, ha empezado con el desarrollo de un modelo de velocidades geodésico regional, cuya principal fortaleza se centra en la implementación del software científico GAMIT/GLOBK, desarrollado por el Instituto Tecnológico de Massachusetts y cuyo núcleo de procesamiento para el ajuste y el cálculo de velocidades se basa en el manejo del denominado “Filtro de Kalman”.

Con todo esto de antemano, el presente estudio, ha sido concebido como parte primordial en la ejecución del proyecto de investigación titulado “Generación del Modelo de Velocidades de una Red Geodésica a partir de datos GPS”, siendo su objetivo principal, el desarrollo de una metodología de estudio, capaz de asimilar y representar las variaciones lineales y/o no lineales que sufre la corteza terrestre a lo largo del tiempo, a partir del análisis de series temporales y el uso de funciones matemáticas básicas.

---

<sup>1</sup> Bird, P. 2003. “An updated digital model of plate boundaries”. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. Vol. 4.

<sup>2</sup> Drewes, H. & Heidbach, O. 2009. “The 2009 horizontal velocity model for South America and the Caribbean”. IAG Scientific Assembly.

<sup>3</sup> Tierra, A. 2010. “Modelo de Velocidades usando una Red Neuronal Artificial”. Reunión SIRGAS 2010. Lima, Perú.

## 1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La falta de unificación en el establecimiento del marco de referencia geodésico por parte de los diferentes países del mundo, ha llevado consigo la generación de una serie de problemas al momento de redefinir puntos en sistemas distintos de los cuales fueron concebidos. Las principales causas de ello, radican en la incompatibilidad de los parámetros que los definen y de cierta forma en las diferentes metodologías utilizadas para cumplir con dicho cometido, siendo la que mejores resultados genera, aquella que se basa en el principio de redimensionamiento, traslado y rotación de los ejes del sistema mediante el uso de parámetros de transformación preestablecidos y la suma de los vectores de velocidad promedio de cada una de sus componentes.

Ahora bien, si analizamos el movimiento de los puntos más analíticamente, podemos observar como sus trayectorias no poseen un comportamiento lineal, puesto que, al estar sujetas a los cambios que sufre la superficie terrestre por motivo de los diversos procesos geodinámicos del planeta, sus recorridos se forman como resultado de una suma de vectores, con direcciones y sentidos distintos para cada tramo o intervalo recorrido, lo cual anula el principio de compensación del error por desplazamiento utilizado en la transformación de coordenadas y el cambio de sistemas de referencia.

La verdadera problemática entonces, no se encuentra en determinar un vector de velocidad promedio para cada punto en estudio, sino mas bien, se centra en desarrollar nuevos procesos y metodologías, capaces de asimilar los diferentes fenómenos físicos generadores del movimiento desordenado de los puntos y a partir de ello mejorar las precisiones de las coordenadas resultantes calculadas en el proceso de transformación de los sistemas de referencia, algo que hasta el momento solo ha sido posible de hacer en lugares con un alto desarrollo tecnológico-científico y basados en necesidades puntuales de sus territorios, reduciendo así, la probabilidad de replicar sus procesos y precisiones en zonas como el Ecuador, donde su espacio y superficie poseen una particularidad única en términos espaciales, debido principalmente a su ubicación sobre una zona de subducción de alto impacto como es el límite de placas continentales Cocos – Nazca, y por la presencia del denominado “cinturón de fuego del pacífico” el cual atraviesa todo el Ecuador continental.

### 1.3 JUSTIFICACIÓN

Como se vio anteriormente, desarrollar un modelo de velocidades, no solo conlleva el predecir en términos numéricos la variación posicional que una localización sufre con el pasar de los años, sino más bien, su objetivo principal se centra, en entender e incorporar los fenómenos físicos por los que es posible que se dé esta cinética. Eventos sísmicos, terremotos y procesos de subducción, son algunos de los factores por los que la variación se hace efectiva y el no tomarlos en cuenta en la generación de un modelo de predicción, no solo ocasionará la obtención de resultados sesgados y poco fiables para su utilización, sino también en muchos casos, adicionará un error quizás más grande que el producido sin su incorporación.

Ahora bien, pese a que los modelos hasta hoy generados, han logrado incorporar de una u otra forma en sus estructuras estas variaciones, no han sido capaces de representar eventos de gran magnitud como aquellos que surgen por el movimiento continuo de la corteza terrestre o por la generación de terremotos con escalas superiores a los 5.0 Mw. en la escala de Richter, dando como resultado la disminución en precisión de las coordenadas finales calculadas a partir del proceso de transformación entre sistemas.

Un ejemplo de esto, se puede observar en el estudio desarrollado por Vigny, C.<sup>4</sup> sobre el terremoto ocurrido en la ciudad de Maule-Chile a mediados del mes de febrero del 2010 y cuya magnitud fue de aproximadamente 8.8 Mw. en la escala de Richter. En él, el autor describe, cómo los modelos de velocidades existentes son incapaces de asimilar las discontinuidades generadas por un evento sísmico de alto impacto al momento de calcular los vectores de velocidad para posiciones cercanas a su radio de incidencia, a la vez que deduce, que la principal causa de esto se da por la forma con la cual los desplazamientos de las estaciones involucradas en el modelo son calculados.

De esta manera, la presente investigación, busca definir un mejor proceso de estudio e interpretación de las variaciones posicionales que sufre la corteza terrestre, a partir del establecimiento de una metodología estándar de análisis, sustentada en el uso de las soluciones posicionales de la estación de monitoreo continuo RIOP, para un periodo cercano a los 730 días.

---

<sup>4</sup> Vigny, C., et. al. 2011. "The 2010 Mw 8.8 Maule Mega-Trust Earthquake of Central Chile, Monitored by GPS". ScienceExpressReport. Pág. 1-10.

## 1.4 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La estación de monitoreo continuo RIOP, se encuentra ubicada en la ciudad de Riobamba, provincia del Chimborazo, dentro de la circunscripción de la Brigada de Caballería Blindada No. 11 “Galápagos”. (Ver Figura 1.1)



Figura 1.1 Monumento de la estación GNSS RIOP y croquis de ubicación

Fuente: Cisneros, D. 2011 & El Comercio, 2011

Sus coordenadas oficiales, referidas al sistema de referencia SIRGAS 95 se presentan a continuación, en la tabla 1.1:

Tabla 1.1 Coordenadas UTM de la Estación GNSS RIOP (Zona 17 Sur)

EJE DE COORDENADA	VALOR	SIGMA
Norte	9 817 404,627 m	0,0004 m
Este	761 338,827 m	0,0004 m
Altura Elipsoidal	2 817,163 m	0,0110 m

Fuente: Formulario Informativo Estación de Monitoreo Continuo RIOP, IGM, 2011.

Un aspecto importante a destacar, es el hecho de que la estación RIOP hoy en día se establece, como la única estación IGS activa en el país (antes también lo eran las estaciones QUI1 y GLPS) formando parte a su vez de la Red Continental SIRGAS-CON y de la Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador. (Ver Figura 1.2)

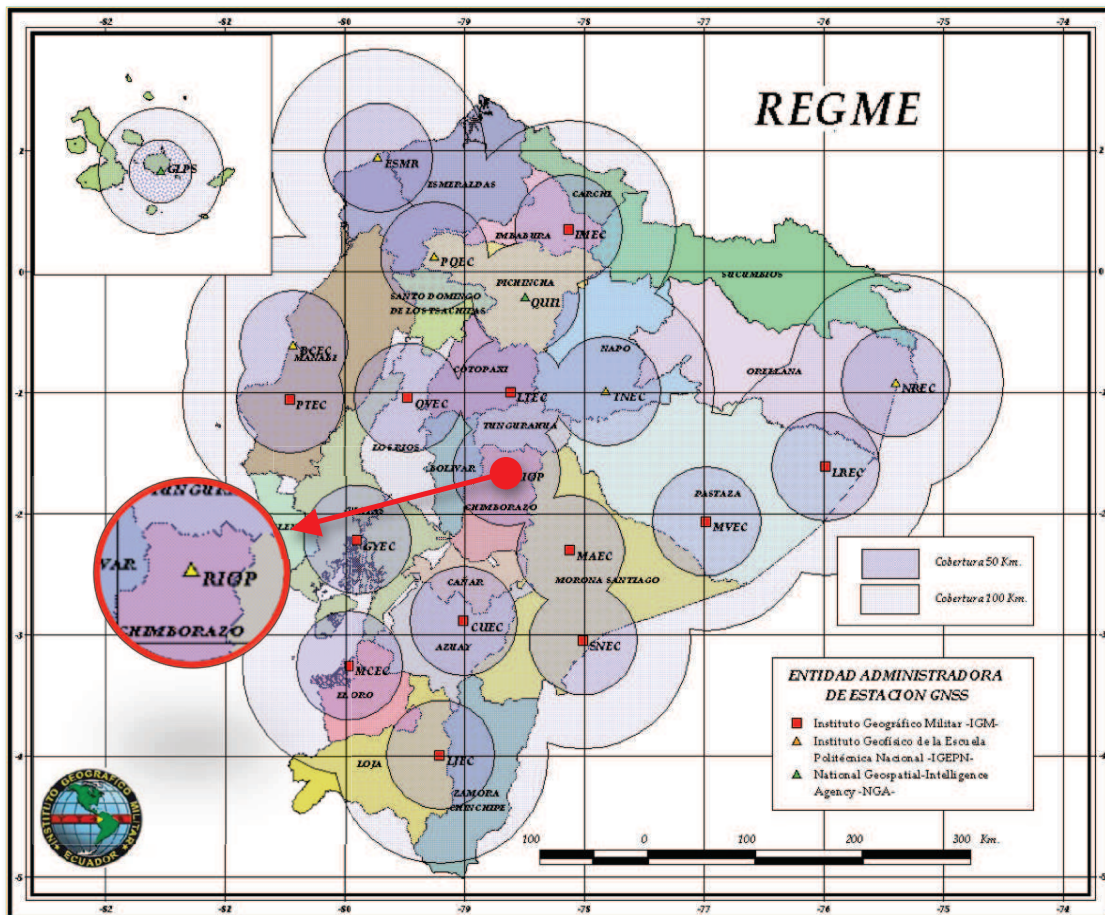


Figura 1.2 Mapa base de la Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador

Fuente: Zurita, P., 2011.

La entidad encargada de su funcionamiento, así como, de su mantenimiento y seguridad, es el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, sin embargo, el organismo rector, destinado al procesamiento de sus datos, es el Centro de Procesamiento de Datos GNSS del Ecuador (CEPGE – IGM), declarado desde el 1 de enero del 2010, Centro Oficial SIRGAS en América.

Finalmente, la razón principal por la cual se ha tomado en consideración a la estación de monitoreo continuo RIOP como el punto central de estudio del presente proyecto, radica en principio debido a la ubicación actual que esta posee, ya que al estar ubicado en una zona dinámica, influenciada en gran parte por la presencia de una pista de aterrizaje, su dinamismo se da de forma mucho más marcada. Otro aspecto de interés, tomado también en cuenta para su utilización, es la disponibilidad de sus datos, ya que al forma parte de la Red mundial IGS, sus datos son accesibles gratuitamente a través de su web oficial <ftp://igscb.jpl.nasa.gov>.

## 1.5 OBJETIVO GENERAL

Determinar la variación posicional que sufre la estación de monitoreo continuo RIOP a través del tiempo, mediante el análisis de series temporales y el uso de funciones matemáticas básicas.

## 1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Determinar la calidad y consistencia de los datos posicionales de la estación de monitoreo continuo RIOP mediante el uso del software TEQC y el análisis de las gráficas de residuales.
- ✓ Generar soluciones finales diarias y semanales a partir del procesamiento de datos posicionales en el software científico GAMIT/GLOBK, Versión 10.4.
- ✓ Elaborar las respectivas series de tiempo para cada una de las componentes cartesianas de la estación de monitoreo continuo RIOP y definir a partir de su análisis, la función matemática más adaptable para la predicción e interpretación de sus variaciones posicionales en los últimos dos años.

## 1.7 HIPÓTESIS

Las variaciones posicionales generadas sobre la estación de monitoreo continuo RIOP, son expresadas mediante el uso de funciones matemáticas periódicas y el análisis de series de tiempo.

## 1.8 METAS

- ✓ Generar soluciones semanales con diferencias bajo los 5 milímetros en relación a las soluciones obtenidas por el Instituto Brasileño de Geografía y Estadística (IBGE-SIRGAS) y el Servicio Geodésico Internacional (IGS).
- ✓ Determinar una función periódica matemática capaz de predecir las variaciones posicionales provenientes de la estación de monitoreo continuo RIOP con una precisión bajo el centímetro.
- ✓ Desarrollar una metodología unificada para el procesamiento de datos posicionales a través del software científico GAMIT/GLOBK, Versión 10.4.



## **CAPÍTULO II**

### **FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

#### **2.1 SISTEMAS DE REFERENCIA**

##### **2.1.1 Generalidades**

Se define como sistema de referencia al conjunto de convenciones, constantes y variables necesarias para representar la posición de un objeto en tiempo y espacio. Los sistemas de referencia no pueden ser determinados a partir de mediciones, por lo cual todos ellos deben ser definidos a partir de parámetros explícitos previamente establecidos como son: el origen de coordenadas, la orientación de los ejes principales y modelos físicos y matemáticos fundamentales.

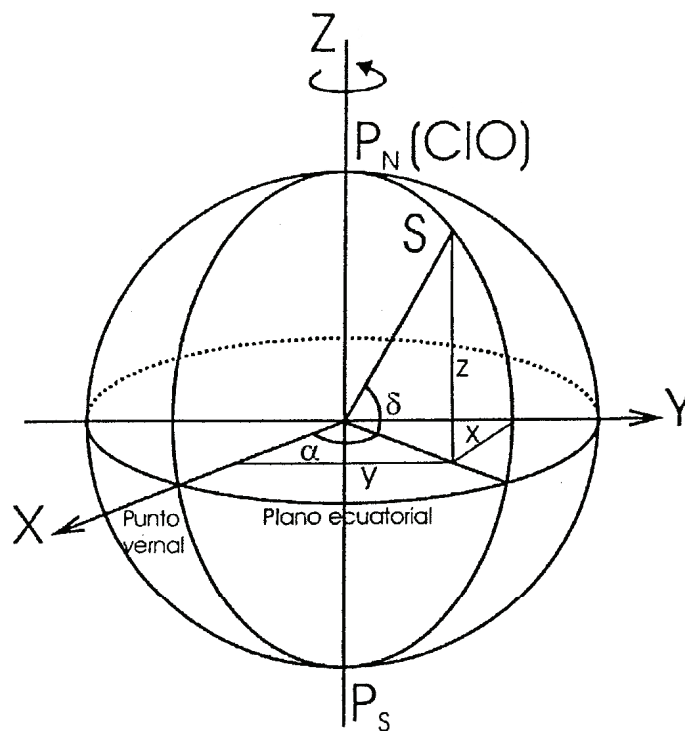
Otro aspecto de gran importancia a ser tomado en cuenta en la definición de un sistema, es el cumplimiento o no de las leyes físicas de la mecánica newtoniana. Así, si un sistema cumple con las leyes de movimiento de Newton, particularmente con la primera ley o ley de inercia, se habla de un sistema inercial, caso contrario y como es lógico, de un sistema no inercial.

En la geodesia satelital moderna, los dos sistemas de referencia más utilizados son: el sistema de referencia celeste internacional (ICRS por sus siglas en inglés) y el sistema de referencia terrestre internacional (ITRS por sus siglas en inglés), los cuales han sido materializados a partir de un conjunto de puntos fiduciales (catálogo de estrellas en el caso del ICRS y catálogo de posiciones y velocidades para el ITRS) de alta precisión definidos para una época específica. El uso en conjunto de estos dos sistemas de referencia, marcará en gran parte la precisión con la que una solución posicional GPS es generada. Así, si una solución se basa únicamente en las características físicas de la Tierra y no en los eventos y/o fenómenos a los cuales está sujeta, el punto carecerá de variables útiles para minimizar los errores sistemáticos presentes en el posicionamiento.

### 2.1.2 El Sistema de Referencia Celeste Internacional, ICRS

El Sistema de Referencia Celeste Internacional, desarrollado por el Servicio Internacional de Rotación Terrestre, es un sistema baricéntrico, cuyo plano fundamental se encuentra próximo al ecuador medio en la época J2000.0. Las convenciones establecidas para su definición (Ver Figura 2.1) son:

1. El eje X está orientado hacia el punto vernal (cruce de la eclíptica con el plano ecuatorial) en la época J2000.0.
2. El eje Z está orientado hacia el “Origen Internacional Convencional” (CIO) o también llamado “Polo Terrestre Convencional” (CTP).
3. El eje Y forma un sistema de mano derecha.



**Figura 2.1 Sistema de referencia celeste internacional**

Fuente: Sánchez, L. 2008

El ICRS se materializa mediante pares de coordenadas (ascensión recta y declinación) provenientes de fuentes de radio extra-galácticas observadas por Interferometría de muy larga base (VLBI). Su marco de referencia se denomina “International Celestial Reference Frame” o simplemente ICRF.



### 2.1.3 El Sistema de Referencia Terrestre Internacional, ITRS

El Sistema de Referencia Terrestre Internacional, es un sistema geocéntrico (centro de masas terrestre incluyendo la atmósfera y los océanos) no inercial, cuya escala local está establecida según la teoría gravitacional de relatividad (Sánchez, L. 2008) en el elipsoide de referencia GRS80. Las convenciones establecidas para su definición (Ver Figura 2.2) son:

1. El eje  $X'$  está orientado hacia el meridiano de Greenwich o también llamado GMO por sus siglas en inglés.
2. El eje  $Z'$  está orientado hacia el polo medio de rotación terrestre o CIO, para el período 1900 – 1905.
3. El eje  $Y'$  forma un sistema de mano derecha.

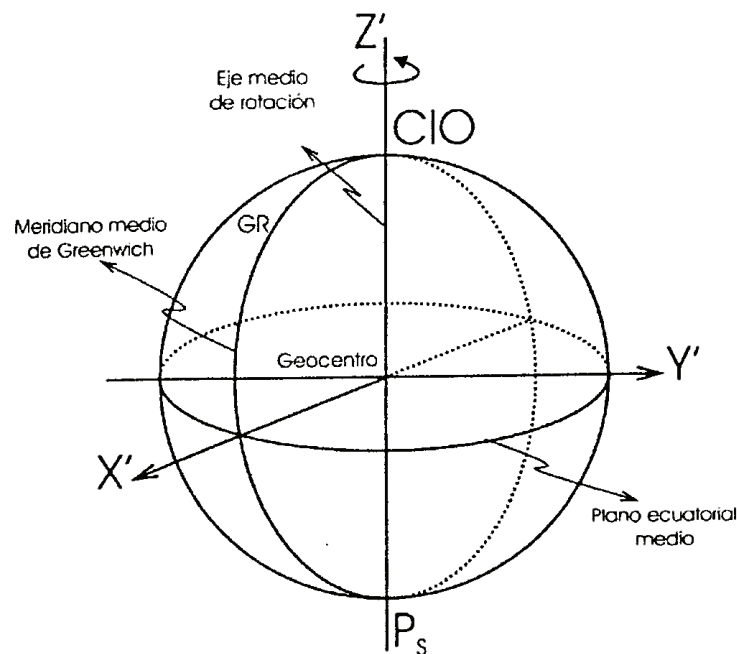


Figura 2.2 Sistema de referencia terrestre internacional

Fuente: Sánchez, L. 2008

La materialización del ITRS se denomina “International Terrestrial Reference Frame” o simplemente ITRF y se realiza a partir de un conjunto de coordenadas y velocidades de alta precisión, generadas por estaciones GNSS pertenecientes a la Red mundial IGS en combinación con soluciones geodésicas y astronómicas de tipo VLBI, SLR, LLR y DORIS.

### 2.1.4 Relación entre el ICRS y el ITRS

Si partimos de la idea de que todo objeto medido sobre la faz de la tierra se define a través del ITRS, y por el contrario, todo cuerpo extraterrestre (estrellas, cuántares, planetas y satélites) lo hace a través del ICRS, es lógico pensar que sus soluciones posicionales no podrán ser relacionadas sin antes encontrarse definidas sobre un sistema único de referencia para una época en común.

La transformación de soluciones a un sistema único solo es posible si se conoce con certeza, la orientación instantánea de la Tierra en el Sistema de Referencia Celeste Internacional<sup>5</sup>, por lo cual, es necesario determinar en primer lugar la variación que sufre el eje de rotación real y el eje Z' en relación al CIO a través de los denominados parámetros de orientación terrestre (movimientos de precesión, nutación, movimiento del polo terrestre, y variación de la velocidad angular de rotación) o también conocidos como parámetros de rotación (ERP). Los valores referentes a los EOPs o ERPs, incluyendo valores de tiempo atómico (ut1-tai y sut1), así como los offsets medios del polo celeste y sus respectivos errores (dPsi, sdPsi, dEps, sEps) pueden ser obtenidos a partir de los boletines generados por el IERS mensual y semanalmente. (Ver Figura 2.3)

Date year	x (")	sx (")	y (")	sy (")	ut1-tai s	sut1 s	dPsi (")	sdPsi (")	dEps (")	sEps (")
1997.50	.023090	.000090	.536790	.000100	.5261800	.0010000	-.041230	.000160	-.008490	.000200
1997.55	.088210	.000090	.526330	.000100	.5094900	.0010000	-.043740	.000130	-.007930	.000210
1997.60	.141170	.000100	.505000	.000100	.4812500	.0010000	-.045890	.000250	-.008370	.000090
1997.65	.181140	.000100	.467130	.000100	.4540400	.0010000	-.048080	.000130	-.008480	.000250
1997.70	.216860	.000100	.428130	.000100	.4276000	.0010000	-.047640	.000130	-.008290	.000090
1997.75	.221240	.000090	.378750	.000100	.3908700	.0010000	-.046790	.000110	-.007660	.000090

Figura 2.3 Extracto del boletín A. Parámetros de orientación terrestre.

Fuente: Mackern, V. 2003

El proceso de transformación es realizado mediante dos pasos principales: La transformación de los ejes de referencia medios desde una época estándar a una época t y la transformación de los ejes de referencia medios de una época t a los ejes verdaderos o instantáneos en la misma época. Modelos y fórmulas matemáticas de este proceso pueden ser vistos en Mackern, V. 2003.<sup>6</sup>

<sup>5</sup> Sánchez, L. 2008. "Introducción al uso del Software Bernese" Documentación no publicada. Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut – DGFI. Págs. 31 – 32.

<sup>6</sup> Mackern, V. 2003. "Materialización de un Sistema de Referencia Geocéntrico de alta precisión mediante observaciones GPS". Tesis Doctoral. Págs. 193 – 194.

### 2.1.5 Movimientos de Precesión y Nutación

La precesión (fenómeno secular) y nutación (fenómeno periódico), son movimientos asociados a la variación posicional que sufre el eje de rotación terrestre en el espacio, por motivo de la atracción gravitacional (lunar y solar) a la cual está sometida la tierra y por el abultamiento ecuatorial terrestre.<sup>7</sup>

De esta manera, a la vez que el eje de rotación terrestre (eje PN-PS) genera un movimiento oscilatorio (período = 18.6 años) alrededor del eje polar de la eclíptica (eje EN-ES) también describe una cónica denominada cono de precesión, con un ángulo medio cercano a los  $23,5^\circ$ . (Ver Figura 2.4)

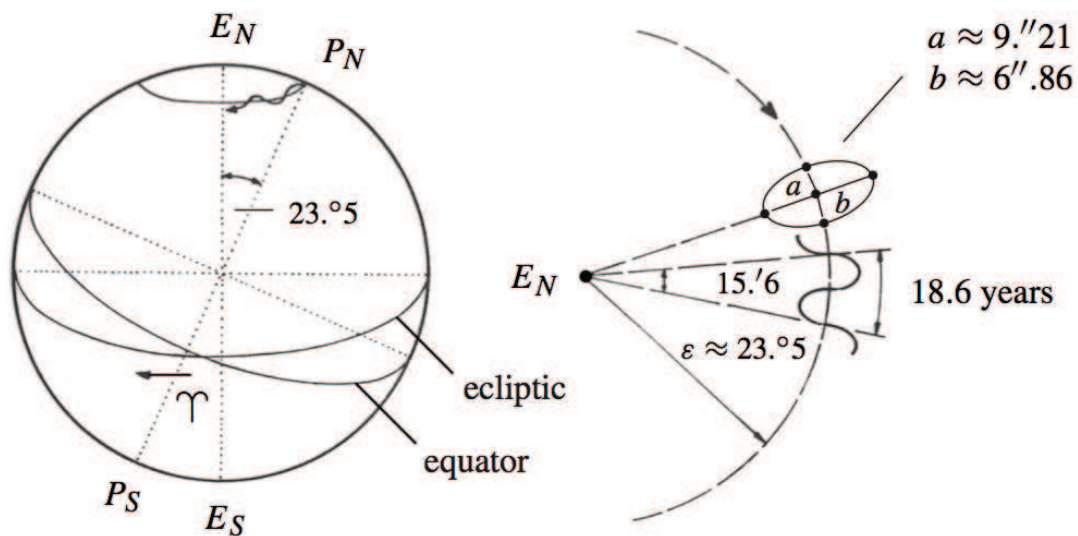


Figura 2.4 Movimientos de precesión y nutación de la Tierra

Fuente: Seeber, G. 2003

El modelo más utilizado para el cálculo de la precesión y nutación es el desarrollado por la Unión Astronómica Internacional (IAU por sus siglas en inglés) para la época de referencia 2000.0 y cuyo nombre es IAU2000A. Este modelo contiene un total de 678 términos luni-solares y 687 términos planetarios, por lo cual es capaz de proveer las direcciones del polo celeste con una precisión cercana a los 0.2 mili-arcos de segundo (mas).<sup>8</sup>

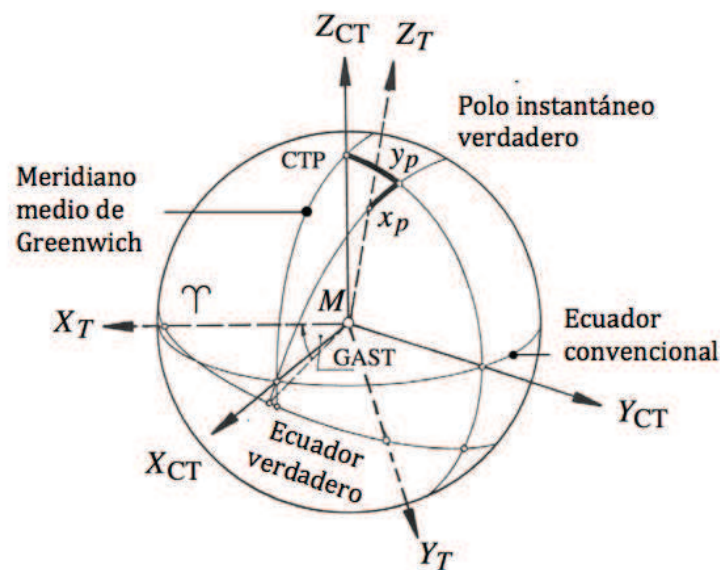
<sup>7</sup> Seeber, G. 2003. "Satellite Geodesy". Editorial de Gruyter. 2da Edición. Págs. 17 – 21.

<sup>8</sup> Capitaine, et al. 2002. "Proceedings of the IERS Workshop on the Implementation of the New IAU Resolutions". IERS Technical Note No. 29, Frankfurt am Main.

### 2.1.6 Movimientos del Polo y Variación de la Rotación Terrestre

A diferencia de los movimientos de precesión y nutación, los cuales son determinados sobre el ICRS, el movimiento del polo y la variación de la rotación terrestre (LOD) únicamente pueden ser calculados mediante el uso de parámetros obtenidos en el ITRS. (Ver Figura 2.5) Estos son:

1. Las coordenadas del Polo Instantáneo o CIP expresadas como  $X_p$  e  $Y_p$ .
2. El ángulo GAST (Greenwich Apparent Sidereal Time)



**Figura 2.5** Movimiento del polo terrestre

Fuente: Seeber, G. 2003

Así, mientras la precesión y nutación son modelados a partir de la teoría, los parámetros  $X_p$ ,  $Y_p$  y Ángulo GAST, son estimados empíricamente mediante técnicas como el SLR, LLR, VLBI, DORIS y GPS.<sup>9</sup>

Entre las principales causas por las cuales estos movimientos se presentan están: el movimiento libre del polo (Período Chandler), la acomodación de masas atmosféricas, fenómenos naturales como terremotos y cambios en el volumen oceánico (El Niño) y el decrecimiento secular en la velocidad angular terrestre.

<sup>9</sup> Sánchez, L. 2008. "Introducción al uso del Software Bernese" Documentación no publicada. Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut – DGFI. Págs. 36 – 38.

### 2.1.7 Solución IGS08 como Marco de Referencia Oficial para los productos IGS y SIRGAS

Desde la semana GPS 1632, correspondiente al 17 de marzo del 2011, el Servicio Geodésico Internacional (IGS por sus siglas en inglés) adoptó el uso de la solución IGS08 como marco de referencia oficial para todos sus productos en lugar de la solución IGS05 que desde el 5 de noviembre del 2006, hasta ese momento lo había sido.

De forma general, la actual solución, consta de 91 estaciones de monitoreo continuo, distribuidas a lo largo y ancho del planeta, las cuales han sido seleccionadas de un total de 232 estaciones candidatas, a través de la evaluación de sus precisiones, velocidades y residuales. (Ver Figura 2.6)

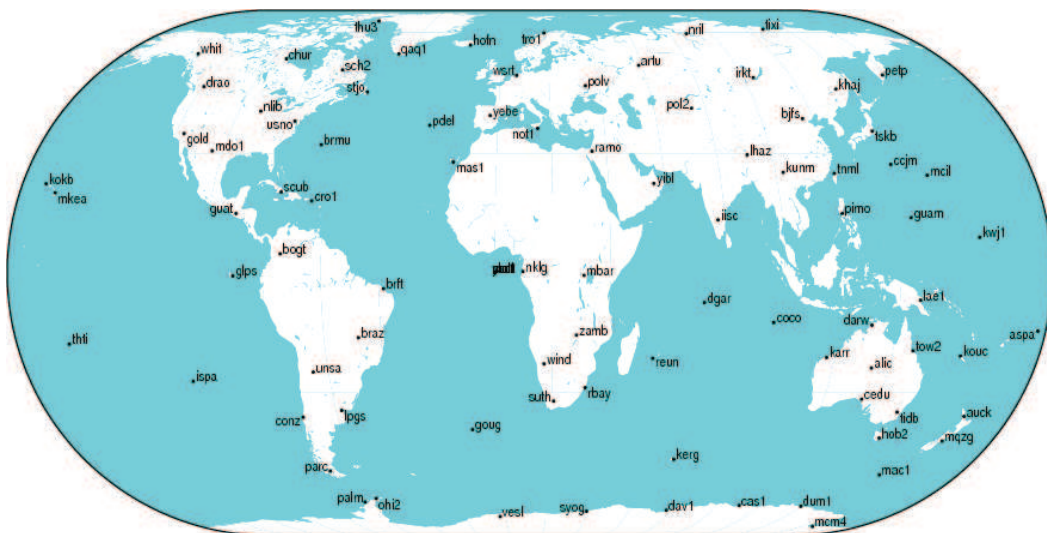


Figura 2.6 Estaciones de Monitoreo Continuo que conforman el Marco de Referencia IGS08

Fuente: Página Oficial IGS. 2012

De esta manera, un aspecto importante tomado en cuenta en su definición, es la similitud con el marco de referencia terrestre ITRF2008, lo cual puede ser constatado a través del boletín oficial IGSMail-6354 enviado por el IGS el 7 de marzo de 2011 y el cual manifiesta: “incluso si las coordenadas de algunas estaciones, fueran diferentes en IGS08 e ITRF2008, la transformación global de Helmert debe ser considerada como cero comparado con el marco de referencia terrestre ITRF2008, ya que ambos marcos han sido elaborados, basados en el mismo datum”<sup>10</sup>

<sup>10</sup> IGS. 2011. “Upcoming switch to IGS08/igs08.atx”. Vínculo web: <http://igsceb.jpl.nasa.gov/pipermail/igsmail/2011/007544.html>

## 2.2 EL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO SATELITAL. GPS

### 2.2.1 Generalidades

El Sistema de posicionamiento NAVSTAR-GPS (Navigation System with Time and Ranging Global Positioning System) es un sistema global de navegación por satélite (GNSS) desarrollado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos a inicios de los años 70 como parte del programa en inteligencia militar “SDI” (Strategic Defense Initiative).

Su constelación esta conformada por 24 satélites en pleno funcionamiento (más 2 satélites de reserva), distribuidos equitativamente en 6 órbitas geocéntricas, a una distancia aproximada de 20000 km (zona geostacionaria); distribución que ha sido diseñada específicamente, para que cualquier receptor ubicado en la faz de la tierra, tenga acceso a por lo menos 4 satélites durante las 24 horas del día.

Su funcionamiento se basa principalmente, en la medición de los tiempos de viaje de las ondas emitidas por los satélites (mínimo 4) hacia los receptores, los cuales posteriormente serán utilizados en la determinación de las coordenadas geocéntricas de los puntos en estudio a partir de la resolución de distancias. (Ver Figura 2.7)

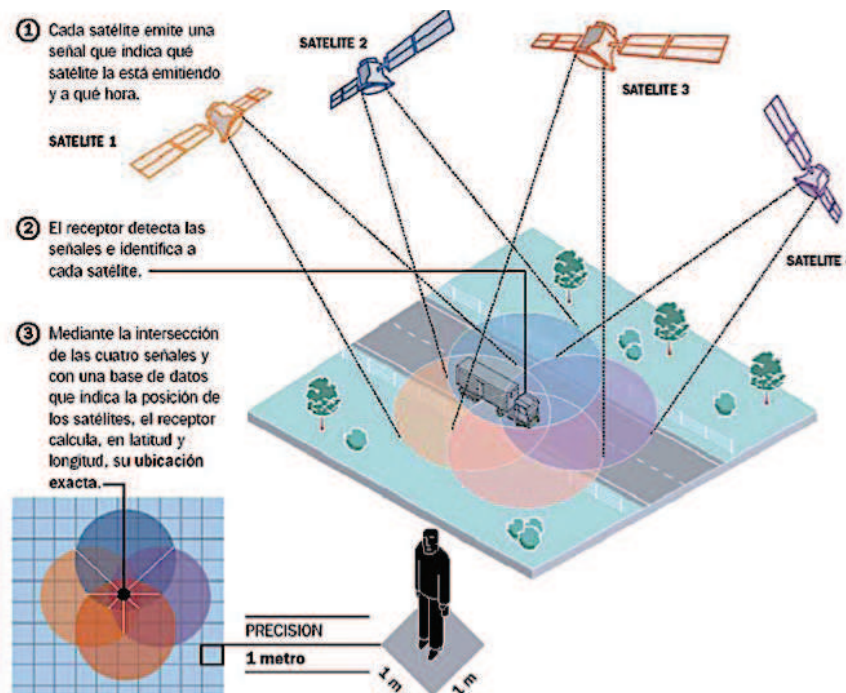


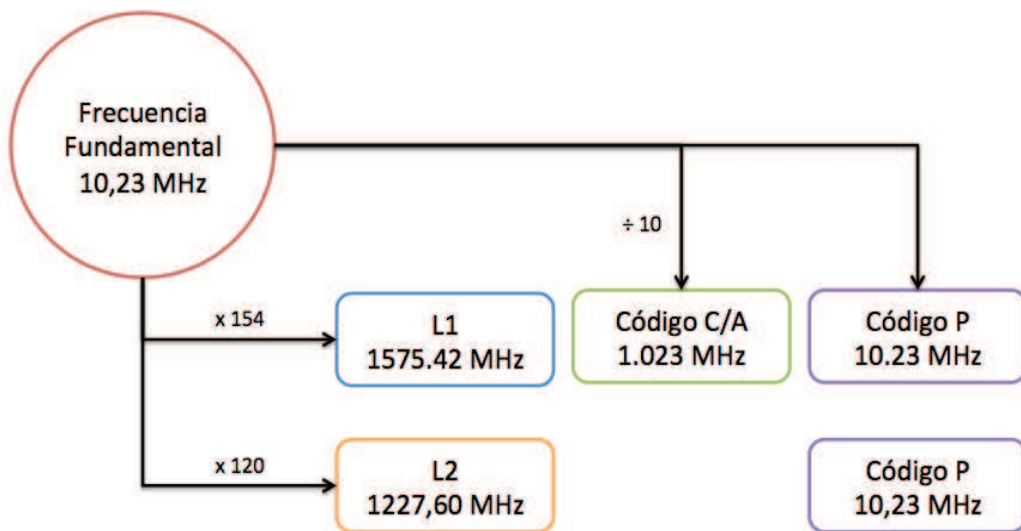
Figura 2.7 Funcionamiento básico del sistema GPS

Fuente: European Space Agency citado por Mussi, J. 2005



### 2.2.2 Señal GPS

Cada satélite GPS lleva consigo relojes atómicos muy precisos, los cuales operan a una frecuencia estándar de 10.23 MHz. Esta frecuencia es empleada en la generación de las ondas portadoras (L1 y L2), así como de los códigos (C/A y P) incluidos en la señal transmitida. (Ver Figura 2.8)



**Figura 2.8 Estructura fundamental de la señal GPS**

Fuente: Leica Geosystems AG. 2008

Una característica importante a ser tomada en cuenta en el estudio de las señales, es el hecho de que cada satélite posee un código C/A exclusivo, lo cual permite generar una modulación específica de onda por cada satélite observado<sup>11</sup>. Esta modulación en la práctica se la denomina pseudo-ruido aleatorio o PRN por sus siglas en inglés y su presencia es de vital importancia en el posicionamiento, ya que brinda a los receptores una alternativa única para la identificación de la fuente emisora de la señal.

Finalmente, pese a que las ondas portadoras brindan la mayor información para el posicionamiento satelital, los códigos C/A (Clear/Adquisition) y P (Precise) son de gran importancia ya que introducen las marcas de tiempo en el mensaje de navegación, útiles para la identificación del instante inicial en el cual la señal fue emitida.<sup>12</sup>

<sup>11</sup> Huerta, E., Mangiaterra, A. & Noguera, G. 2005. "GPS. Posicionamiento satelital" UNR Editora – Universidad Nacional del Rosario. Págs. III-4.

<sup>12</sup> Sánchez, L. 2008. "Introducción al uso del Software Bernese" Documentación no publicada. Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut – DGFI. Págs. 41 – 42.

### 2.2.3 Estructura matemática de las ondas portadoras L1 y L2

Entender la estructura de las ondas portadoras es de vital importancia, puesto que a partir de estas se deducen las ecuaciones utilizadas en la medición de códigos y diferencias de fase, dando como resultado el desarrollo parcial del modelo funcional utilizado en el posicionamiento satelital.

De esta forma, la estructura matemática de las ondas portadoras se definen a partir de las ecuaciones 2.1<sup>13</sup> :

$$L_1(t) = A_{P1} \cdot P(t) \cdot D(t) \cdot \sin(\omega_1 t) + A_C \cdot C(t) \cdot D(t) \cdot \cos(\omega_1 t) \quad (2.1)$$

y, 2.2<sup>14</sup>:

$$L_2(t) = A_{P2} \cdot P(t) \cdot D(t) \cdot \sin(\omega_2 t) \quad (2.2)$$

Donde:

$L_1(t)$	Onda portadora L1
$L_2(t)$	Onda portadora L2
$t$	Tiempo según el reloj del satélite
$A_{P1}$	Amplitud del código P en L1
$A_{P2}$	Amplitud del código P en L2
$A_C$	Amplitud del código C/A en L1
$P(t)$	Señal modulada del código P (+1 o -1)
$C(t)$	Señal modulada del código C/A (+1 o -1)
$D(t)$	Modulación del mensaje de navegación (+1 o -1)
$\omega_1$	Frecuencia de la onda portadora L1
$\omega_2$	Frecuencia de la onda portadora L2

<sup>13</sup> Spilker, J. 1980. "GPS signal structure and performance características". Navigation USA. Citado en: Seeber, G. 2003. "Satellite Geodesy". Editorial de Gruyter. 2da Edición. Págs. 220 – 221.

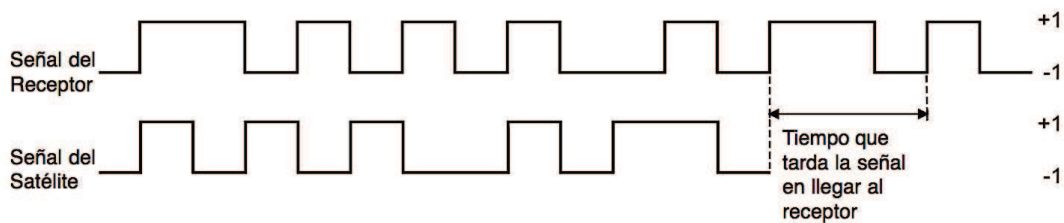
<sup>14</sup> Wübbena, G. 1991. "Zur Modellierung von GPS Beobachtungen für die hochgenaue Positions- bestimmung". Wiss. Arb. Univ. Hannover. Citado en: Seeber, G. 2003. "Satellite Geodesy". Editorial de Gruyter. 2da Edición. Págs. 220 – 221.



### 2.2.4 Mediciones de Código o Pseudo Rango

Una de las principales acciones desarrolladas por parte del receptor GPS al momento del posicionamiento, es la denominada medición de códigos o pseudo-rangos; en esta, cada equipo calcula las distancias existentes entre los satélites observados y el punto en estudio, a fin de determinar sus coordenadas geocéntricas promedio.

El error más común generado en el proceso, se refiere a la falta de sincronización entre los relojes, por lo cual, a la vez que el receptor capta la señal transmitida, también envía una réplica idéntica la cual le permitirá, mediante comparación, definir un tiempo medio de viaje. (Ver Figura 2.9)



**Figura 2.9 Esquema básico del retardo en la señal**

Fuente: Leica Geosystems AG. 2008

Así, partiendo de la ecuación fundamental de distancia, y tomando en consideración el error por sincronización de los relojes, la ecuación fundamental de las mediciones por código o pseudo-rango ( $P_r^s$ ) se define como:

$$P_r^s = \sqrt{(x^s - x_r)^2 + (y^s - y_r)^2 + (z^s - z_r)^2} + c\delta t_r - c\delta t^s \quad (2.3)$$

Donde:

$x^s, y^s, z^s$	Coordenadas cartesianas del satélite
$x_r, y_r, z_r$	Coordenadas cartesianas del receptor
$c$	Velocidad de propagación de la onda (Velocidad de la luz)
$\delta t^s$	Error de sincronización en el reloj del satélite
$\delta t_r$	Error de sincronización en el reloj del receptor

La solución a la ecuación existirá siempre y cuando se tenga datos de por lo menos 4 satélites, es decir, a partir del planteamiento y la posterior resolución de un sistema de ecuaciones linealmente independiente expresado como:

$$\begin{aligned}
 p_r^{s^1} &= \sqrt{(x^{s^1} - x_r)^2 + (y^{s^1} - y_r)^2 + (z^{s^1} - z_r)^2} + c\delta t_r - c\delta t^{s^1} \\
 p_r^{s^2} &= \sqrt{(x^{s^2} - x_r)^2 + (y^{s^2} - y_r)^2 + (z^{s^2} - z_r)^2} + c\delta t_r - c\delta t^{s^2} \\
 p_r^{s^3} &= \sqrt{(x^{s^3} - x_r)^2 + (y^{s^3} - y_r)^2 + (z^{s^3} - z_r)^2} + c\delta t_r - c\delta t^{s^3} \\
 p_r^{s^4} &= \sqrt{(x^{s^4} - x_r)^2 + (y^{s^4} - y_r)^2 + (z^{s^4} - z_r)^2} + c\delta t_r - c\delta t^{s^4}
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

Donde:

$s^1, s^2, s^3$  y  $s^4$  representan el número del satélite observado

y cuyas variables son:

1. Variables Conocidas (incluidas en los mensajes de navegación):

- ✓ Coordenadas cartesianas del satélite
- ✓ Error del reloj satelital

2. Variables Desconocidas:

- ✓ Coordenadas cartesianas del receptor
- ✓ Error del reloj del receptor

Finalmente, si el sistema de ecuaciones es un sistema no lineal, éste deberá ser en primer lugar linealizado previo a su resolución a través del ajuste por mínimos cuadrados.

Para mayor información respecto al desarrollo de la ecuación fundamental para la medición por código o pseudo rango y sus respectivas metodologías de resolución, se recomienda ver Seeber, G. 2003.

### 2.2.5 Mediciones de Fase o Diferencias de Fase

Las mediciones de fase, contrario a las mediciones de código o pseudo-rango, se basan principalmente en el cálculo de la diferencia matemática entre las fases generadas por las señales reales y sus réplicas.

Así, si para toda señal  $S$  emitida por el satélite  $j$  al receptor  $A$  y por ende para su réplica  $S'$ , las fases de onda son calculadas respectivamente, a partir de las expresiones:

$$\phi_A^{\text{GPS},j} = f \cdot T^j + \alpha^j \quad (2.5)$$

y

$$\phi_{0,A} = f \cdot T_A + \alpha_A \quad (2.6)$$

Donde:

$\phi_A^{\text{GPS},j}$	Fase emitida por el satélite $j$ al receptor $A$
$\phi_{0,A}$	Fase emitida por el receptor $A$ (réplica)
$T^j, T_A$	Tiempo medido por el satélite y el receptor respectivamente
$\alpha^j, \alpha_A$	Errores instrumentales (retraso de la señal)

Su diferencia se definirá como:

$$\phi_A^j = \phi_{0,A} - \phi_A^{\text{GPS},j} + N_A^j \quad (2.7)$$

$$\phi_A^j = f(T_A + T^j) + (N_A^j - \alpha^j + \alpha_A) \quad (2.8)$$

Donde:

$\phi_A^j$	Diferencia de fase
$N_A^j$	Número entero de oscilaciones generadas por la onda en el trayecto (ambigüedades de fase enteras).

O, multiplicado por su longitud de onda nominal,  $\lambda = c/f$  :

$$L_A^j = \lambda \Phi_A^j \quad (2.9)$$

$$L_A^j = c (T_A - T^j) + \lambda(N_A^j - \alpha^j + \alpha_A) \quad (2.10)$$

$$L_A^j = P_A^j + b_A^j \quad (2.11)$$

$$L_A^j = \sqrt{(x^s - x_r)^2 + (y^s - y_r)^2 + (z^s - z_r)^2} + c\delta t_r - c\delta t^s + b_A^j \quad (2.12)$$

Donde:

$L_A^j$	Diferencia de fase (Ecuación principal de observación)
$x^s, y^s, z^s$	Coordenadas cartesianas del satélite
$x_r, y_r, z_r$	Coordenadas cartesianas del receptor
$c$	Velocidad de propagación de la onda (Velocidad de la luz)
$\delta t^s$	Error de sincronización en el reloj del satélite
$\delta t_r$	Error de sincronización en el reloj del receptor
$b_A^j$	Término (no entero) de ambigüedades o phase bias

Como se puede observar las ecuaciones resultantes de la medición de código y de fase son en gran parte similares y solo se distinguen por la presencia del término de ambigüedades, conocido comúnmente como “phase bias”.

De esta manera, si el receptor posee visibilidad completa hacia el satélite emisor de la señal, su término de ambigüedades no cambiará durante todo el posicionamiento, caso contrario, se generará la pérdida de la señal (salto de ciclo) y será necesario recalcular su valor para el nuevo intervalo de rastreo.

Este proceso en la práctica se lo denomina “inicialización” y es de suma importancia si se desea conocer con precisión la posición del objeto en estudio.

## 2.3 PRINCIPALES ERRORES EN EL POSICIONAMIENTO GPS Y POSIBLES SOLUCIONES

### 2.3.1 Errores en la posición del satélite

El error en la posición del satélite se debe en principio, a las variaciones que sufren las órbitas a lo largo del tiempo por motivo de las perturbaciones y los fenómenos físicos a los que cada equipo está sometido. Así, pese a que en la mayoría de los casos los satélites poseen mecanismos de defensa, capaces de corregir sus trayectorias en tiempo real, su error en el posicionamiento no podrá ser eliminado sin antes realizar las respectivas correcciones sobre sus coordenadas para cada trayecto de la observación.

La información necesaria para la corrección del error orbital se encuentra registrada en un archivo único e independiente denominado “Efeméride Satelital”; cada archivo posee, las posiciones fijas de los satélites definidas sobre el sistema de referencia ITRS, a intervalos de 15 minutos y con una precisión cercana a los 5 y 20 mm. (Ver Figura 2.10)

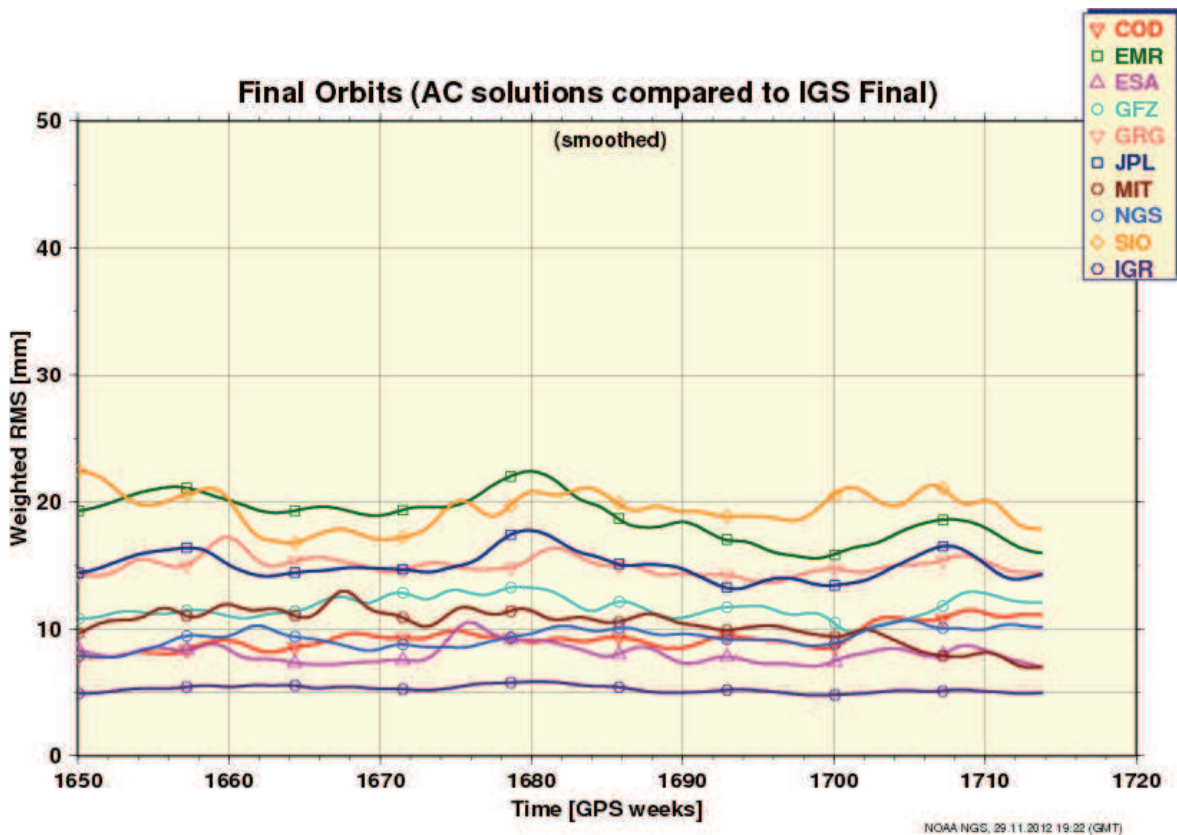


Figura 2.10 RMS de las órbitas IGS finales. Período AGO 2011 – NOV 2012

Fuente: IGS Analysis Center Coordinator (ACC). 2012

### 2.3.2 Errores en los relojes del satélite y receptor

Como se pudo evidenciar en el planteamiento de la ecuación para mediciones por código o pseudo-rango, uno de los errores instrumentales más representativos en el cálculo de las distancias, es aquel relacionado con la sincronización de los relojes, siendo necesario estimar el retardo de la señal mediante la comparación de la onda emitida por el satélite y su réplica generada por el receptor.

Ahora bien, en el caso específico de los errores por sincronización, su modelamiento se establece de la siguiente manera:

Para el error en el reloj del satélite ( $\delta t^j$ ), su corrección se determina mediante el modelamiento de su estabilidad, expresada a partir de un polinomio de segundo grado como:

$$\delta t^j = A_0 + A_1 t + A_2 t^2 \quad (2.13)$$

Donde:

$A_0$	Bias o descentramiento (valor constante)
$A_1$	Deriva
$A_2$	Aceleración del Reloj
$t$	Instante de observación (Tiempo)

Los valores de los coeficientes pueden ser obtenidos en los mensajes de navegación GPS o mediante los archivos Broadcast (Mensaje de navegación combinado).

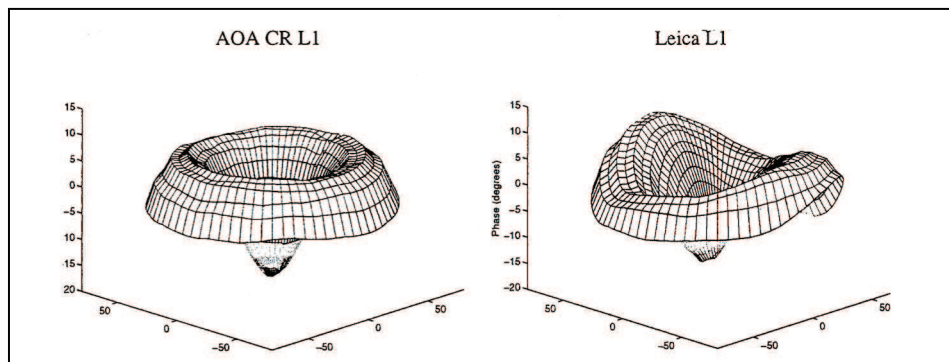
Por otro lado, en el caso del error en el reloj del receptor ( $\delta t_A$ ), su corrección se realiza mediante el uso de las mediciones de código o pseudo-rango, o lo que es igual, mediante la solución al sistema de ecuaciones lineales de forma iterativa (principio de mínimos cuadrados). Si  $\delta t_A$  es menor que 1  $\mu$ s, el error en la distancia será menor que 1 mm.<sup>15</sup>

<sup>15</sup> Sánchez, L. 2008. "Introducción al uso del Software Bernese" Documentación no publicada. Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut – DGFI. Págs. 54.

### 2.3.3 Variaciones en el centro de fase de la antena

La variación en el centro de fase de la antena, se presenta como un error instrumental propio de la infraestructura de cada equipo, generado en principio por la discrepancia existente entre la posición del centro de fase eléctrico (punto a donde llega la señal) y su centro mecánico.

De esta manera, su ubicación y posible corrección, depende en gran medida de la marca y modelo de antena que se esté utilizando (Ver Figura 2.11) y a su vez, de las frecuencias que ésta sea capaz de captar (centro de fase diferente para L1 y L2), siendo importante realizar su corrección de forma absoluta e independiente mediante los valores medios de calibración incluidos en los archivos ANTEX generados por el IGS.



**Figura 2.11 Modelamiento de las variaciones en los centros de fase de 2 antenas L1**

Fuente: UNAVCO, 2008 citado en Herring, T. 2012

La ecuación básica para el cálculo de la variación en el centro de fase ( $\Delta r_{\text{ant}}$ ), es:

$$\Delta r_{\text{ant}} = r_0 + \Delta\phi(z, \alpha) \cdot e_{z,a} \quad (2.14)$$

Donde:

$r_0$	offset medio del centro de fase (vector respecto al ARP)
$\Delta\phi(z, \alpha)$	variación del centro de fase (función del ángulo de elevación ( $\alpha$ ) y el azimut del satélite ( $z$ )).
$e_{z,a}$	vector unitario en dirección al satélite, definido como: $e_{z,a} = [\cos \alpha \sin z, \sin \alpha \sin z, \cos z]^T$

### 2.3.4 Refracción atmosférica

El retardo de la señal o refracción atmosférica ( $\delta\rho_{\text{atm}}$ ), es el fenómeno físico a partir del cual, la onda que viaja a través de la atmósfera sufre una alteración curvilínea en su trayectoria generada principalmente por el estado físico de dos de sus capas, la ionósfera y la tropósfera, siendo esta última la que mayores conflictos ocasiona. (Ver Figura 2.12)

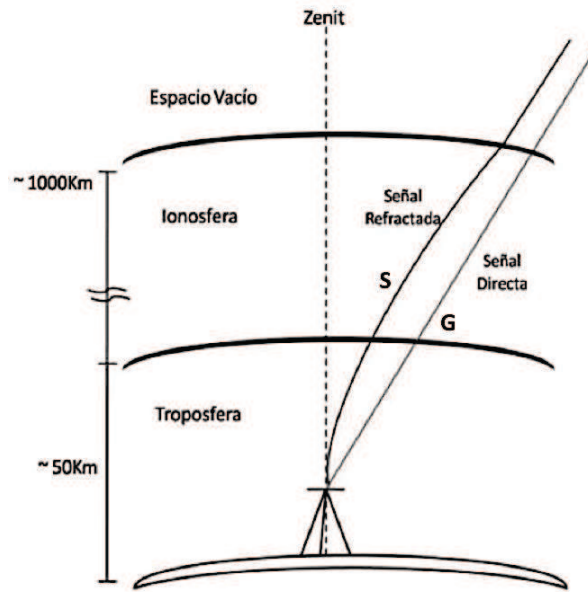


Figura 2.12 Esquema básico del proceso de refracción atmosférica

Fuente: Cioce, V. et al. 2010

En general, el retardo de una señal puede ser calculado a partir de su índice de refractividad  $n(s)$  y el uso de la expresión:

$$\delta\rho_{\text{atm}} = \int (n(s) - 1) ds - (S - G) \quad (2.15)$$

Donde:

- S                      trayectoria verdadera de la onda S.
- G                      distancia geométrica recta. (recorrido real)

Sin embargo, por la particularidad que cada capa posee, se plantea la necesidad de realizar su estudio de forma puntual a través del análisis detallado de sus propiedades.



### 2.3.5 Refracción ionosférica

La refracción ionosférica ( $\delta\rho_{ion}$ ) es un proceso dispersivo generado por la interacción existente entre la onda emitida por el satélite y los electrones libres en suspensión presentes a lo largo de su trayectoria de propagación, siendo obvio pensar, que la incidencia que éste fenómeno genere sobre la señal dependerá en su totalidad de la frecuencia a la cual ésta fue transmitida y de la densidad de electrones libres suspendidos al momento de la observación. (Ver Figura 2.13)

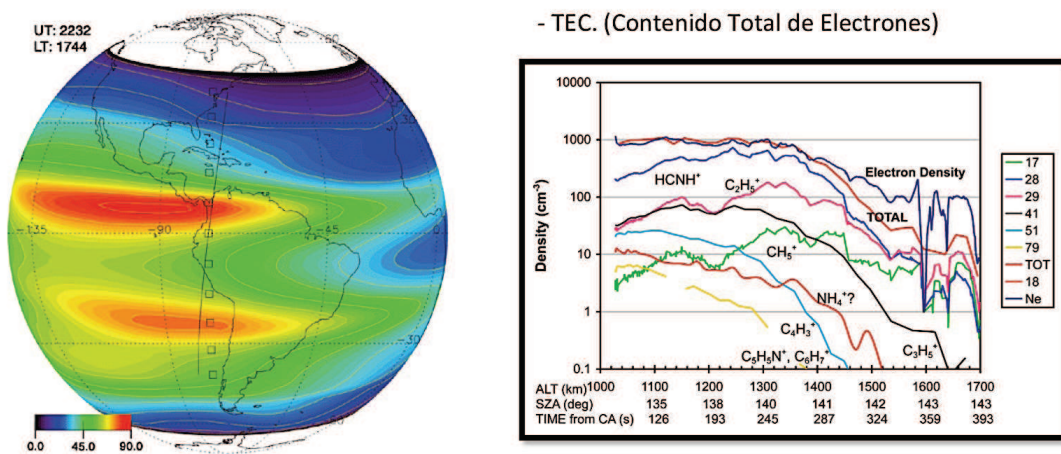


Figura 2.13 Modelamiento del contenido total de electrones

Fuente: Naval Research Laboratory - USA. 2004

Su corrección es calculada mediante el uso de la ecuación:

$$\delta\rho_{ion} = -40,3 * \frac{1}{\cos\left(\frac{R}{R+H} \sin z\right)} * \frac{Ev}{f^2} \tag{2.16}$$

Donde:

- z                      ángulo zenital al cual la señal fue captada.
- R                      distancia geométrica del receptor a la ionósfera.
- H                      Altura ( $\approx 450$  m)
- f                        frecuencia (L1 y/o L2).
- Ev                     Contenido total de electrones vertical (VTEC)

### 2.3.6 Refracción troposférica

A diferencia de lo que sucede en la ionósfera, la refracción de una señal en la capa troposférica ( $\delta\rho_{\text{trp}}$ ) se da debido a los cambios de temperatura y presión que se generan en ella y al contenido neto de vapor de agua existente en las nubes (lluvia).

Así, y partiendo de la asunción de que el término (S-G), representado en la ecuación 2.15 como la diferencia entre la trayectoria verdadera y la distancia geométrica recta, es insignificante en el cálculo de la refracción troposférica, la ecuación básica para la determinación del retraso troposférico ( $\delta\rho_{\text{ion}}$ ) queda expresada como:

$$\delta\rho_{\text{trp}} = \int_L (n(s) - 1)ds \quad (2.17)$$

O, en términos de su coíndice de refractividad  $N = (n - 1) \cdot 10^6$ :

$$\delta\rho_{\text{trp}} = 10^{-6} \int_L N(s)ds \quad (2.18)$$

La inclusión del término N por su parte, posee una mayor fiabilidad en el resultado final, ya que permite dividir a la ecuación en un término seco (dry) y uno húmedo (wet)<sup>16</sup>, otorgando al retardo troposférico un valor en función de la cantidad de vapor de agua presente en el medio. La ecuación queda reescrita de la forma:

$$\delta\rho_{\text{trp}} = 10^{-6} \int_L N_{\text{DRY}}(s)ds + 10^{-6} \int_L N_{\text{WET}}(s)ds \quad (2.19)$$

Finalmente, es importante señalar que la refracción troposférica varía en función del ángulo de observación, por lo cual, también es necesario incluir en su ecuación, variables que permitan deducir el retraso para todos los ángulos en los cuales la señal fue captada. Estas variables se denominan funciones de mapeo troposférico y pueden ser calculadas a partir de diferentes modelos preestablecidos, siendo el más utilizado, el modelo de Niell.<sup>17</sup>

<sup>16</sup> Smith, E. K. & Weintraub, S. 1953. "The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies". Proceedings of the I.R.E, vol. 41, pág. 1035-1037.

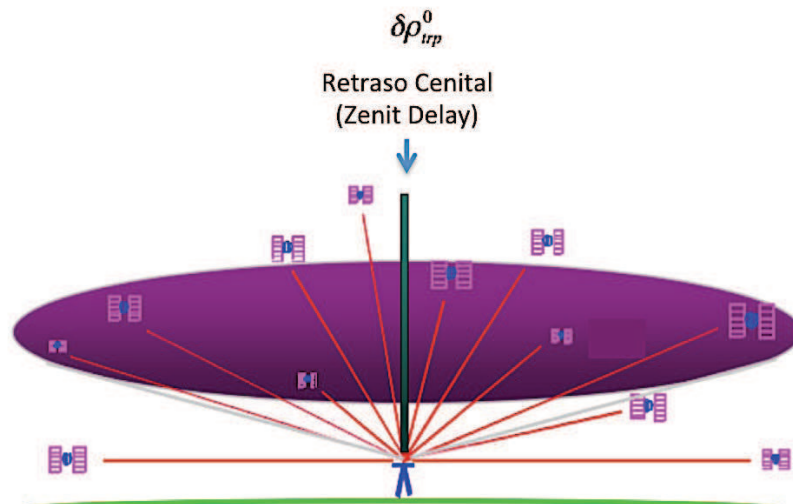
<sup>17</sup> Niell, A. E. 1996. "Global Mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths". Journal of Geodesy, vol. 101, pág. 3227-3246.

La ecuación para la modelación de la corrección troposférica ( $\delta\rho_{\text{trp}}(z)$ ) queda expresada como:

$$\delta\rho_{\text{trp}}(z) = m_{t,d}(z)\delta\rho_{\text{trp},d}^0 + m_{t,w}(z)\delta\rho_{\text{trp},w}^0 \quad (2.20)$$

Donde:

$m_{t,d}(z)$	Función de mapeo troposférico del término seco
$m_{t,w}(z)$	Función de mapeo troposférico del término húmedo
$\delta\rho_{\text{trp}}^0$	Zenit delay (valor troposférico vertical) (Ver Figura 2.14)



**Figura 2.14 Principio básico del proceso de refracción troposférica**

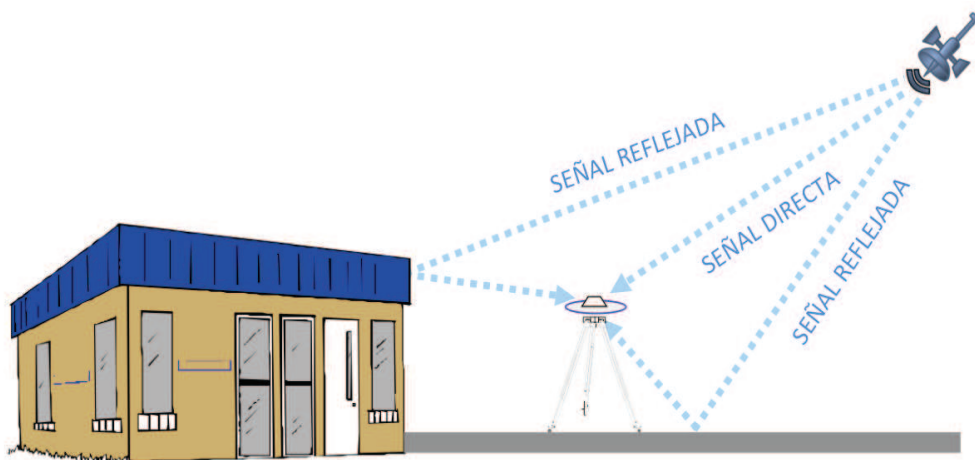
Fuente: COSMIC Program. 2012 citado en Herring, T. 2012

El valor del zenit delay o retraso cenital, al igual que las funciones de mapeo, puede ser calculado de forma sencilla mediante la implementación de una infinidad de modelos existentes y creados fundamentalmente para dicha causa (Essen, Froome, Hopfield, entre otros), siendo el modelo más utilizado en la geodesia tradicional, el modelo desarrollado por Saastamoinen.<sup>18</sup>

<sup>18</sup> Saastamoinen, J. "Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites". The Use of Artificial Satellites for Geodesy, Geophys, Monogr. Ser., vol. 15, pág. 247-251.

### 2.3.7 Efecto multicamino (Multipath)

Uno de los problemas más relevantes en el posicionamiento satelital y el cual resulta imposible de ser corregido a partir del modelamiento de las observaciones, es el denominado efecto multicamino o multipath. Este fenómeno se presenta únicamente cuando el equipo receptor se encuentra ubicado en las cercanías de superficies y/u objetos reflectores capaces de interferir sobre la señal y hacer que ésta no viaje directamente a la antena (Ver Figura 2.15), por lo cual su presencia en el posicionamiento dependerá en gran medida de la correcta ubicación que se le de a la misma y del ángulo de elevación predefinido para la recepción de los datos.



**Figura 2.15 Esquema básico del efecto multicamino**

Fuente: Herring, T. 2012

La solución fiable para la eliminación del error multipath, es el uso de antenas GPS especiales como son las antenas choke ring (antenas diseñadas mediante el uso de anillos concéntricos) capaces de atrapar cualquier señal indirecta<sup>19</sup>, sin embargo, su uso dependerá del nivel de compatibilidad que esta posea con el receptor y de los altos costos que se este dispuesto a pagar por su adquisición

En posicionamientos de corta duración y con ángulos de observación pequeños, el aporte del efecto multipath puede llegar a ser de varios metros (50 metros) para mediciones de rango y de centímetros (hasta 5 centímetros) para diferencias de fase,<sup>20</sup> por lo cual su corrección resulta realmente necesaria.

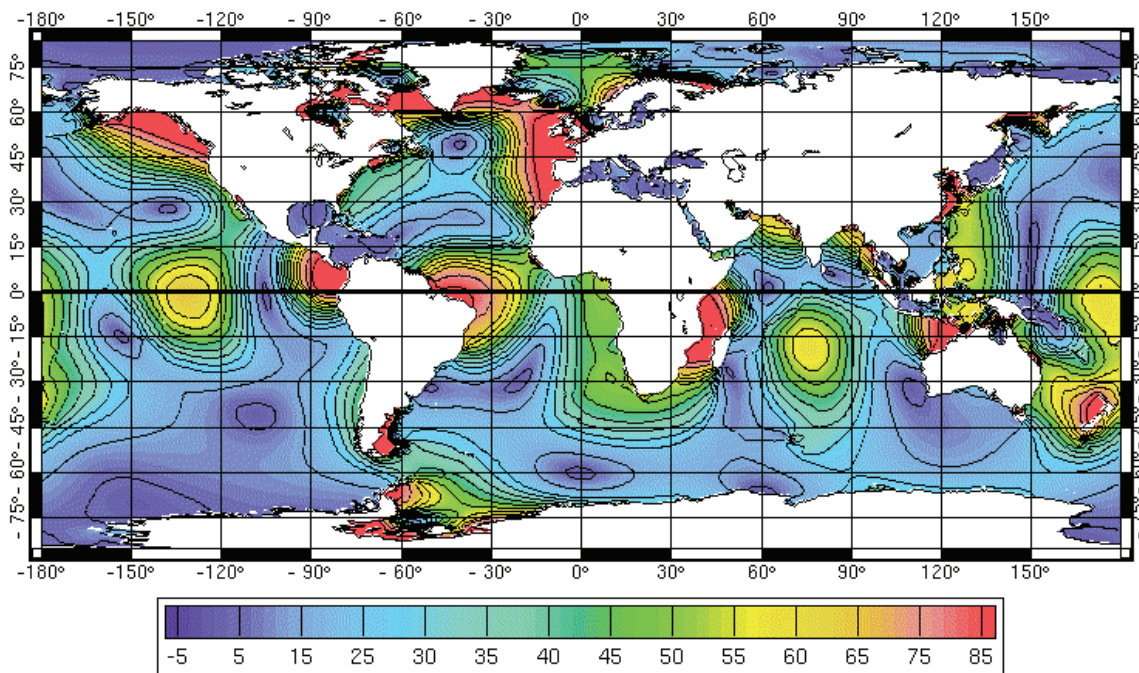
<sup>19</sup> Leica Geosystems AG. 2008. "Introducción al Sistema GPS (Sistema de Posicionamiento Global)". GPS Basics. Págs. 16.

<sup>20</sup> Sánchez, L. 2008. "Introducción al uso del Software Bernese" Documentación no publicada. Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut – DGFI. Págs. 74.

### 2.3.8 Cargamento oceánico y atmosférico

Dos fenómenos llevados a menos en el análisis y procesamiento de observaciones, son los denominados cargamentos oceánico y atmosférico. Estos fenómenos físicos se originan en principio, debido a la redistribución y/o variaciones que sufren las masas oceánicas, atmosféricas e hidrológicas con el pasar del tiempo, causando la deformación y consiguiente desplazamiento de la corteza terrestre.<sup>21</sup>

Particularmente, en el posicionamiento satelital, la presencia de estos eventos, puede llegar a aportar a la solución final, un error cercano a los 10 mm<sup>22</sup>, siendo su única alternativa de compensación, el uso de modelos tridimensionales como son: el modelo de cargamento oceánico mundial FES2004 (Ver Figura 2.16), diseñado por el Laboratorio de Estudios en Geofísica y Oceanografía Espacial, LEGOS, y el modelo de cargamento por presión atmosférica de Tregoning, P. diseñado en 2005, mediante la implementación de las denominadas Funciones Elásticas de Green.



**Figura 2.16 Modelo de cargamento oceánico mundial. FES2004**

Fuente: Laboratoire d'etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales. LEGOS. 2011

<sup>21</sup> Manabe S. et al., 1991. "Atmospheric Loading Effect on VLBI Observations" Conference on Geodetic VLBI: Monitoring Global Change. Citado en: Patias, E. 2007. "Estimation of Crustal Vertical Movements due to Atmospheric Loading Effects by GPS Observations". Revista Brasileira de Geofísica. Vol. 25. Págs 45 – 50.

<sup>22</sup> Herring, T. 2012. "Montserrat GAMIT/GLOBK/Track Workshop" Sección. Modeling the observations. GAMIT-GLOBK Homepage. Vínculo web: <http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/Montserrat12/Index.htm>

### 2.3.9 Modelo mejorado del posicionamiento satelital

Finalmente, y, a partir de la inclusión de los errores generados a lo largo del posicionamiento satelital, los cuales han sido analizados anteriormente, las ecuaciones para las mediciones de código ( $P_A^S$ ) y fase ( $L_A^S$ ) quedan definidas como:

$$P_A^S = |r_A(t_A) - r^j(t_A - \tau_A^j)| + \delta p_{A, \text{trp}}^j - \delta p_{A, \text{ion}}^j + \delta p_{A, \text{rel}}^j + \delta p_{A, \text{mul}}^j + \dots$$

$$\dots + c\delta t_A - c\delta t^j + c\beta_A - c\beta^j + \varepsilon_A^j \quad (2.21)$$

y

$$L_A^S = |r_A(t_A) - r^j(t_A - \tau_A^j)| + \delta p_{A, \text{trp}}^j - \delta p_{A, \text{ion}}^j + \delta p_{A, \text{rel}}^j + \delta p_{A, \text{mul}}^j + \dots$$

$$\dots + c\delta t_A - c\delta t^j + \lambda(N_A^j - \alpha^j + \alpha_A) + \varepsilon_A^j \quad (2.22)$$

Donde:

$r_A(t_A)$	Posición del receptor en el momento que recibe la señal
$r^j(t_A - \tau_A^j)$	Posición del satélite en el momento que emite la señal
$\tau_A^j$	Tiempo que tarda la señal en ir desde el satélite al receptor
$\delta p_{A, \text{trp}}^j$	Retardo de la señal en la tropósfera
$\delta p_{A, \text{ion}}^j$	Retardo de la señal en la ionósfera
$\delta p_{A, \text{rel}}^j$	Efectos relativistas
$\delta p_{A, \text{mul}}^j$	Efecto multicamino
$c\delta t_A$	Corrección al reloj del receptor
$c\delta t^j$	Corrección al reloj del satélite
$c\beta_A$	Retardo de la señal en el receptor
$c\beta^j$	Retardo de la señal en el satélite
$\varepsilon_A^j$	Errores aleatorios
$N_A^j$	Ambigüedad de fase
$\alpha^j$	Error instrumental del satélite
$\alpha_A$	Error instrumental del receptor

## 2.4 OBSERVACIONES DERIVADAS Y COMBINACIONES LINEALES

### 2.4.1 Generalidades

Al igual que en la mayoría de los procesos de parametrización y ajuste, la obtención de un número de observaciones mayores a las estrictamente necesarias para la resolución del problema planteado, da lugar a que la obtención del valor de una variable se vea influenciado de forma directa por el total de ecuaciones y/o combinaciones lineales posibles de ser establecidas para su resolución.<sup>23</sup>

Así, si se toma en consideración que las observaciones fundamentales en el sistema GPS son las “distancias”, se dice que es posible establecer relaciones entre éstas independientemente de su carácter o naturaleza, es decir, no importa si la distancia es obtenida desde una medición de código o desde una diferencia de fase, ni tampoco si ésta es determinada para uno u otro satélite o receptor en particular.

La principal ventaja que conlleva el uso de combinaciones lineales en el posicionamiento satelital, radica en que muchos de los errores presentes en las observaciones originales se pueden reducir y hasta eliminar a partir de su establecimiento, sin embargo, es importante recalcar que no todas son beneficiosas para el proceso, ya que mientras mayor número de combinaciones exista, mayor será el número de errores aleatorios también en la solución (principio de propagación).

Por está y por otras razones, las combinaciones más útiles en el posicionamiento satelital son:

1. Simples diferencias
2. Dobles diferencias
3. Triples diferencias
4. Combinación Libre de Ionósfera
5. Combinación Libre de Geometría
6. Combinación Wide Lane
7. Combinación Melbourne – Wübbena
8. Combinación Narrow Lane

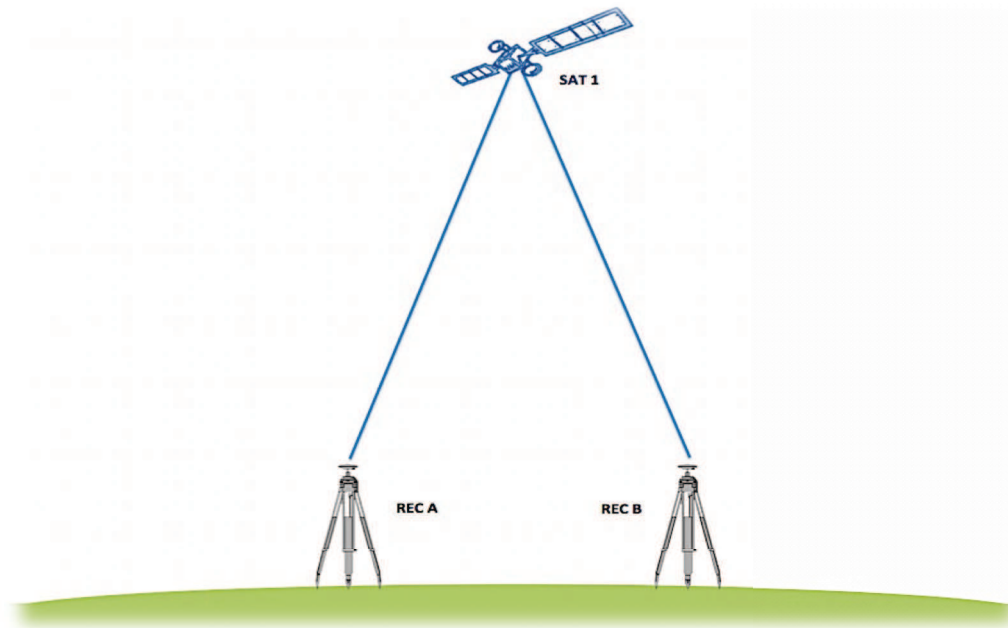
---

<sup>23</sup> Sevilla, M. 1987. “Colocación Mínimos Cuadrados”. IV Curso de Geodesia Superior. Universidad Complutense de Madrid. Págs. 103.



### 2.4.2 Simple Diferencias

Se denomina simple diferencia, a la operación matemática llevada a cabo entre dos observaciones fundamentales, las cuales han sido previamente calculadas a partir de la señal emitida por un satélite en común hacia dos receptores en tierra (Ver Figura 2.17) o viceversa.



**Figura 2.17 Esquema básico de la simple diferencia (1 satélite – 2 receptores)**

En líneas base cortas el uso de esta combinación permite eliminar errores como son: el retardo troposférico, el retardo ionosférico y los efectos relativistas; sin embargo, su uso fundamental se centra en la eliminación del error proveniente del reloj satelital, por lo que su planteamiento parte de los errores  $(t_A - \tau^j_A)$  y  $(t_B - \tau^j_B)$  determinados para cada observación en un instante  $t$ .

Finalmente y pese a que los receptores hoy en día garantizan precisiones cercanas al milisegundo, es aconsejable generar simples diferencias a partir de medidas cuyo error de sincronización entre los relojes de las estaciones A y B no sobrepase este límite, ya que la observación fundamental podría obtener un error cercano al 1 milímetro. En el caso de los errores aleatorios, éstos aumentarán en una relación igual a  $\sqrt{2}$  en comparación con las observaciones originales.<sup>24</sup>

<sup>24</sup> Sánchez, L. 2008. "Introducción al uso del Software Bernese" Documentación no publicada. Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut – DGFI. Págs. 77.



### 2.4.3 Dobles Diferencias

Se denomina doble diferencia, a la operación matemática llevada a cabo entre dos simples diferencias, las cuales han sido previamente calculadas a partir de la señal emitida por dos satélites hacia dos receptores en tierra (Ver Figura 2.18).

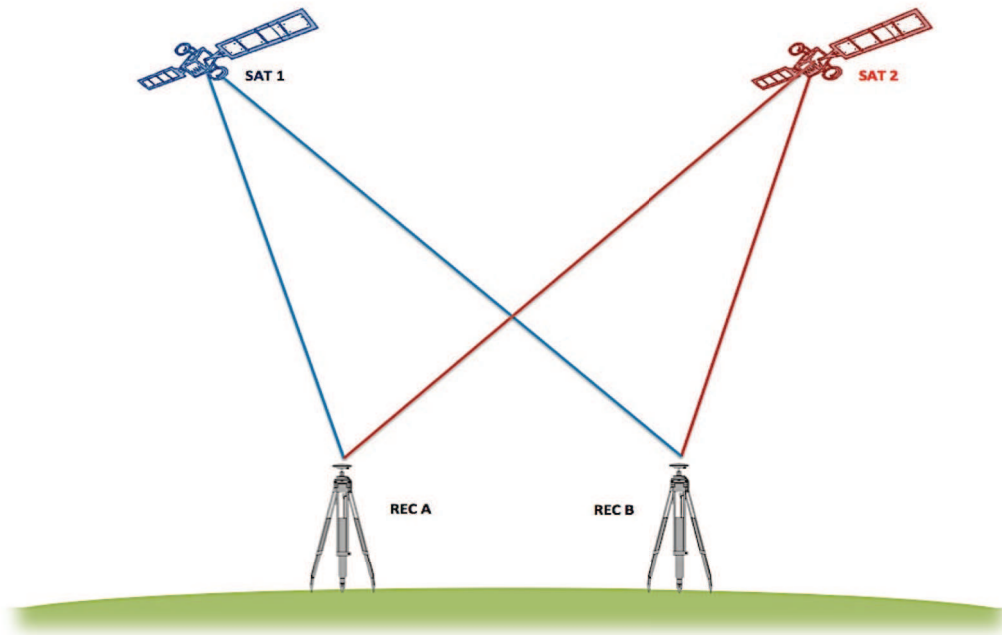


Figura 2.18 Esquema básico de la doble diferencia (2 satélite – 2 receptores)

Contrario a lo establecido para el caso anterior, el fundamento de las dobles diferencias se centra en la eliminación del error por sincronización del reloj de cada receptor ( $\delta t_A$  y  $\delta t_B$ ), el cual a su vez, es posible de ser simplificado debido a que las señal emitida por cada satélite es recibida simultáneamente por los dos equipos.

La precisión lograda en el cálculo es establecida mediante la comparación del tiempo y la velocidad a la cual viaja la onda. Así, si partimos que la velocidad de viaje de la señal GPS es igual a la velocidad de la luz (300 000 km/s), la distancia entre las señales emitidas por el satélite 1 y 2 al receptor A y B, variará en una relación de 1 mm por cada 0,3 ms.<sup>25</sup>

En el caso de los errores aleatorios, éstos se duplicarán en comparación con las mediciones originales.

<sup>25</sup> Sánchez, L. 2008. "Introducción al uso del Software Bernese" Documentación no publicada. Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut – DGFI. Págs. 77.

### 2.4.4 Triples Diferencias

Se denomina triple diferencia, a la operación matemática llevada a cabo entre dos dobles diferencias, las cuales han sido previamente calculadas a partir de la señal emitida por cuatro satélites hacia dos receptores en tierra (Ver Figura 2.19).

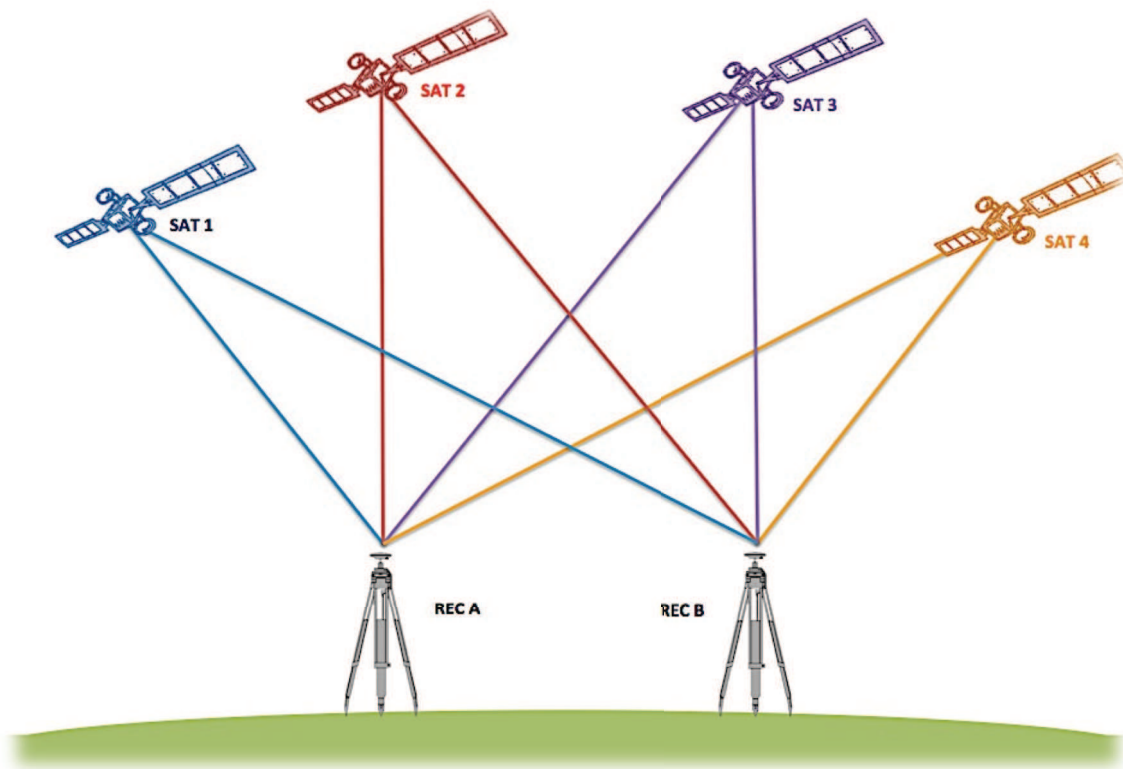


Figura 2.19 Esquema básico de la triple diferencia (4 satélite – 2 receptores)

La utilidad de esta combinación radica en la eliminación del término de ambigüedades, el cual se presenta como un número entero en la ecuación base de las dobles diferencias y por ende se convierte en la única forma posible para su solución.

En muchos casos, la triple diferencia también es utilizada en la determinación de coordenadas (relativas) entre dos estaciones y en el análisis de los saltos de ciclo, los cuales se ven como medidas defectuosas en su estructura.

Finalmente y a diferencia de los casos anteriores, ésta combinación también puede ser establecida mediante mediciones de código o pseudo rango, siendo su error aleatorio igual a  $2\sqrt{2}$  respecto a las observaciones originales.

### 2.4.5 Formulación de Combinaciones Lineales

De forma general, una combinación lineal entre dos fases, puede ser expresada a partir de la relación:

$$\phi = n_1\phi_1 + n_2\phi_2 \quad (2.23)$$

Donde:

$n_1, n_2$  números arbitrarios (enteros o reales)

O tomando en cuenta el concepto de frecuencia,  $\phi_i = f_i t$  :

$$\phi = n_1 f_1 t + n_2 f_2 t \quad (2.24)$$

Donde:

$f_1, f_2$  frecuencias de cada portadora (L1 y L2)

$t$  instante en el que la fase es medida.

El establecimiento de esta relación permite obtener una longitud de onda ( $\lambda$ ) y una frecuencia ( $f$ ) particular para cada combinación posible, las cuales se denotan mediante las ecuaciones:

$$f = n_1 f_1 + n_2 f_2 \quad (2.25)$$

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.26)$$

Así, y como lo manifiesta Huerta, E. et al. 2010., eligiendo adecuadamente los valores de los coeficientes  $n_1$  y  $n_2$  se puede lograr nuevas ecuaciones con portadoras equivalentes a la  $L_1$  y  $L_2$ , pero con características particulares que permiten la resolución de problemas específicos.<sup>26</sup>

<sup>26</sup> Huerta, E., Mangiaterra, A. & Noguera, G. 2005. "GPS. Posicionamiento satelital" UNR Editora – Universidad Nacional del Rosario. Págs. V26 – V27.

En la tabla 2.1, se presentan las principales combinaciones utilizadas en la geodesia tradicional. Así:

**Tabla 2.1 Principales combinaciones utilizadas en el posicionamiento GPS**

NOMBRE	$\lambda$	APLICACIÓN
Libre de Ionósfera	0	Eliminación del retraso ionosférico
Libre de Geometría	$\infty$	Identificación de saltos de ciclo
Wide Lane	86,2	Resolución de Ambigüedades en $L_1$ y $L_2$
Melbourne – Wübbena	86,0	Resolución de Ambigüedades en $L_1$
Extra Wide Lane	86,0	Resolución de Ambigüedades tiempo real
Narrow Lane	10,7	Resolución de Ambigüedades completas

Fuente: Huerta, E. et al. 2005. Herring, T. 2012. & Sánchez, L. 2008.

En la mayoría de casos, cada combinación puede ser establecida desde una o más formas, sin embargo su esencia se mantendrá en cada una de ellas, siendo su principal fortaleza que todas pueden ser establecidas desde mediciones de código o fase.

Finalmente, el error aleatorio de una combinación ( $\epsilon$ ), en comparación con las ondas originales, aumenta en relación a un factor de:<sup>27</sup>

$$\epsilon = \sqrt{n_1^2 + n_2^2} \quad (2.27)$$

Donde:

$n_1, n_2$  coeficientes de la combinación.

<sup>27</sup> Sánchez, L. 2008. “Introducción al uso del Software Bernese” Documentación no publicada. Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut – DGFI. Págs. 80.

## 2.5 PARAMETRIZACIÓN DE OBSERVACIONES

### 2.5.1 Conceptualización

Finalizada la etapa de medición, el siguiente paso a ser realizado en el posicionamiento satelital, es el denominado modelamiento o parametrización de observaciones.

Este proceso en principio, busca establecer las condiciones necesarias a partir de las cuales se definirán las diferentes relaciones existentes entre parámetros y observaciones (modelo funcional) y a su vez trata de medir la solidez de la solución mediante el cálculo de la esperanza matemática de cada variable aleatoria (modelo estocástico).<sup>28</sup>

Así y partiendo del modelo funcional de observaciones establecido como:

$$L = F(X) \quad (2.28)$$

Donde:

L	observaciones ajustadas
X	parámetros
F	Función matemática

Se dice que todo parámetro es función de las observaciones, sí y solo sí, el cumplimiento de su relación se da de igual forma para todo valor de L definido como:

$$L = B + V \quad (2.29)$$

Donde:

B	observaciones reales
V	error de observación

---

<sup>28</sup> Sevilla, M. 1987. "Colocación Mínimos Cuadrados". IV Curso de Geodesia Superior. Universidad Complutense de Madrid. Págs. 99.

El planteamiento de esta condición pone de manifiesto dos aspectos a ser tomados en consideración. En primer lugar, la existencia de un sinnúmero de posibles soluciones como ecuaciones linealmente independientes se puedan establecer a partir de la relación y el uso de los valores de observación y en segundo lugar, la necesidad de manejar una metodología o técnica capaz de determinar el valor más probable a ser tomado como magnitud de la variable entre todo el conjunto de soluciones finales.

Este principio por lo general, es el denominado principio de mínimos cuadrados, el cual ha sido concebido como parte de la teoría de errores en la determinación de funciones matemáticas de ajuste, mediante el uso del criterio de mínimo error cuadrático.

### 2.5.2 Principio de Mínimos Cuadrados

Dado un conjunto de posibles soluciones, se dice que una función cumple el principio de mínimos cuadrados, sí y solo sí, la suma de los cuadrados de los errores residuales es mínima<sup>29</sup>.

Esta relación puede ser expresada mediante la métrica euclídea:

$$\sum_{i=1}^m V_i^2 = \text{mínimo} \quad (2.30)$$

O matricialmente a partir de:

$$V^T P V = \text{mínimo} \quad (2.31)$$

Así y como lo expresa Sevilla, M. J. 1987: “La solución óptima de un problema de ajuste o compensación será aquella que además de satisfacer exactamente las ecuaciones del modelo en su forma lineal da lugar a unos errores residuales que satisfagan el principio de mínimos cuadrados.”

---

<sup>29</sup> Sevilla, M. 1987. “Colocación Mínimos Cuadrados”. IV Curso de Geodesia Superior. Universidad Complutense de Madrid. Págs. 104.

### 2.5.3 Formulación del modelo fundamental

Partiendo del modelo funcional de observaciones, establecido en el literal 2.5.1, mediante la ecuación 2.28, se define el modelo matemático fundamental para el ajuste de soluciones como:

$$L = Ax + L_0 \quad (2.32)$$

Donde:

x	vector de parámetros incógnita calculado mediante la resta de los valores ajustados y los aproximados.
$L_0$	vector de valores aproximados de las observaciones
A	matriz jacobiana de derivadas parciales del modelo funcional (función de los parámetros)

O en su forma linealizada:

$$Ax - t = v \quad (2.33)$$

Donde:

v	vector de errores residuales
t	vector de términos constantes de observación

definido por:

$$t = B + L_0 \quad (2.34)$$

Donde:

B	vector de observaciones reales
$L_0$	vector de valores aproximados de las observaciones





A partir de aquí se puede realizar la determinación de los errores en la solución, basándonos en el análisis de los modelos estocásticos definidos en el modelamiento de las observaciones, así, partiendo de la estructura de la matriz de cofactores  $Q_{xx}$  (Ver Figura 2.20):

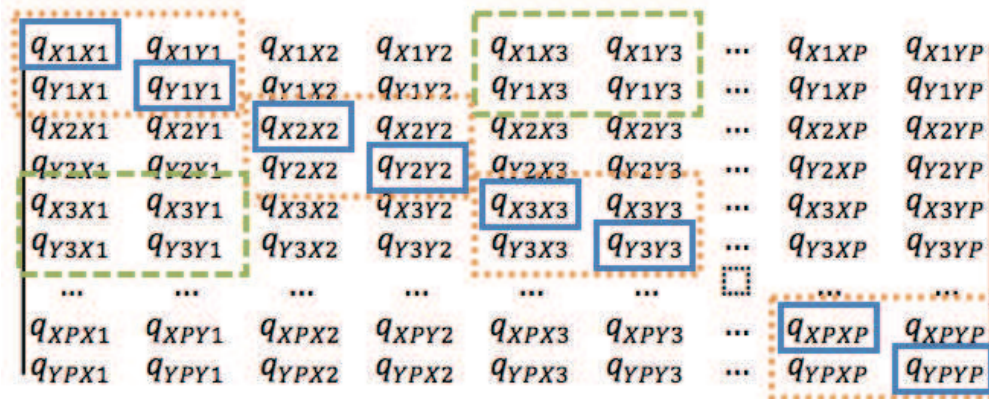


Figura 2.20 Matriz de cofactores  $Q_{xx}$

Fuente: Sánchez, L. 2008

Donde:



Error medio de las coordenadas



Elipse de error relativo (probabilidad del 95%)  
 Propagación de errores en otros modelos funcionales.



Elipses de error (probabilidad del 95%)  
 Error total del punto medio de las coordenadas

Se obtiene, el error medio de las coordenadas definido como:

$$\hat{\sigma}_{\hat{x}} = \hat{\sigma}_0 \sqrt{Q_{xx}} \tag{2.39}$$

el cual puede y debe ser utilizado para todo punto n calculado en el proceso.

## 2.6 MODELAMIENTO DE RESULTADOS

### 2.6.1 Modelamiento de velocidades

Como se estableció en el Capítulo I, el modelamiento de la dinámica espacial del territorio, surge de la necesidad de establecer un modelo, técnica o metodología capaz de minimizar los errores existentes en la unificación de soluciones posicionales sobre un sistema de referencia en común.

En general, el modelamiento parte del análisis estadístico de las series temporales de cada una de las estaciones, seguido por la predicción e interpolación de los vectores de desplazamiento para  $n$  puntos de interés. En algunos casos, el primer paso puede resultar realmente fácil, ya que los valores de movimiento son determinados simplemente con el cálculo de su magnitud física a través de la resta de soluciones, pero en otros, puede llegar a tornarse en un proceso mucho más complicado al punto de ser necesario el establecimiento de una función matemática de ajuste, adaptable a la totalidad de los datos generados de cada una de las coordenadas y capaz de definir en su estructura el valor más probable de movimiento.

Una alternativa válida para ello, es a partir del uso de los denominados modelos de velocidades, los cuales no son más que modelos de predicción capaces de determinar la magnitud de desplazamiento generada por un punto en particular, ubicado sobre la superficie terrestre y definido sobre un sistema de referencia para una época en específico, la misma que podrá ser utilizada en la corrección de la variación posicional que sufre dicho punto a lo largo del tiempo.

Entre los modelos más representativos hoy en día se encuentran:

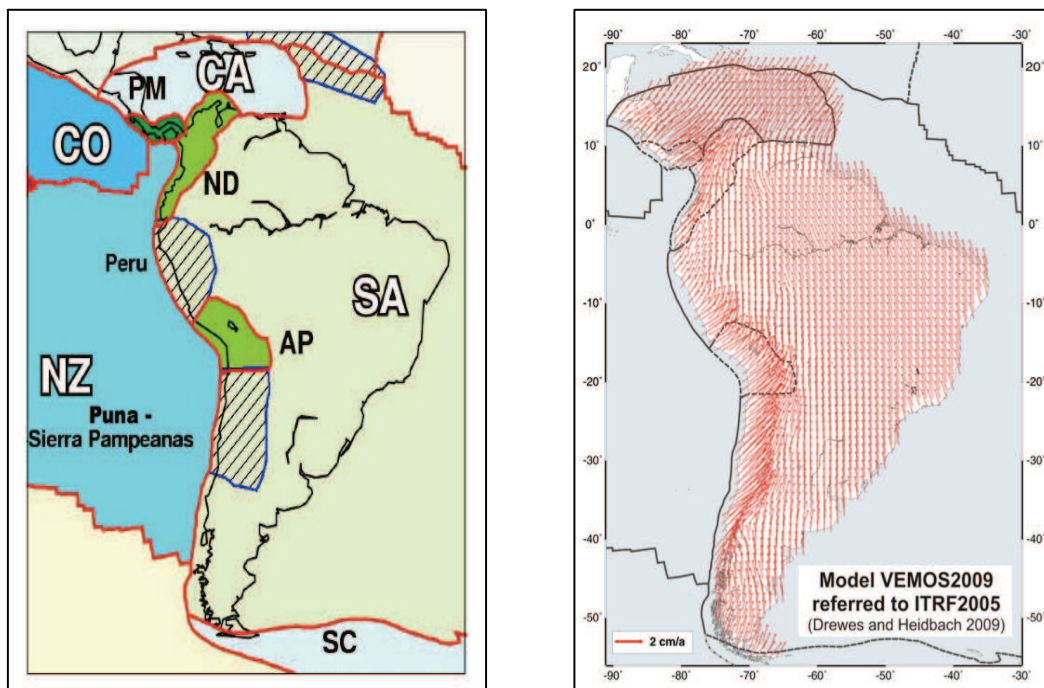
A nivel internacional

1. El modelo NNR-NUVEL-1<sup>a</sup> establecido por DeMets et al., a finales de los 90.<sup>30</sup>, como parte del marco de referencia ITRF, basado en información geológica y geomagnética de los últimos 3 millones de años.

---

<sup>30</sup> DeMets, C., Gordon, R. & Argus, D., 1990. "Current plate motions". *Geophys. J. Int.* 101, Págs. 425–478.

2. El modelo geofísico PB2002 desarrollado por Bird, P en 2003<sup>31</sup> y definido a partir de las velocidades de las micro-placas continentales y oceánicas, así como de las zonas de deformación mundial. (Ver Figura 2.21).
3. El modelo geodésico VEMOS09, diseñado por Drewes, H & Heidbach, O en el 2009<sup>32</sup>, como parte del proyecto SIRGAS, mediante el uso de la técnica de mínimos cuadrados colocación y elementos finitos (Ver Figura 2.21).



**Figura 2.21 Modelos de velocidades VEMOS 09 y PB 2002**

Fuente: Drewes, H & Heidbach, O. 2009 y Bird, P. 2003

Y finalmente, a nivel nacional

4. El modelo geodésico del Ecuador desarrollado por Tierra, A. en 2010<sup>33</sup>, a partir del uso de los datos posicionales de 135 estaciones de monitoreo continuo perteneciente a la Red SIRGAS-CON y la implementación de redes neuronales artificiales multicapa.

<sup>31</sup> Bird, P. 2003. "An updated digital model of plate boundaries", *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 4(3), 1027, doi:10.1029/2001GC000252.

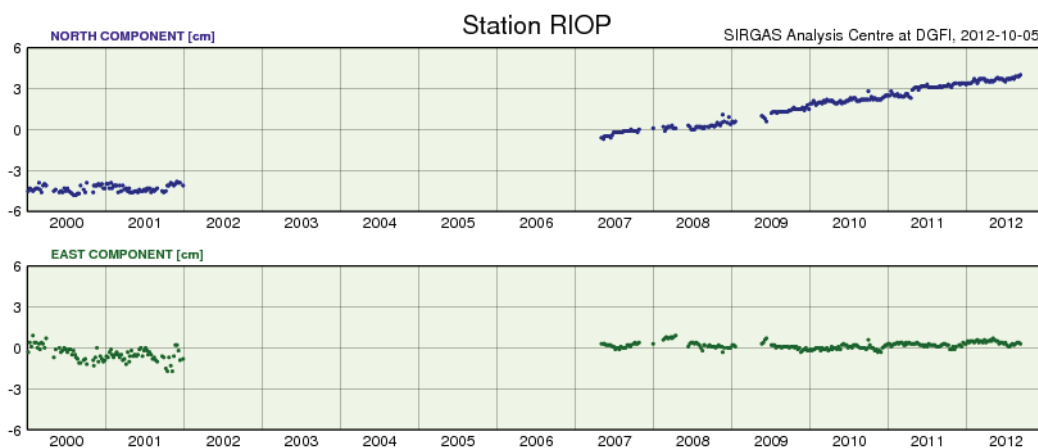
<sup>32</sup> Drewes, H. & Heidbach, O. 2009. "The 2009 Horizontal Velocity Field for South America and the Caribbean". *Geodesy for Planet Earth. International Association of Geodesy Symposia Volume 136*, 2012, pp 657-664

<sup>33</sup> Tierra, A. 2010. "Modelo de Velocidades usando una Red Neuronal Artificial". Reunión SIRGAS 2010. Lima, Perú.

## 2.6.2 Análisis de series temporales

El análisis de series temporales, constituye quizás la metodología más utilizada en el modelamiento de información espacial. Esto se debe a que su implementación brinda al investigador una alternativa óptima y sencilla en el “estudio e interpretación de la información multitemporal y a la vez que plantea la posibilidad de extrapolar dicha información para predecir su comportamiento futuro.”<sup>34</sup>

Una serie temporal por lo general, esta constituida de observaciones y/o datos de similares características, los cuales han sido medidos periódicamente y posteriormente espacializados sobre un plano bidimensional en forma cronológica. (Ver Figura 2.22) Entre los principales componentes o características a ser tomados en cuenta para su correcto análisis se encuentran: la tendencia, definida como la trayectoria de crecimiento, decrecimiento o estabilidad que sigue una serie cronológica a lo largo del tiempo, la estacionalidad, atribuida a las oscilaciones periódicas que se producen a corto plazo y bajo una frecuencia predefinida y la periodicidad, la cual establece el intervalo de tiempo existente entre una y otra medida, así como la estabilidad total de la serie.



**Figura 2.22 Serie temporal para la Estación GNSS RIOP. Periodo 2000 - 2012**

Fuente: Página Oficial SIRGAS. 2012

(<http://www.sirgas.org/index.php?id=148>)

Establecido cada uno de estos parámetros, el siguiente paso lo comprende la determinación de la función matemática que mejor se ajuste a sus datos, siendo la regresión lineal el método más utilizado.

<sup>34</sup> Wikipedia. La Enciclopedia Libre. 2012. “Serie temporal”. Categoría. Análisis de series temporales. Vínculo Web. [http://es.wikipedia.org/wiki/Serie\\_temporal](http://es.wikipedia.org/wiki/Serie_temporal)

### 2.6.3 Principales funciones utilizadas en el análisis de series temporales

Aunque en un inicio, cada función y modelo posee una particularidad en especial que hace que se diferencien entre sí, en el estudio y análisis de series temporales todas se basan en un solo principio general, ajustar el conjunto de datos lo mejor posible de forma que su error medio cuadrático sea mínimo.

La tabla 2.2 presenta las funciones matemáticas más utilizadas en el ajuste de datos, siendo la función lineal de primer orden o también denominada regresión lineal, la base fundamental de los actuales modelos de velocidades, y por ende del estudio de las variaciones, ya que su ecuación guarda una estrecha relación con la magnitud física de velocidad, denotada por:

$$X_f = V\Delta t + X_0 \quad (2.40)$$

Donde:

$X_f, X_0$	Coordenadas del punto en dos épocas diferentes
$V$	Velocidad del punto
$\Delta t$	Intervalo de tiempo

**Tabla 2.2 Principales funciones utilizadas en el análisis de series temporales**

ORD	FUNCIÓN/ MODELO	APLICACIÓN
1	Lineal	$f(x) = ax + b$
2	Polinomial	$f(x) = ax^n + bx^{n-1} + \dots + cx + d$
3	Exponencial	$f(x) = k \cdot a^x$
4	Logarítmica	$f(x) = \log_a x$
5	Gaussiana	$f(x) = ae^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}}$
8	Serie de Fourier	$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ a_n \cos \frac{2n\pi}{T}x + b_n \sin \frac{2n\pi}{T}x \right]$

## 2.7 SERIES DE FOURIER

### 2.7.1 Generalidades

Una de las funciones matemáticas que en los últimos tiempos ha sido utilizada e implementada en el análisis de series temporales y por ende en el análisis de datos, obteniendo en la mayor parte de ellos resultados altamente favorables, son las denominadas Series de Fourier. La principal fortaleza de éstas en comparación con otras funciones o modelos de ajuste, se basa en la capacidad que estas tienen de seguir la tendencia de los datos, simplemente con la inclusión de  $n$  funciones periódicas seno y coseno, las cuales, al ser sumadas entre sí, dan como resultado la generación de una nueva función.

Entre algunos de los proyectos más relevantes desarrollados en los últimos tiempos, referente al uso de las series de Fourier en el análisis de datos se encuentran: el estudio desarrollado por Muhammad, T. en 1991, titulado “A simple algorithm for fitting measured data to Fourier series models”<sup>35</sup>, el estudio de Jackson, K. en 1979, titulado “Fitting of Mathematical Functions to Biomechanical Data”<sup>36</sup> y el estudio de Bolder, D. J. & Gusba, S. en 2002, titulado “Exponentials, Polynomials, and Fourier Series: More Yield Curve Modelling at the Bank of Canada”<sup>37</sup>.

### 2.7.2 Importancia de las Series para el proyecto

Partiendo de lo expresado anteriormente, se dice que la principal razón para la implementación de las Series de Fourier en el análisis de las variaciones posicionales de la estación GNSS RIOP, radica en que, si para la totalidad de los datos de la estación, la serie es capaz de asimilar sus movimientos a lo largo del tiempo, esta será capaz de interpretar el movimiento de  $n$  puntos sobre la superficie terrestre sin que su desarrollo vaya más allá de los conceptos básicos aplicados en el álgebra general, con lo cual, no solo se genera una metodología útil para el estudio de las variaciones lineales de los puntos, sino que a su vez se convierte en un primer acercamiento en el análisis de las variaciones no lineales, las cuales a partir de modelos básicos como la regresión lineal no pueden ser asimiladas.

---

<sup>35</sup> Muhammad, T. 1991. “A simple algorithm for fitting measured data to Fourier series models”. International Journal of Mathematical Education in Science and Technology. Volume 24, Issue 1, 1993

<sup>36</sup> Jackson, K. 1979. “Fitting of Mathematical Functions to Biomechanical Data”. IEEE Transactions on Biomedical Engineering. Volume BME-26. Pág. 122 – 124.

<sup>37</sup> Bolder, D. J. & Gusba, S. 2002. “Exponentials, Polynomials, and Fourier Series: More Yield Curve Modelling at the Bank of Canada”. Bank of Canada Working Paper No. 2002-29



## CAPÍTULO III

### PROCESAMIENTO DE DATOS GNSS

#### 3.1 INTRODUCCIÓN

En las siguientes páginas, se presenta los aspectos más relevantes del ajuste y la materialización de coordenadas, correspondientes a la estación de monitoreo continuo RIOP, para el periodo comprendido entre los días 1 de enero del 2010 y 31 de diciembre del 2011, completando un total de 730 soluciones diarias y 106 soluciones semanales, cada una de las cuales ha sido definida bajo el marco de referencia internacional IGS08.

El software elegido para el cumplimiento de dicho propósito, fue el software científico GAMIT-GLOBK, versión 10.4., desarrollado por el Instituto Tecnológico de Massachusetts, en colaboración con el Instituto Scripps de Oceanografía y el Centro Harvard-Smithsonian para la Astrofísica, y concebido como parte de un conjunto de programas destinados a la generación de coordenadas y velocidades de alta precisión, los cuales posteriormente podrán ser utilizados en el análisis, estudio y modelación de los diversos fenómenos terrestres, atmosféricos y climatológicos propios del planeta Tierra.<sup>38</sup>

Para una mayor comprensión de los parámetros, modelos y estándares utilizados a lo largo del procesamiento, se recomienda hacer uso de los manuales oficiales del programa (<http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/>), así como, del instructivo básico de procesamiento desarrollado por Herring, T., King, R & McClusky, S. en 2010.

Finalmente, es necesario puntualizar, que todos los archivos de configuración y resultados presentados de aquí en adelante, se referirán exclusivamente a la semana GPS 1668, equivalente a la última semana del año 2011, días 359, 360, 361, 362, 363, 364 y 365.

---

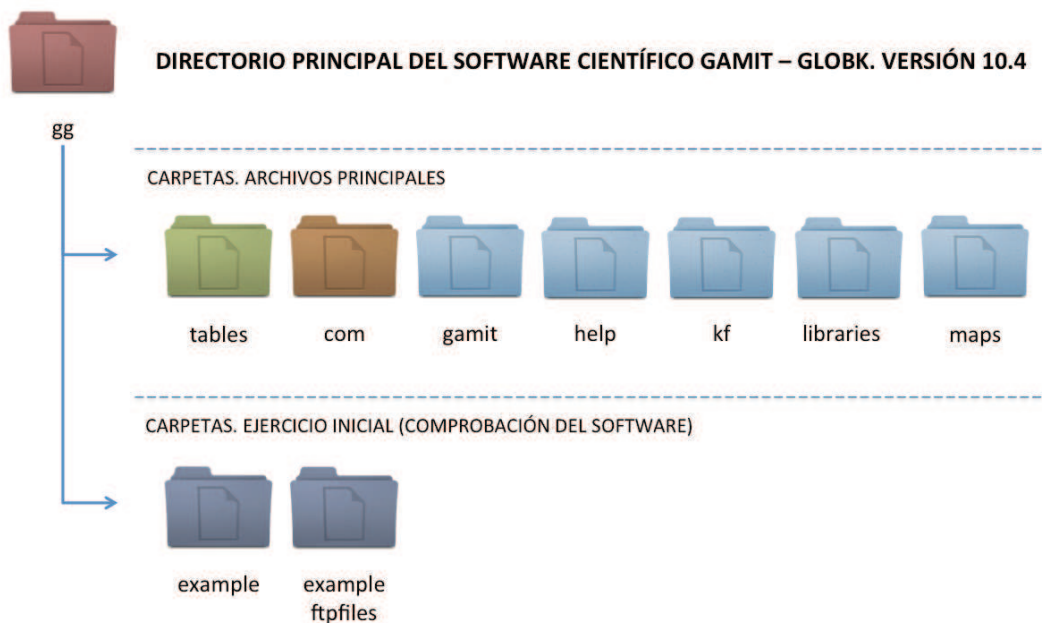
<sup>38</sup> Herring, T. & King, R. 2012. GAMIT-GLOBK Homepage. Vínculo web: <http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/>



## 3.2 SOFTWARE CIENTÍFICO GAMIT-GLOBK. VERSIÓN 10.4

### 3.2.1 Estructura física y lógica

El software científico GAMIT-GLOBK, está constituido básicamente por módulos, librerías y subprogramas, diseñados a través de los lenguajes de programación FORTRAN y C-SHELL, compilados bajo el entorno UNIX (Para información sobre el proceso de instalación, ver Anexo A) y clasificados en carpetas individuales acorde a las funciones que cada uno desempeña. (Ver Figura 3.1)



**Figura 3.1** Directorio de Instalación del Software GAMIT-GLOBK

Su funcionamiento y control se caracteriza por la implementación de los denominados c-shell scripts (carpeta “com”) o módulos automáticos, los cuales luego de interpretar la información definida en las diferentes tablas y modelos de corrección (carpeta “tables”), invocan a cada una de las librerías (carpetas “gamit”, “kf” y “libraries”) del programa con el objetivo de llevar a cabo las diferentes etapas del procesamiento sin mayor intervención del usuario que la necesaria para la configuración de los diferentes parámetros y variables del proceso.

Los c-shell scripts más representativos del programa, son los módulos automáticos “sh\_gamit” y “sh\_glred”, los cuales constituyen la base fundamental de todo el procesamiento de soluciones.

### 3.2.2 Módulos principales. sh\_gamit y sh\_glred

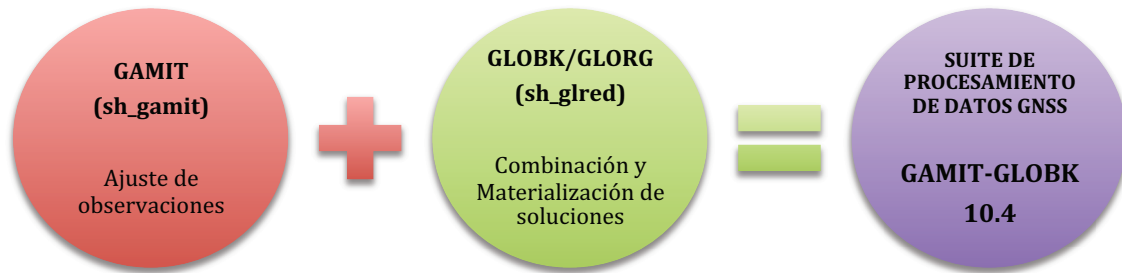


Figura 3.2 Estructura básica de funcionamiento del software GAMIT-GLOBK

En general y como se estableció en el literal anterior, todo el funcionamiento del programa se resume al uso de los módulos “sh\_gamit” y “sh\_glred”. (Ver Figura 3.2)

De esta manera, el primer módulo es el encargado de analizar, procesar y ajustar las observaciones procedentes de las diferentes mediciones de fase y código contenidas en los archivos RINEX de cada estación y/o receptor, y a su vez, de resolver y determinar cada uno de los parámetros incluidos en la ecuación fundamental de procesamiento (Ver ecuación 2.16 y 2.17). El resultado final de este proceso, será la obtención de la matriz varianza-covarianza de parámetros incluida en el archivo de soluciones semilibre “h-file” (archivo resultante del módulo “sh\_gamit”) y definido como el archivo principal de entrada del módulo “sh\_glred”.

Por su parte, el segundo módulo es el encargado de combinar las diferentes soluciones posicionales, obtenidas a través de técnicas como son: GPS, VLBI y SLR, a fin de determinar los parámetros de transformación correspondientes entre las soluciones procesadas y las soluciones que definen los diferentes marcos de referencia internacionales. Es importante recalcar que debido a la alta compatibilidad que posee el software con otras técnicas, el módulo “sh\_glred”, es capaz de interpretar información posicional procedente de otras suites informáticas, como es el caso del paquete Bernese GPS o el software GIPSY-OASIS, siempre y cuando dicha información se encuentre contenida en un archivo de soluciones estándar SINEX.

Un resumen más apropiado de cada una de las etapas ejecutadas por el software, así como, de los diferentes archivos y resultados obtenidos a lo largo del proceso, puede ser visto en las siguientes páginas, a través de la figura 3.3 y la tabla 3.1 respectivamente.

3.2.3 Funcionamiento. Proceso interno



Figura 3.3 Proceso interno del software GAMIT – GLOBK. Versión 10.4

### 3.2.4 Principales archivos generados por el programa

Tabla 3.1 Principales archivos generados por GAMIT-GLOBK

NOMBRE	DESCRIPCIÓN
A-file	Archivo ASCII de efemérides tabulares
B-file	Archivo de control (Batch mode)
C-file	Archivo de derivadas parciales
D-file	Archivo de sesiones
E-file	Archivo de efemérides broadcast
G-file	Archivo de parámetros iniciales. Orbitales satelitales
H-file	Archivo de resultados. Matriz de varianza-covarianza
I-file	Archivo de parámetros iniciales. Correcciones reloj - receptor
J-file	Archivo de parámetros iniciales. Correcciones reloj – satélite
K-file	Archivo de parámetros calculados. Offset del reloj - receptor
L-file	Archivo de coordenadas. Estaciones procesadas
M-file	Archivo de control. Edición y análisis de datos y parámetros
N-file	Archivo de pesos definidos para el ajuste de observaciones
O-file	Archivo de resumen. Análisis post-procesamiento
P-file	Archivo de resumen. Residuales
Q-file	Archivo de resumen. Líneas base y cálculo de variables
S-file	Archivo de control. Establecimiento de observables y errores
T-file	Archivo de efemérides tabulares
U-file	Archivo de modelos de carga y modelos meteorológicos
V-file	Archivo de resumen. Análisis de RMS
W-file	Archivo de observaciones. Información meteorológica
X-file	Archivo de observaciones. Información de fase y código
Y-file	Archivo de parámetros iniciales. Orientación del satélite
Z-file	Archivo de resultados. Información meteorológica
h-file	Archivo ASCII de soluciones (Bias Free & Bias Fixed)
H-file	Archivo ASCII de soluciones combinadas
*.gdl file	Archivo de lista. Soluciones + pesos
*.org file	Archivo de resumen. Parámetros de ajuste y Coordenadas

### 3.2.5 Módulos auxiliares

Pese a que los módulos principales son capaces de realizar la mayor parte de las actividades que conlleva el análisis, ajuste y materialización de soluciones, el programa también cuenta con un sinnúmero de subrutinas y utilidades de gran ayuda para el usuario.

Entre las principales funciones que se pueden obtener con su uso se encuentran: la descarga de datos oficiales provenientes de la Red Mundial IGS, la actualización de información correspondiente a cada equipo GNSS, la creación de gráficas y mapas de coordenadas y/o velocidades, y la generación de reportes estadísticos para la evaluación de soluciones.

En la tabla 3.2, se presenta una descripción general sobre los principales módulos utilizados en el presente estudio, sin embargo, y para mayor información respecto a cada una de sus características y funciones, se sugiere hacer uso de los dos manuales oficiales del programa, secciones “Utility Programs and Auxiliary Tables”<sup>39</sup> y “Auxilliary Programs”<sup>40</sup> respectivamente.

**Tabla 3.2 Módulos auxiliares más utilizados por GAMIT-GLOBK**

<b>NOMBRE</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
sh_setup	Creación de la campaña a procesar. Copia de tablas y modelos
sh_get_rinex	Obtención de ficheros RINEX de observación. (Estaciones IGS)
sh_get_nav	Obtención de ficheros RINEX de navegación. (BROADCAST)
sh_get_met	Obtención de ficheros RINEX meteorológicos. (Estaciones IGS)
sh_get_orbits	Obtención de efemérides precisas finales. (SP3)
sh_get_ion	Obtención de modelos ionosféricos. (CODE)
sh_upd_stnfo	Actualización del fichero de estaciones.

Fuente: Herring, T. 2012.

<sup>39</sup> Herring, T., King, R & McClusky, S. 2010. “GAMIT. Reference Manual – GPS Anaylisis at MIT”. Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences. Massachusetts Institute of Technology. Págs. 144 – 170.

<sup>40</sup> Herring, T., King, R & McClusky, S. 2010. “GLOBK. Reference Manual – Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program”. Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences. Massachusetts Institute of Technology. Págs. 75 – 90.

### 3.2.6 Archivos de control. Configuración

Para finalizar, un aspecto importante en el uso del software, es aquel relacionado con la correcta configuración de sus archivos de control, los cuales, posteriormente a su definición, serán empleados por el cada uno de los módulos de procesamiento, para la identificación, definición y establecimiento de carpetas, módulos y modelos de corrección a ser utilizados en el ajuste y la materialización de soluciones.

En la tabla 3.3 se muestra una breve descripción de cada uno de estos archivos, en conjunto con sus principales características. Para información respecto a la configuración utilizada en el presente estudio, se recomienda revisar el Anexo B ubicado al final del documento.

**Tabla 3.3 Archivos de configuración del software científico GAMIT-GLOBK**

<b>NOMBRE</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
process.defaults	Configuración del entorno computacional. Variables, recursos, carpetas, archivos iniciales, tiempos de rastreo, intervalos de mediciones, entre otros.
sites.defaults	Determinación de estaciones a ser usadas en el procesamiento y ajuste de soluciones.  También permite especificar aquellas estaciones de las cuales se desea obtener automáticamente sus archivos de observación RINEX y aquellas a ser utilizadas en la definición del marco de referencia. (módulo sh_gfred)
station.info	Contiene toda la información referente a las estaciones (receptores y antenas) utilizadas. Altura, tipo, códigos, nombres, versiones, entre otros.

Fuente: Herring, T., King, R & McClusky, S. 2010

Tabla 3.3 Archivos de configuración del software científico GAMIT-GLOBK (continuación)

NOMBRE	DESCRIPCIÓN
apr-file (SIRGAS_IGS08.apr) (IGS08.apr)	Archivo de coordenadas a priori permanente. Contiene las coordenadas y velocidades de las estaciones utilizadas en el procesamiento y ajuste de soluciones, definidas por cada componente.
l-file	Archivo de coordenadas a priori. Contiene las coordenadas de las estaciones utilizadas en el procesamiento y ajuste de observaciones. (El archivo cambia en función del número de iteraciones llevadas a cabo por el módulo sh_gamit)
sestbl.	Configuración de archivos de control, parámetros y modelos de corrección utilizados en el ajuste de observaciones, a través del módulo sh_gamit.
sittbl.	Determinación de valores y pesos iniciales (constraints) definidos para cada estación.
globk_comb.cmd	Configuración de parámetros y variables para la combinación y el ajuste de soluciones. Determinación de pesos, archivos iniciales y pruebas estadísticas (chi cuadrado) para la detección y eliminación de outliers.
glorg_comb.cmd	Determinación de estaciones y número de parámetros (traslaciones, rotaciones y escalamiento) utilizados para la materialización de coordenadas.

### 3.3 PROCESAMIENTO DE DATOS GNSS

#### 3.3.1 Selección de puntos a procesar

Para el estudio, se ha establecido procesar un total de 21 estaciones de monitoreo continuo, pertenecientes a la Red Mundial IGS. De estas, solo una corresponde a la estación de observación (RIOP) y las otras 20, se establecen como puntos fiduciales a ser utilizados en la materialización de coordenadas.

En la tabla 3.4, se presenta un resumen de cada una de ellas, clasificadas en relación a su abreviatura, nombre real y localización.

**Tabla 3.4 Estaciones GNSS utilizadas en el estudio**

<b>ORD</b>	<b>SIGLAS</b>	<b>NOMBRE</b>	<b>PAIS</b>
1	ANT	Antuco	Chile
2	BOGT	Bogotá	Colombia
3	BRAZ	Brasilia	Brasil
4	BRFT	Fortaleza	Brasil
5	BRMU	Bermuda	Reino unido
6	CONZ	Concepción	Chile
7	CRO1	St. Croix	Estados unidos
8	GOLD	Goldstone	Estados unidos
9	ISPA	Isla de pascua	Chile
10	LPGS	La plata	Argentina
11	MANA	Managua	Nicaragua
12	MDO1	Mc Donald	Estados unidos
13	OHI2	O' higgins	Antártida
14	PALM	Palmer	Antártida
15	PARC	Punta arenas	Chile
16	PIE1	Pietown	Estados unidos
17	RIOP	Riobamba	Ecuador
18	SANT	Santiago de chile	Chile
19	SCUB	Santiago de cuba	Cuba
20	UNSA	Salta	Argentina
21	VESL	Vesleskarvet	Antártida



### 3.3.2 Flujograma de procesamiento

Para una mejor comprensión del procedimiento establecido en el ajuste y la materialización de soluciones, a continuación se presenta las diferentes etapas que lo conforman, a partir del uso de diagramas de flujo. (Ver Figura 3.4)

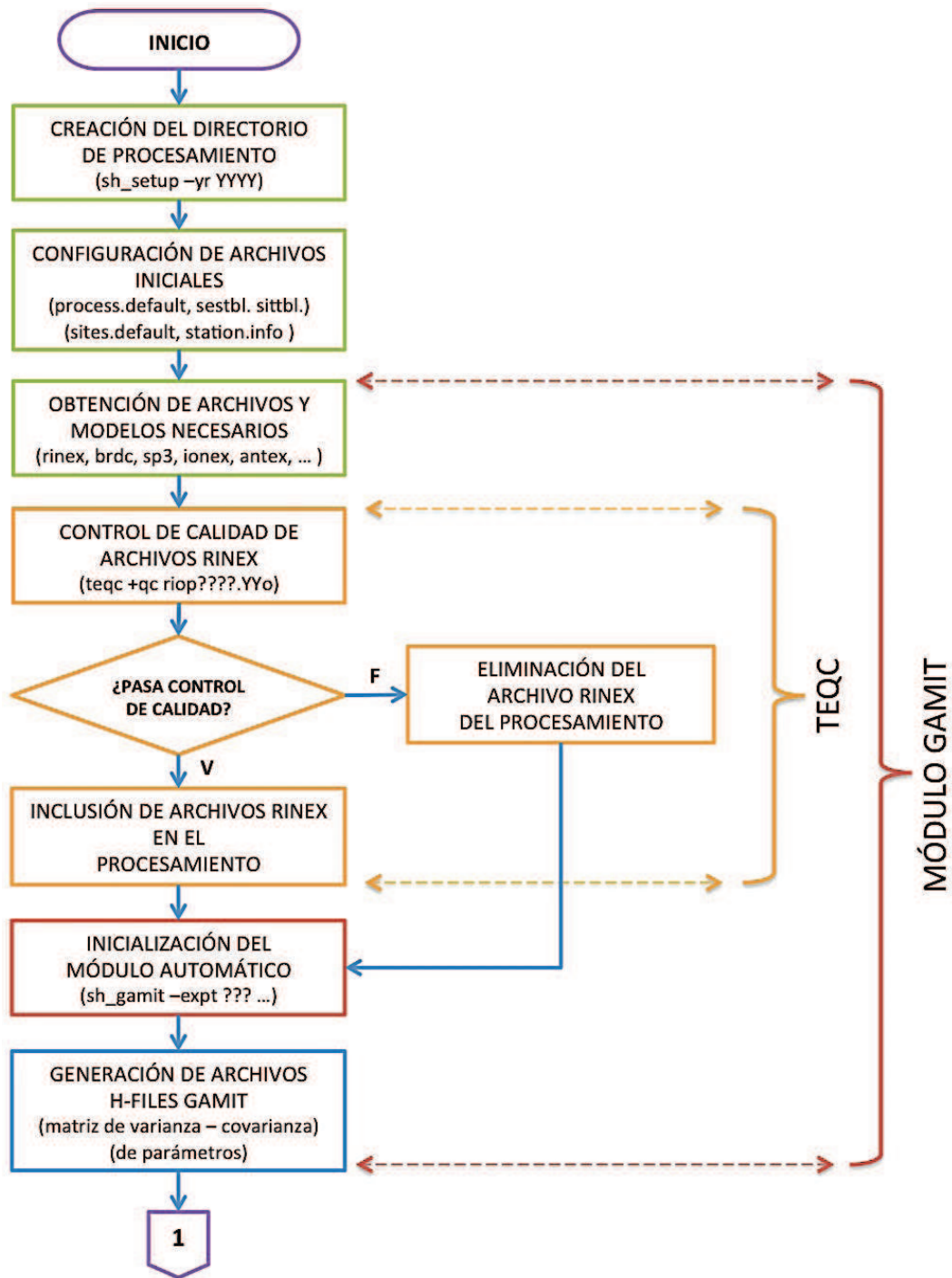


Figura 3.4 Flujograma de procesamiento de datos GNSS

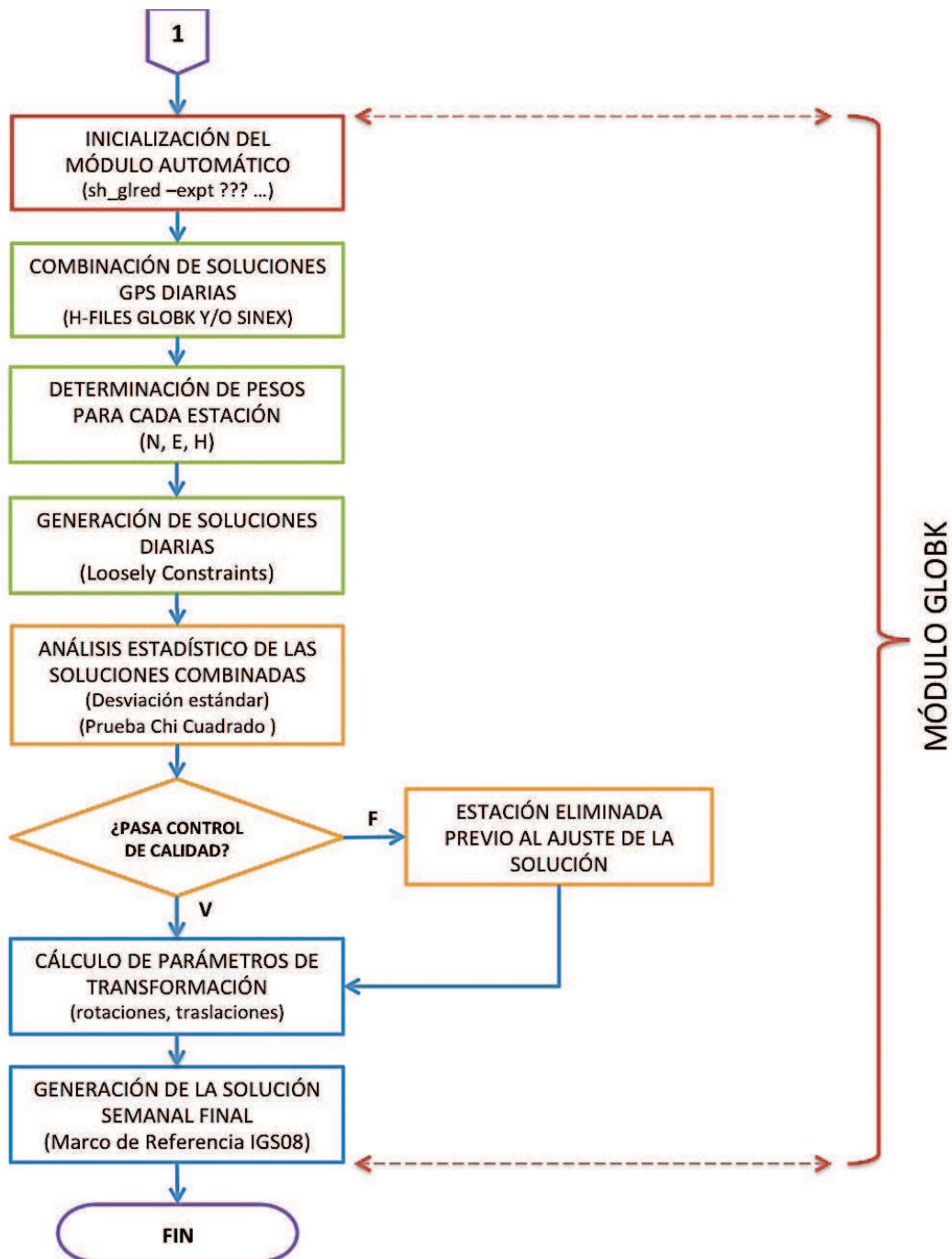


Figura 3.4 Flujograma de procesamiento de datos GNSS (continuación)

En lo referente al control de calidad de los archivos RINEX de observación, cabe recalcar que éste estudio, se sustenta totalitariamente en la investigación desarrollada por Viteri, A. & Tierra, A. a finales del 2011, titulada “Control de calidad de archivos RINEX con TEQC”; por lo cual, y para una mejor comprensión del procedimiento utilizado, se recomienda hacer uso de dicho documento. Información adicional respecto al presente flujograma, puede ser obtenida a través de la guía básica de procesamiento, Anexo C, al final del documento.

### 3.3.3 Control de Calidad de Archivos de Observación. Análisis de Resultados

Como se dijo anteriormente, el control de calidad de todos los archivos de observación de la estación GNSS RIOP, se sustenta básicamente en la implementación de la utilidad denominada TEQC (Translation, Editing & Quality Check Toolkit).

Esta utilidad en principio, permite determinar la consistencia del posicionamiento y por ende de cada una de las observaciones, a través del cálculo de un sinnúmero de parámetros propios del proceso. Entre los principales y quizás los más analizados para determinar la validez de los archivos se encuentran: los valores de multipath para cada una de las portadoras (Moving average MP1 y MP2), el número de saltos de ciclo para ángulos de elevación mayores y menores a los 10° (IOD slips & IOD or MP slips) y finalmente el número de épocas ideales y obtenidas (#expt & #have), las cuales permitirán determinar el porcentaje medio de recepción de las observaciones.<sup>41</sup> (Ver Figura 3.5)

```

Moving average MP1      : 0.356261 m
Moving average MP2      : 0.273215 m
Points in MP moving avg : 50
Mean S1 S2              : 45.50 (sd=3.89 n=26900) 30.91 (sd=6.86 n=26884)
No. of Rx clock offsets : 0
Total Rx clock drift    : 0.000000 ms
Rate of Rx clock drift  : 0.000 ms/hr
Avg time between resets : Inf minute(s)
Freq no. and timecode   : 2 11676 fffffff
Report gap > than       : 10.00 minute(s)
epochs w/ msec clk slip : 0
other msec mp events    : 1 (: 4) {expect ~ = 1:50}
IOD signifying a slip   : >400.0 cm/minute
IOD slips < 10.0 deg*  : 1
IOD slips > 10.0 deg   : 1
IOD or MP slips < 10.0* : 1
IOD or MP slips > 10.0 : 1
* or unknown elevation
  first epoch  last epoch  hrs  dt  #expt  #have  %   mp1  mp2  o/slps
SUM 11 12 25 00:00 11 12 25 23:59 24.00 30 26917 26883 100 0.36 0.27 26883

```

Figura 3.5 Extracto del archivo de resumen RIOP3590.11S

Analizando nuestro ejemplo, podemos observar como, pese a que los promedios de multipath se encuentran cercanos a la media, el número de saltos de ciclo es mínimo, con lo cual, el número de observaciones obtenidas difiere de las ideales en un 0,12%, representando un porcentaje mínimo de pérdida y por ende la alta calidad del archivo de observación. En caso de que el número de observaciones obtenidas difiera de las ideales en un porcentaje mayor al 25% el archivo de observaciones deberá ser eliminado del procesamiento. (Para información respecto a los resultados obtenidos para el presente estudio, ver Anexos D y E)

<sup>41</sup> Viteri, A. & Tierra, A. 2011. "Control de calidad de archivos RINEX con TEQC". Revista Digital del VII Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE 2012. Sangolquí – Ecuador.

### 3.3.4 Establecimiento de parámetros de procesamiento y modelos de corrección

La tabla 3.5, describe brevemente, los principales parámetros de procesamiento y modelos de corrección utilizados en el análisis y ajuste de observaciones. Mayor información de cada uno de ellos, puede ser obtenida a través del Anexo B. Secciones: “Archivo sestbl.” y “Archivo sittbl.” respectivamente.

**Tabla 3.5 Principales parámetros de procesamiento y modelos de corrección**

PARÁMETRO	VALOR	DESCRIPCIÓN
<b>A. Control de Análisis</b>		
Tipo de Análisis	1-ITER	Obtención de una solución preliminar y una solución final.
Tipo de Observable	LC_AUTCLN	Uso de la combinación L3 para la determinación de ambigüedades.
Tipo de Experimento	BASELINE	No incluye determinación de parámetros orbitales.
<b>B. Ponderación de Pesos</b>		
Error de la Estación	ELEVATION 10.5.	Pesos de las observaciones en función del ángulo de elevación.
<b>C. Resolución de Ambigüedades</b>		
Restricción ionosférica	0.0 m + 8.00 ppm	Restricción aplicada a la variable ionosférica en la resolución de ambigüedades WL ( $L_2 - L_1$ ).
Ambigüedades NL	0.15 .015 1000. 99. 15000.	Parámetros. Función de decisión, máximo valor de error ( $x^2$ ), máxima distancia línea base
Ambigüedades WL	NINGUNO	Parámetros ignorados si el tipo de observable es LC_AUTCLN

Tabla 3.5 Principales parámetros de procesamiento y modelos de corrección (continuación)

PARÁMETRO	VALOR	DESCRIPCIÓN
<b>D. Parámetros Atmosféricos</b>		
Retraso cenital	YES	Estimación de parámetros de retraso cenital (zenith delay).
N. retrasos cenitales	13	Número de retrasos cenitales calculados por día.
Intervalo de retrasos	2 horas	Intervalo en horas para la determinación del retraso cenital.
Modelo cenital	PWL	Determinación del modelo de retraso cenital: Piecewise linear.
Restricción. retraso cenital	0.50 m	Precisión a priori inicial para la determinación de los retardos cenitales.
Variación cenital	0.02 100.	Valores de correlación para la variación cenital (Gauss-Markov)
Gradientes atmosféricos	YES	Estimación de gradientes atmosféricos. (N-S y E-W)
N. gradientes estimados	2	Número de gradientes calculados por día.
Restricción. gradiente	0.01	Precisión a priori inicial para la determinación de gradientes.
Modelo meteorológico	RNX GPT 50	Determinación del archivo y/o modelo meteorológico.
Modelo ionosférico	GMAP	Corrección ionosférica a través del modelo CODE.
Función de mapeo	NMF	Cálculo de los valores de mapeo troposférico húmedo y seco a través del modelo de Niell.
Archivo meteorológico de salida	YES	Obtención de valores de vapor de agua

Tabla 3.5 Principales parámetros de procesamiento y modelos de corrección (continuación)

PARÁMETRO	VALOR	DESCRIPCIÓN
<b>E. Parámetros Orbitales</b>		
Marco inercial	J2000	Época de referencia para la transformación de marcos.
Modelo de radiación solar	BERNE	Determinación del modelo de radiación solar (9 coeficientes)
Sistema gravitacional	EGM08	Definición del modelo dinámico gravitacional para la integración inicial de órbitas. (Constantes)
<b>F. Modelos de Corrección</b>		
Antenas del receptor	AZEL	Corrección de la variación del centro de fase en función del ángulo de elevación y el azimut.
Antenas de los satélites	ELEV	Corrección de la variación del centro de fase en función del ángulo de elevación.
Cargamento atmosférico	ATMDISP_CM	Corrección de la variación posicional debido al cargamento por presión atmosférica.
Cargamento oceánico	FES2004	Corrección de la variación posicional debido al cargamento oceánico.
<b>G. Parámetros Auxiliares</b>		
Ángulo de elevación	3°	Definición de la máscara de elevación utilizada en el posicionamiento.
Pesos iniciales (constraint) por estación	5 cm	Peso estándar para puntos de 1er orden.

Fuente: Herring, T., King, R &amp; McClusky, S. 2010

### 3.3.5 Ajuste de observaciones. Inicialización del módulo sh\_gamit

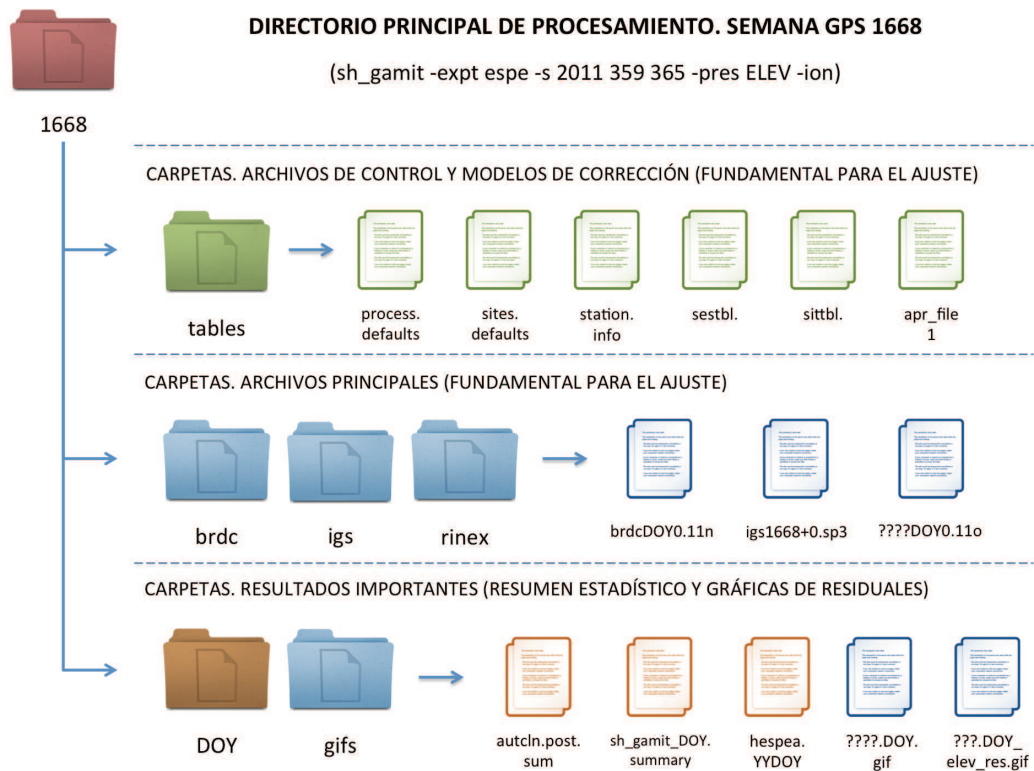


Figura 3.6 Ejemplo gráfico del funcionamiento general del módulo sh\_gamit

Por lo general, y como se dijo en un principio, el ajuste de observaciones (primer proceso del Flujograma), es llevado a cabo a través del módulo “sh\_gamit”, el cual, una vez obtenidos todos los archivos necesarios para su funcionamiento (Ver Figura 3.6) y sobretodo, configurados los diferentes archivos de control (carpeta “tables”) acorde a las necesidades del usuario, puede ser inicializado a través del script:

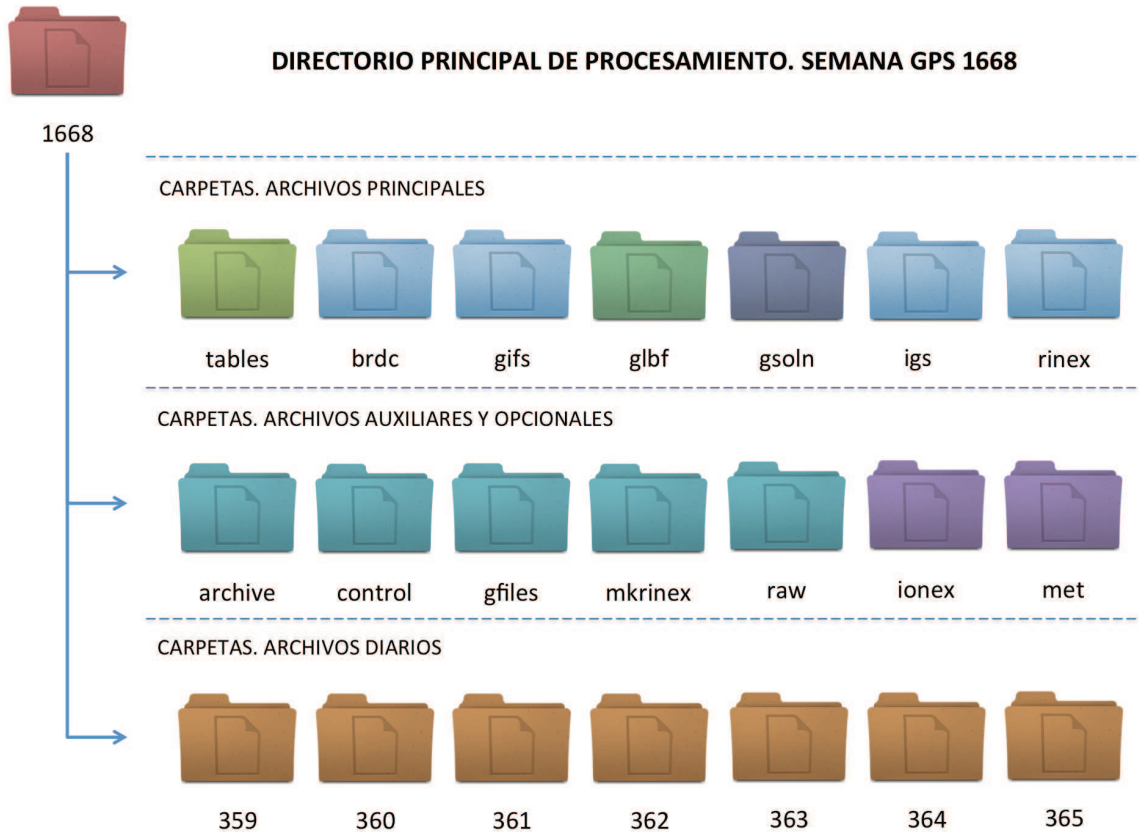
```
sh_gamit -expt XXXX -s YYY DOY1 DOY2 -pres ELEV -ion
```

donde:

XXXX	Nombre del proyecto.
YYY	Año calendario de la observación.
DOY1 y DOY2	Primer y último día de observación.
ELEV	Instrucción para la creación de gráfica de residuales.



El resultado final de su ejecución será, la obtención de los diferentes archivos de resultados (ver Tabla 3.1), gráficas de residuales (carpeta “gifs”) y resúmenes estadísticos (carpeta “DOY”) generados por cada día procesado. (Ver Figura 3.7)



**Figura 3.7 Principales carpetas creadas por el módulo sh\_gamit**

El estudio detenido de cada uno de los archivos, será trascendental al momento de decidir que solución es apta o no para la materialización de coordenadas. En caso de que uno no posea los requerimientos necesarios para su inclusión, ésta deberá ser excluida de la campaña previo a la inicialización del módulo “sh\_glred” (uso de los archivos de control “globk\_comb.cmd” y “glorg\_comb.cmd”)

Para terminar, en los siguientes dos literales, se presenta un breve análisis de las diversas características de los archivos de resumen (sh\_gamit\_365.summary) y de residuales (RIOP.365\_elev\_res.gif y RIOP.365.gif) a ser tomados en cuenta al momento de su estudio. Para mayor información respecto a su uso, se recomienda revisar el manual diseñado por Herring, T. en 2012, titulado “Montserrat GAMIT/GLOBK/Track Workshop”.



### 3.3.6 Análisis de resultados. Resumen estadístico

Para evaluar la consistencia del procesamiento, la forma más fácil, es a partir del uso del archivo de resumen “sh\_gamit\_DOY.summary” (Ver Figura 3.8), el cual es creado por el módulo “sh\_gamit” para cada día de procesamiento y en cuyo contenido se encuentra información referente a:

1. El número de archivos de observación utilizados en el proceso.
2. Sitios excluidos del procesamiento.
3. Error medio cuadrático del ajuste total y por satélite.
4. Error medio cuadrático del ajuste por estación y por satélite. (2 mejores/2 peores)
5. Error medio cuadrático de dobles diferencias. (Pre y post-ajuste)
6. Número total de ambigüedades de fase calculadas.
7. Porcentaje final de ambigüedades WL y NL resueltas.

```

Input options -expt espe -s 2011 359 365 -ion -pres ELEV

Processing 2011 365 GPS week 1668 6 Using node: ChristianPilapanta.local Started at: 12_07_03_22:54:47

Processing directory: /Users/christianpilapanta/Procesamiento/2011/1668/365
Disk Usage: 236006 Free 635168 Mbyte. Used 28%

Number of stations used 21 Total xfiles 21
Sites excluded by xsite command

Postfit RMS rms, total and by satellite
RMS IT Site All 01 02 03 04 05 06 07 08 09 10 11 12 13 14 15 16 17
RMS 18 ALL 9.1 86 94 80 107 106 83 90 93 88 84 80 96 85 96 98 91 91
Best and Worst two sites:
RMS 18 PALM 5.9 5 6 5 5 6 6 6 7 5 6 6 6 5 6 6 6 6
RMS 18 ANTC 6.5 6 6 5 7 9 7 8 6 6 6 6 6 5 6 6 6 6
RMS 18 PARC 12.0 17 11 12 10 14 16 14 10 10 11 11 9 11 13 12 12 11
RMS 18 UNSA 13.0 11 17 11 17 17 10 9 15 14 14 11 11 11 19 13 10 18

Double difference statistics
Prefit nrms: 0.15535E+01 Postfit nrms: 0.17757E+00
Prefit nrms: 0.15494E+01 Postfit nrms: 0.18324E+00
Prefit nrms: 0.15535E+01 Postfit nrms: 0.17490E+00
Prefit nrms: 0.15494E+01 Postfit nrms: 0.18071E+00
Number of double differences: 99311

Phase ambiguities (Total WL-fixed NL-fixed): 625 573 531 AUTCLN (Total Expected) 625 625
Phase ambiguities WL fixed 91.7% NL fixed 85.0%

```

Figura 3.8 Extracto del archivo de resumen sh\_gamit\_365.summary

El archivo en ciertos casos, y dependiendo de la calidad del ajuste, también posee información relevante respecto a las coordenadas utilizadas en la actualización del archivo L-File (precisión mejor a los 30 cm) y a la generación de errores presentes proceso, relacionados principalmente con el uso de pesos (constraints).

Las reglas establecidas en este estudio para la inclusión o exclusión de las soluciones semilibres, se basan en principio, en las recomendaciones realizadas por los autores del programa, a través de su instructivo básico de procesamiento, titulado “Introduction to GAMIT/GLOBK”.

Entre los principales aspectos a ser evaluados se tiene:

1. El número de estaciones procesadas, siempre deberá ser igual al número de estaciones iniciales. (21 estaciones)
2. El RMS total para el ajuste y/o por estación deberá estar entre 7 y 9 milímetros para ser calificado como “bueno”.
3. El RMS total para el ajuste y/o por estación deberá estar entre 10 y 15 milímetros para ser calificado como “aceptable”.
4. El RMS total para el ajuste y/o por estación deberá ser mayor a 15 milímetros para ser calificado como “malo”.
5. Dobles Diferencias con RMS (Posfit nrms) menores a 10 veces su valor inicial (Prefit nrms) son considerados “buenos”; cualquier otro valor superior a esta relación se considera “malo”.
6. El porcentaje de ambigüedades resultas debe estar sobre la media (50%) para ser consideradas “buenas”, caso contrario se considera “malas”.

Si en el archivo de resumen, los valores de RMS asignados a las peores estaciones se encuentran sobre los 15 milímetros, se deberá recurrir al archivo “autcln.post.sum” (Ver Anexo B), en el cual se deberá localizar la sección de estadísticas de RMS (One-Way Postfit Residual Statistics) y contabilizar el número de estaciones que posean valores superiores a los 15 milímetros.

En caso de que el error total del ajuste o más del 50% de las estaciones posean un RMS calificado como “malo” (particularmente la estación RIOP), la solución deberá ser reprocesada (posterior a la identificación de la fuente de error, a través del análisis de residuales y archivos de resultados) o a su vez eliminada del procesamiento. El siguiente paso será, el análisis de residuales por estación.

### 3.3.7 Análisis de residuales. Gráficas de Residuales

A diferencia del proceso anterior, en el cual se evaluaba la solidez de la solución semilibre, el análisis de residuales (Ver Figura 3.9), se centra en entender, las posibles causas por las cuales una u otra estación no puede ser considerada como buena o aceptable para su posterior uso en la materialización de coordenadas.

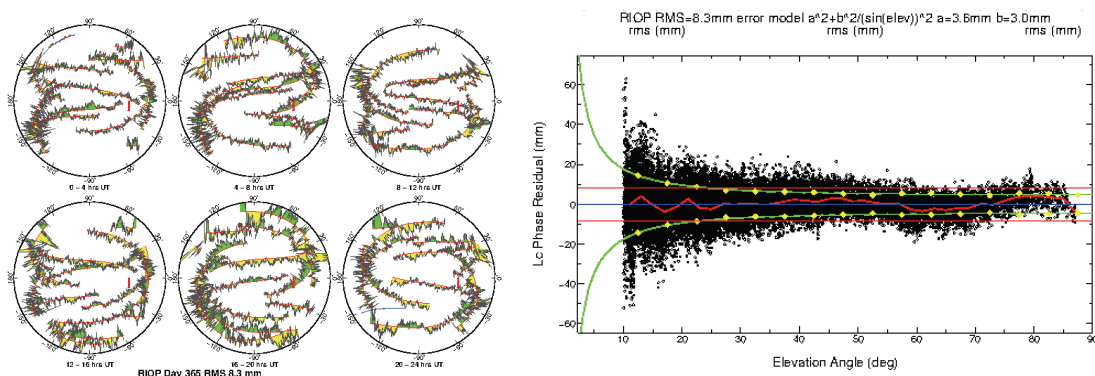


Figura 3.9 Extracto de las gráficas de residuales RIOP.365.gif y RIOP.365\_elev\_res.gif

En muchos casos, este proceso también resulta útil, cuando se desea obtener una idea inicial sobre el porcentaje de vapor de agua presente al momento de la medición o simplemente para determinar la solidez del punto (monumentación). Sea cual sea el caso, se dice que una estación es o no apta para su posterior materialización, si sus gráficas de residuales cumplen con los siguientes términos:

1. Altos residuales en el mismo lugar (ángulo de elevación) y a diferentes tiempos, indican la presencia de fuentes de interferencia (multipath) al momento de la observación.
2. Altos residuales en diferentes lugares (ángulo de elevación) y a diferentes tiempos, sugieren la presencia de vapor de agua.
3. La generación de un patrón normal de residuales (dispersión sigue los límites de color verde) sugiere la consistencia de la estación (buena monumentación).
4. La generación de un patrón tendencial de residuales (la dispersión tiende a inclinarse hacia un lado en particular) indica la presencia de diversas fuentes de error al momento de la observación. (mala monumentación, vapor de agua, mala modelación del centro de fase, entre otros)

### 3.3.8 Materialización de soluciones. Inicialización del módulo sh\_glred

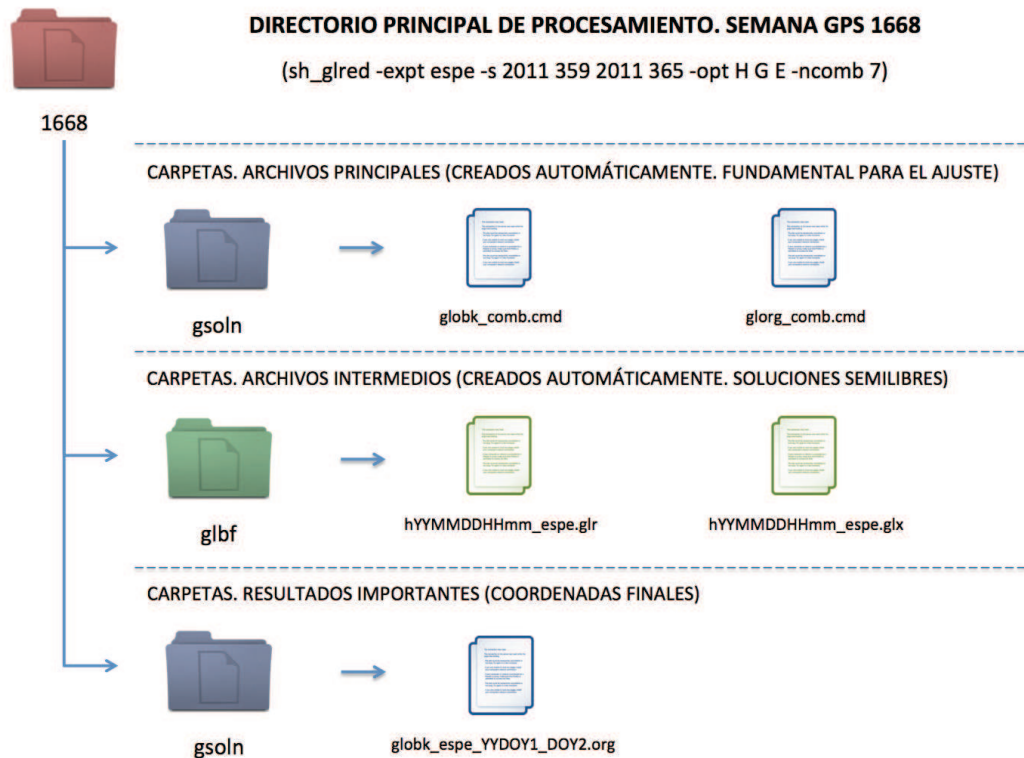


Figura 3.10 Ejemplo gráfico del funcionamiento general del módulo sh\_glred

Una vez realizado el ajuste y análisis de observaciones, el siguiente paso a dar, es la combinación y posterior materialización de las soluciones semilibres incluidas en los diversos archivos h-file o SINEX generados por cada semana de estudio (ver Figura 3.10). El script básico a ser utilizado para ello es:

```
sh_glred -expt XXXX -s YYY DOY1 YYY DOY2 -opt H G E -ncomb 7
```

donde:

XXXX	Nombre del proyecto.
YYY	Año calendario de la observación
DOY1 y DOY2	Primer y último día de observación.
H	Instrucción para la generación de archivos H (SINEX)
G	Instrucción para la materialización de coordenadas.
E	Instrucción para la creación de series temporales.



Una vez culminada la ejecución del proceso, se generará un archivo de resultados, denominado “globk\_espe\_YYDOY1\_DOY2.org” (Ver Figura 3.11), en cuyo interior se encontrará toda la información referente a los valores calculados para cada uno de los parámetros de transformación, así como el conjunto de coordenadas ya materializadas. (marco de referencia predefinido en el archivo de control “glorg\_comb.cmd”)

```

+++++
+ GLORG Version 5.17I +
+++++

Stabilization with 50.0% constant, 50.0% site dependent weighting.
Delete sites with 4.0-sigma condition.
Height variance factor 10.00 Position, 10.00 Velocity
For Position: Min dH sigma 0.0050 m; Min RMS 0.0030 m, Min dNE sigma 0.00050 m
For Velocity: Min dH sigma 0.0050 m/yr; Min RMS 0.0030 m/yr, Min dNE sigma 0.00010 m/yr
Sigma Ratio to allow use: Position 3.00 Velocity 3.00

-----
Starting Position stabilization iteration 1 L1112251200_espe.glx
For 20 sites in origin, min/max height sigma 3.47 5.09 mm; Median 4.36 mm, Tol 15.00 mm L1112251200_espe.glx

-----
Position system stabilization results
-----
X Rotation (mas) -10.87061 +- 5.98028 Iter 1 L1112251200_espe.glx
Y Rotation (mas) -1.75415 +- 8.64929 Iter 1 L1112251200_espe.glx
Z Rotation (mas) -9.48697 +- 11.71095 Iter 1 L1112251200_espe.glx
X Translation (m) 0.03716 +- 0.31371 Iter 1 L1112251200_espe.glx
Y Translation (m) -0.02916 +- 0.16615 Iter 1 L1112251200_espe.glx
Z Translation (m) 0.11342 +- 0.29351 Iter 1 L1112251200_espe.glx
Condition Sigmas used 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000
Sites and relative sigmas used in stabilization
VESL_GPS 1.00 BRFT_GPS 1.00 BRAZ_GPS 1.00 OHI2_GPS 1.00 LPGS_GPS 1.00 PALM_GPS 1.00
CRO1_GPS 1.00 BRMU_GPS 1.00 UNSA_GPS 1.00 SANT_GPS 1.00 PARC_GPS 1.00 ANTC_GPS 1.00
CONZ_GPS 1.00 BOGT_GPS 1.00 SCUB_GPS 1.00 MANA_GPS 1.00 MDO1_GPS 1.00 PIE1_GPS 1.00
ISPA_GPS 1.00 GOLD_GPS 1.00
For 60 Position Iter 1 Pre RMS 0.3846 m; Post RMS 0.35473 m L1112251200_espe.glx
For 20 sites in origin, min/max NE sigma 0.58 1.01 mm; Median 0.76 mm, Tol 1.50 mm L1112251200_espe.glx
Deleting CONZ_GPS Position error 2.9478 m, relative variance 0.94 Nsigma 8.59

SUMMARY POSITION ESTIMATES FROM GLOBK Ver 5.20I
Long. Lat. dE adj. dN adj. dE +- dN +- RHO dH adj. dH +- SITE
(deg) (deg) (mm) (mm) (mm) (mm) (mm) (mm) (mm)
357.15822 -71.67380 3.59 8.59 0.66 0.63 -0.226 -13.83 3.38 VESL_GPS*
321.57446 -3.87745 7.94 1.08 0.60 0.53 0.014 -6.01 2.41 BRFT_GPS*
315.01484 -22.68714 5.85 0.97 0.57 0.55 0.032 -1.38 2.22 CHPI_GPS
312.12213 -15.94747 4.79 2.80 0.62 0.56 -0.001 -14.42 2.57 BRAZ_GPS*
302.09867 -63.32108 0.97 3.12 0.40 0.44 -0.033 -21.86 1.46 OHI2_GPS*
302.06770 -34.90674 -21.71 -1.62 0.57 0.57 0.042 -14.31 2.55 LPGS_GPS*
295.94888 -64.77509 1.80 1.79 0.38 0.42 -0.008 5.04 1.37 PALM_GPS*
295.41568 17.75690 10.65 5.06 0.70 0.58 -0.083 0.97 2.83 CRO1_GPS*
295.30373 32.37040 2.65 9.78 0.53 0.51 -0.023 -6.48 2.04 BRMU_GPS*
294.59236 -24.72746 -27.29 8.01 0.79 0.64 -0.048 2.60 3.02 UNSA_GPS*
289.33144 -33.15029 -315.45 -155.71 0.66 0.61 -0.051 -12.25 2.24 SANT_GPS*
289.12012 -53.13695 0.18 -1.36 0.60 0.68 -0.072 -19.03 2.19 PARC_GPS*
288.46794 -37.33870 -1161.21 260.17 0.49 0.49 -0.100 59.92 1.69 ANTC_GPS*
286.97448 -36.84377 -3285.25 -666.16 0.53 0.52 -0.138 -103.93 1.93 CONZ_GPS
285.91906 4.64007 13.55 -13.62 0.59 0.46 -0.093 68.44 2.19 BOGT_GPS*
284.23768 20.01206 -0.24 10.94 0.55 0.49 -0.103 -1.72 2.06 SCUB_GPS*
281.34889 -1.65060 25.88 28.30 0.51 0.43 -0.068 -25.91 1.67 RIOP_GPS
273.75101 12.14894 -3.32 -24.63 0.69 0.60 -0.053 -56.46 2.69 MANA_GPS*
255.98501 30.68051 -4.41 -9.33 0.49 0.45 -0.033 -6.18 1.98 MDO1_GPS*
251.88107 34.30151 3.99 -0.75 0.41 0.37 -0.032 -8.88 1.60 PIE1_GPS*
250.65559 -27.12498 1.47 2.69 0.56 0.52 -0.103 -5.46 2.17 ISPA_GPS*
243.11075 35.42516 1.02 1.51 0.49 0.39 -0.004 -3.68 1.89 GOLD_GPS*
POS STATISTICS: For 17 RefSites WRMS ENU 8.13 8.03 21.77 mm NRMS ENU 15.20 16.15 10.52 L1112251200_espe.glx
POS MEANS: For 17 RefSites: East 0.44 +- 1.97 North 0.13 +- 1.95 Up -5.15 +- 5.28 mm L1112251200_espe.glx

PARAMETER ESTIMATES FROM GLOBK Vers 5.20I
# PARAMETER Estimate Adjustment Sigma
49. RIOP_GPS X coordinate (m) 1255144.94579 -6253609.46034 -182569.81352 0.00000 0.00000 0.00000 2011.982
50. RIOP_GPS Y coordinate (m) 1255144.96623 0.02044 0.00060
51. RIOP_GPS Z coordinate (m) -6253609.43065 0.02969 0.00164
51. RIOP_GPS Z coordinate (m) -182569.78448 0.02903 0.00044
    
```

Figura 3.11 Extracto del archivo de resumen globk\_espe\_11359-365.org

A su vez, también se creará las respectivas series temporales de cada una de las estaciones incluidas en el proceso, las cuales en principio, servirán para analizar la presencia de posibles outliers y los errores finales de las coordenadas. (Ver Figura 3.12)

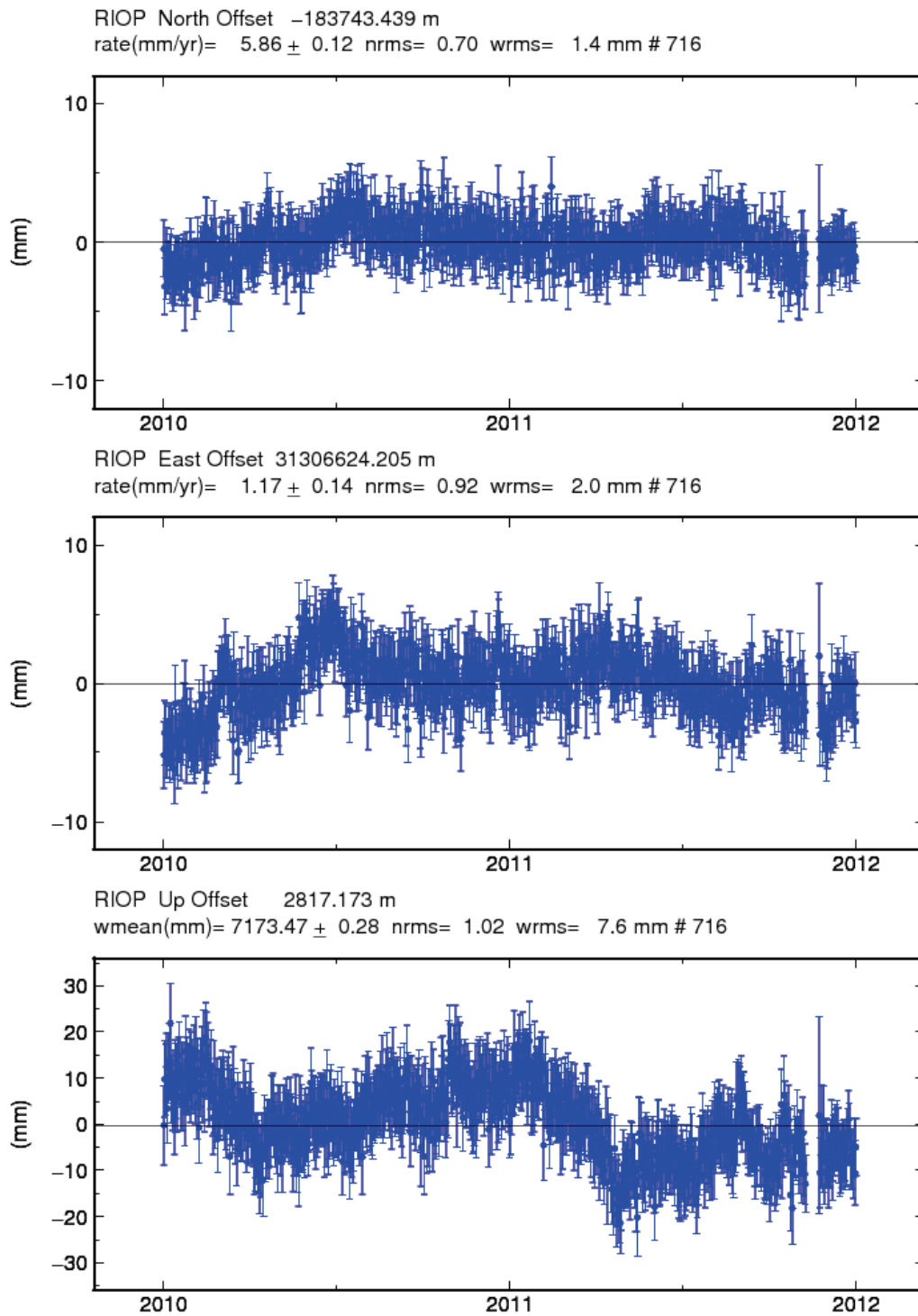


Figura 3.12 Serie temporal final para la estación de monitoreo continuo RIOP

En caso de ser necesario la creación de coordenadas individuales por cada día de observación, se deberá excluir del script, la cadena de caracteres “-ncomb 7”.

Mayor información respecto a la configuración de los archivos de control y el archivo de resultados, puede ser obtenida a través del Anexo B, al final del documento.

### 3.3.9 Transformación de soluciones IGS05 a IGS08

Un aspecto a ser tomado en cuenta, previo a la evaluación y la posterior modelación de las variaciones posicionales de la estación GNSS RIOP, es aquel relacionado con la transformación de soluciones IGS05 (todas las soluciones generadas entre las semanas GPS 1400 y 1632) al marco de referencia oficial IGS08. La razón principal de esto se debe, a que para la creación de las series temporales y por ende para su análisis e interpretación es necesario que todas las coordenadas se encuentran definidas sobre un mismo sistema, ya que al existir una marcada diferencia entre las soluciones IGS05 e IGS08, sus coordenadas no son equivalentes.

De esta manera, todas las coordenadas pertenecientes al intervalo comprendido entre las semanas 1564 y 1632, fueron transformadas al marco de referencia IGS08, a través de los 14 parámetros de transformación, generados por el IGS a partir del uso de 118 estaciones definidas simultáneamente entre los dos marcos e incorporados en su boletín oficial IGSMail-6354<sup>42</sup>. Estos son: (Ver tabla 3.6)

**Tabla 3.6 Parámetros de transformación entre IGS05 e IGS08. Época 2005.0**

PARÁMETRO	VALOR	SIGMA
Traslación en X (Tx)	1.5 mm	+/- 0.2
Traslación en Y (Ty)	- 0.0 mm	+/- 0.2
Traslación en Z (Tz)	5.8 mm	+/- 0.2
Rotación en X (Rx)	- 0.012 mas	+/- 0.009
Rotación en Y (Ry)	0.014 mas	+/- 0.009
Rotación en Z (Rz)	0.014 mas	+/- 0.010
Escala (Sc)	- 1.04 ppb	+/- 0.04
Rate dTx	1.5 mm/año	+/- 0.2
Rate dTy	- 0.0 mm/año	+/- 0.2
Rate dTz	5.8 mm/año	+/- 0.2
Rate dRx	- 0.012 mas/año	+/- 0.009
Rate dRy	0.014 mas/año	+/- 0.009
Rate dRz	0.014 mas/año	+/- 0.010
Rate dSc	- 1.04 ppb/año	+/- 0.04

Fuente: IGSMail-6354. 2011

<sup>42</sup> IGS. 2011. "Upcoming switch to IGS08/igs08.atx". Vínculo web: <http://igsceb.jpl.nasa.gov/pipermail/igsmail/2011/007544.html>

### 3.4 GENERACIÓN DE LA SOLUCIÓN MULTIANUAL CIE10 – 11

#### 3.4.1 Combinación de soluciones y materialización de coordenadas y velocidades

El último paso de la etapa de procesamiento, se centra, en la generación de la solución multianual de coordenadas y velocidades, la cual en nuestro caso, se definirá a partir del conjunto total de soluciones semanales, de los años 2010 y 2011, equivalentes a 106 soluciones. Las instrucciones básicas a ser utilizadas son:

```
glred 6 globk_comb.prt globk_comb.log expt.gdl globk_comb.cmd
```

y

```
globk 6 globk_vel.prt globk_vel.log expt.gdl globk_vel.cmd
```

donde:

expt.gdl	Lista de archivos h-files a ser incluidos en la solución. (Archivo ASCII)
globk_comb.cmd	Archivo de configuración utilizado para el ajuste multianual de soluciones.
globk_vel.cmd	Archivo de configuración utilizado para la generación de velocidades.

El resultado final del proceso, será la generación de los archivos de resumen, “globk\_comb.org” y “globk\_vel.org”, los cuales, al igual que el archivo de resultados “globk\_espe\_YYDOY1\_DOY2.org” detallado anteriormente (Ver Figura 3.11), poseen toda la información resultante del proceso; para el caso que nos compete, el resultado final será la obtención de las coordenadas y velocidades multianuales de la estación de monitoreo continuo RIOP, en conjunto con las soluciones de cada una de las estaciones involucradas en su materialización bajo el marco de referencia oficial IGS08. (En caso de ser necesario, información respecto al conjunto de coordenadas y velocidades resultantes, ver Anexo G)



### 3.4.2 Comparación entre velocidades resultantes y velocidades SIRGAS. Estación GNSS RIOP

Quizás, una de las características sobresalientes del software científico GAMIT-GLOBK, en lo referente a la materialización de coordenadas, y con ello, en el cálculo de velocidades, está relacionado principalmente con la implementación en su proceso del denominado Filtro de Kalman. Este algoritmo en principio, y como lo manifiesta Montenegro, A. en 2005. “es un método de estimación lineal, cuyos parámetros se corrigen en cada iteración que este realice, dependiendo del error de predicción que se haya cometido en la iteración anterior”, con lo cual, permite obtener valores mucho más cercanos a la realidad y sobretodo estadísticamente válidos.

Partiendo de esto, en las siguientes tablas (Ver tabla 3.7, 3.8 y 3.9) se presentan las velocidades obtenidas para la estación GNSS RIOP, a través de la implementación del Filtro de Kalman, contrastadas con las velocidades generadas por SIRGAS en los últimos años e incluidas en su solución multianual SIR11P01, la cual incluye todas las soluciones semanales calculadas por los centros de análisis SIRGAS entre 2000-01-02 (semana GPS 1043) y 2011-04-16 (semana 1631).<sup>43</sup>

Cabe recalcar que debido a que la estación GNSS RIOP, tuvo un periodo de para, desde el 28 de diciembre del 2001 hasta el 29 de abril del 2007, sus velocidades han sido calculadas en dos intervalos diferentes, siendo la velocidad SIR11P01-1 aquella definida por el periodo 2000/01/02 – 2001/12/28 y la velocidad SIR11P01-2 la velocidad resultante del periodo 2007/04/29 – 2011/04/16. Los resultados finales, se presentan a continuación:

**Tabla 3.7 Velocidades obtenidas a través del software GAMIT-GLOBK para la Estación RIOP**

<b>COMPONENTE</b>	<b>CIE10-11 (cm/año)</b>	<b>SIGMA (cm/año)</b>
<b>X</b>	0.128	0.811
<b>Y</b>	0.215	0.223
<b>Z</b>	1.005	0.592

<sup>43</sup> SIRGAS. 2012. “Soluciones Multianuales de SIRGAS-CON” Vínculo Web: <http://www.sirgas.org/index.php?id=154>

Tabla 3.8 Velocidades multianuales procesadas por SIRGAS. Solución SIR11P01

COMPONENTE	SIR11P01 – 1 (cm/año)	SIGMA (cm/año)	SIR11P01 – 2 (cm/año)	SIGMA (cm/año)
X	-0.19	0.04	0.00	0,03
Y	-0.35	0.15	0.19	0,03
Z	0.11	0.03	0.80	0,03

Tabla 3.9 Diferencias absolutas obtenidas entre velocidades calculadas y oficiales

COMPONENTE	DIFERENCIA CON SIR11P01 – 1 (cm/año)	DIFERENCIA CON SIR11P01 – 2 (cm/año)
X	0.062	0.128
Y	0.135	0.025
Z	0.895	0.205
<b>MEDIA</b>	<b>0,593</b>	<b>0.119</b>
<b>DESV. ESTÁNDAR</b>	<b>0,289</b>	<b>0.090</b>

Al final, es importante señalar, que la comparación realizada en este literal, se la ejecuta en relación, a velocidades obtenidas a partir del uso de dos modelos de ajuste lineal (modelos utilizados por GAMIT-GLOBK y BERNESE GPS), con lo cual, sus resultados son válidos, únicamente en el contexto de determinar la diferencia existente entre los resultados obtenidos en el presente estudio y aquellos obtenidos por SIRGAS a través de su centro de combinación oficial.

Así, y tomando en consideración que, en el siguiente capítulo, se presenta una nueva metodología para el análisis de las variaciones posicionales que sufren los diferentes puntos de la superficie terrestre, y más específicamente la estación de monitoreo continuo RIOP, a través de nuevos modelos de ajuste como son las series de Fourier, se pone a consideración el cálculo de nuevos vectores de velocidad, a partir de dicho modelo; proceso que, debido a la dificultad en tiempo que conlleva su desarrollo, no será presentado en esta ocasión.

### 3.5 EVALUACIÓN DE LAS SOLUCIONES FINALES

#### 3.5.1 Prueba de hipótesis unilateral sobre las medias de las diferencias entre coordenadas

Una vez obtenido el conjunto total de soluciones semanales y generada la solución multianual bajo el marco de referencia IGS08, el siguiente paso se centra en el análisis estadístico de las diferencias entre coordenadas, respecto a las soluciones generadas por SIRGAS a través de su centro oficial de combinación IBGE-SIRGAS.

Para ello, y tomando en consideración, que la diferencia media entre las coordenadas obtenidas a través de los software GAMIT-GLOBK y BERNESE GPS (software utilizado por el IBGE-SIRGAS) se encuentra alrededor de los 5 mm de error<sup>44</sup> (límite establecido al inicio del presente estudio como valor máximo de diferencia), se plantea la prueba de hipótesis con un nivel de confianza del 95% (zona de rechazo igual a 1,645), de la siguiente manera:

$$H_0: \mu \leq 5$$

$$H_1: \mu > 5$$

como, la media total de las 103 diferencias es 4.244 mm y su desviación estándar 1.125 (Ver Anexo F), se obtiene un valor experimental de Z igual a:

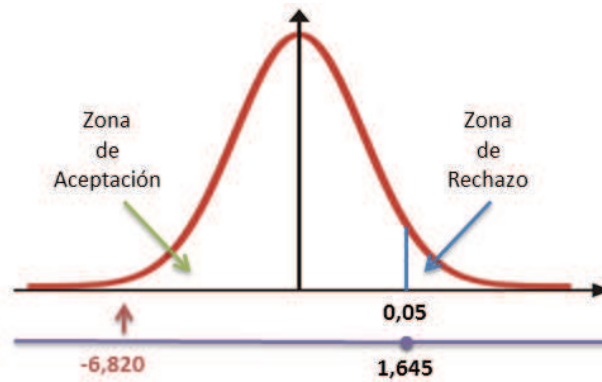
$$Z = \frac{\bar{X} - \mu_0}{\sigma} * \sqrt{n} \quad (3.1)$$

$$Z = \frac{4.244 - 5}{1.125} * \sqrt{103} \quad (3.2)$$

$$Z = -6.820 \quad (3.3)$$

con lo cual, la hipótesis nula es aceptada y por ende se verifica la igualdad estadística entre las soluciones procesadas y las soluciones oficiales SIRGAS a un nivel de confianza del 95%. Visto gráficamente esto sería:

<sup>44</sup> Cimbaro, S. 2008. "Procesamiento de Datos GPS con GAMIT-GLOBK. Centro de Procesamiento GMA. Grupo de Trabajo I – SIRGAS". Reunión SIRGAS 2008. Montevideo, Uruguay.



$$H_0: \mu \leq 5 \quad \text{se acepta}$$

Figura 3.13 Prueba de hipótesis unilateral sobre las medias de las diferencias entre coordenadas

### 3.5.2 Prueba de hipótesis unilateral sobre las medias de las diferencias entre velocidades

Para finalizar, y al igual que lo desarrollado en el análisis de las diferencias de coordenadas, en el caso de las velocidades, se procede al desarrollo de la prueba de hipótesis sobre sus medias, a través del establecimiento de las hipótesis nula y alternativa, al nivel de confianza del 95%, igual a:

$$H_0: \mu \leq 5$$

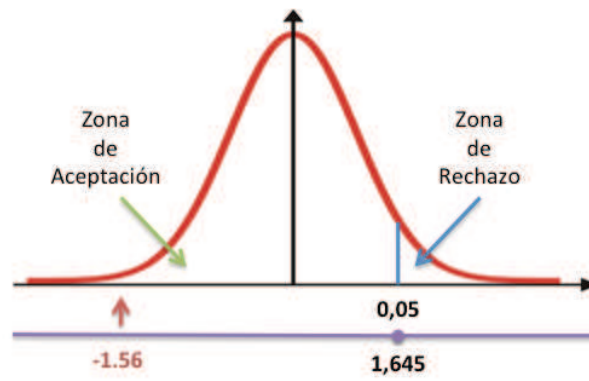
$$H_1: \mu > 5$$

En este caso, la media total de las diferencias, tomando en consideración las 21 estaciones incluidas en la etapa de procesamiento (Ver Anexo H), es igual a 4.19 mm, con una desviación estándar de -1.56 mm, lo cual permite establecer un valor experimental de Z, igual a:

$$Z = \frac{4.19-5}{2.37} * \sqrt{21} \quad (3.4)$$

$$Z = -1.56 \quad (3.5)$$

O visto gráficamente:



$H_0: \mu \leq 5$  se acepta

**Figura 3.14** Prueba de hipótesis unilateral sobre las medias de las diferencias entre velocidades

Lo que permite aceptar la hipótesis nula, y por ende, concluir que las velocidades obtenidas en el procesamiento de datos GNSS son estadísticamente equivalentes a las velocidades obtenidas por el centro de combinación oficial IBGE – SIRGAS.

# CAPÍTULO IV

## MODELAMIENTO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1 GENERALIDADES

Una vez generadas las soluciones posicionales, el siguiente paso a ser ejecutado se centra en el modelamiento y análisis de las diferentes funciones matemáticas de ajuste, siendo la función principal a ser calculada en el presente proyecto, las señaladas series de Fourier. (Ver literal 2.7)

Es importante acotar que para el proceso se utilizó un total de 126 soluciones semanales, de las cuales, 103 fueron empleadas en la definición de la función de ajuste y 23 en su posterior validación (elección aleatoria). Luego de esto, se procedió a generar las diferentes series de tiempo para cada una de las componentes de la estación y finalmente a la determinación de los diferentes modelos y/o funciones de ajuste, lo cual se logró gracias al uso del módulo Curve Fitting Tool del software matemático MATLAB, versión R2011b. (Ver Figura 4.1)

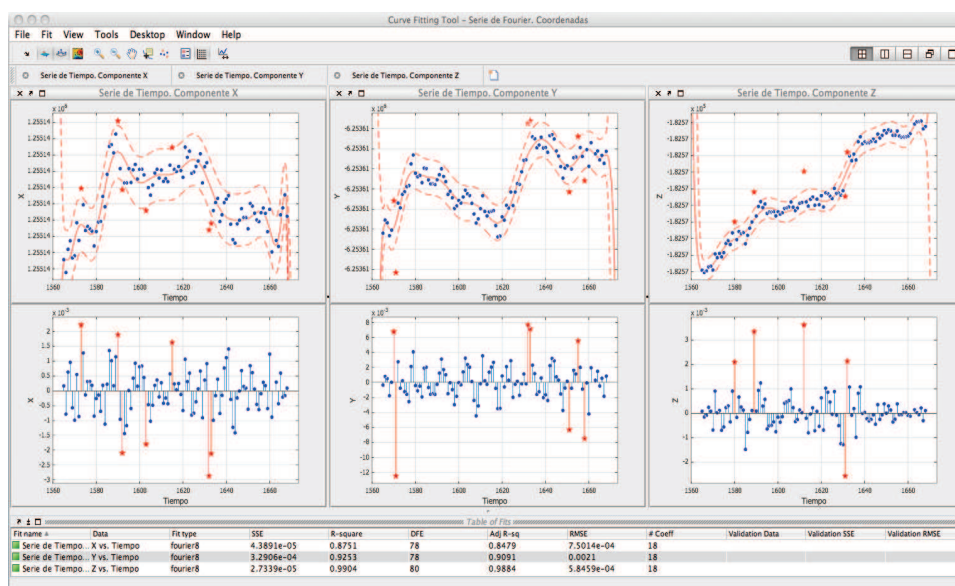


Figura 4.1 Módulo Curve Fitting Tool de MATLAB. Versión R2011b

El proceso general realizado para esta fase se resume a través del siguiente flujograma. (Ver Figura 4.2)

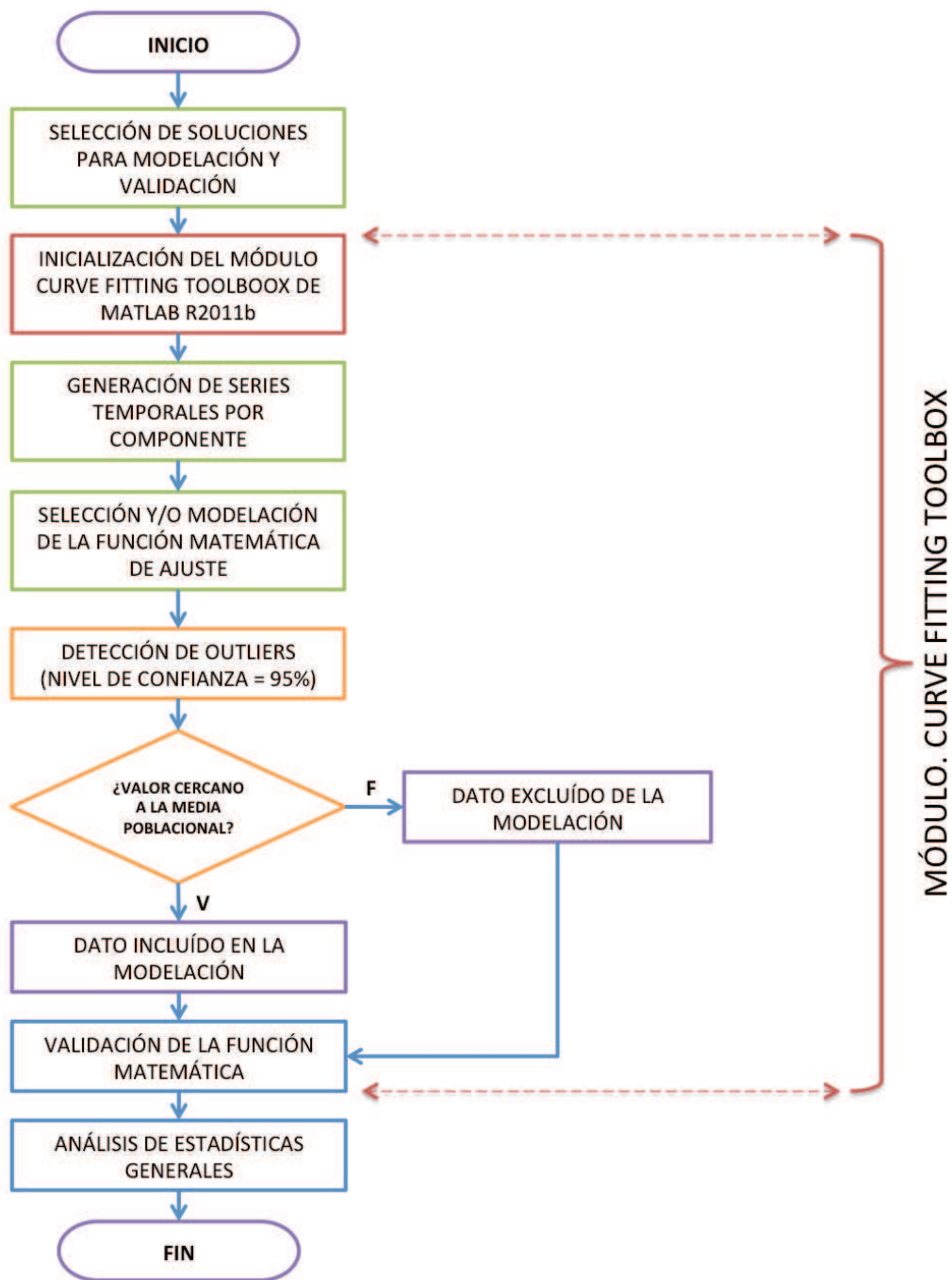


Figura 4.2 Flujograma general del modelamiento de funciones

Al culminar el proceso, el resultado final fue la obtención de las diferentes funciones de ajuste, incluyendo las series de Fourier. Las estadísticas generales de los principales modelo generados se presentan a continuación a través de las tablas 4.1, 4.2 y 4.3.

## 4.2 ESTADÍSTICAS GENERALES DE LAS FUNCIONES DE AJUSTE POR COMPONENTE

### 4.2.1 Funciones de Ajuste para la Componente X

Tabla 4.1 Estadísticas generales por función de ajuste para la componente X

FUNCIÓN	ORDEN	R <sup>2</sup>	RMSE	SSE
<b>1. Lineal</b>	1	0.1181	0.0020	3.9295 e <sup>-04</sup>
<b>2. Polinomial</b>	2	0.6105	0.0012	1.3689 e <sup>-04</sup>
	3	0.6747	0.0011	1.1432 e <sup>-04</sup>
	4	0.7172	0.0010	9.9409 e <sup>-04</sup>
	5	0.7130	0.0011	1.0087 e <sup>-04</sup>
	6	0.7111	0.0011	1.0153 e <sup>-04</sup>
	7	0.7237	0.0011	9.7095 e <sup>-04</sup>
	8	0.6969	0.0011	1.0653 e <sup>-04</sup>
	<b>3. Exponencial</b>	1	0.0009	0.0019
2		0.2741	0.0017	2.5512 e <sup>-04</sup>
<b>4. Gaussiana</b>	1	0.5487	0.0013	1.5861 e <sup>-04</sup>
	2	0.5523	0.0013	1.5733 e <sup>-04</sup>
	3	0.5784	0.0013	1.4817 e <sup>-04</sup>
	4	0.4210	0.0016	2.0350 e <sup>-04</sup>
	5	0.7187	0.0011	9.8872 e <sup>-05</sup>
	6	0.7644	0.0010	8.2794 e <sup>-05</sup>
	7	-	-	-
	8	0.6489	0.0013	1.2340 e <sup>-04</sup>
<b>5. Serie de Fourier</b>	1	0.6256	0.0012	1.3158 e <sup>-04</sup>
	2	0.6967	0.0011	1.0659 e <sup>-04</sup>
	3	0.7813	0.0009	7.6867 e <sup>-05</sup>
	4	0.7932	0.0009	7.2690 e <sup>-05</sup>
	5	0.8207	0.0008	6.301 e <sup>-05</sup>
	6	0.8238	0.0008	6.1931 e <sup>-05</sup>
	7	0.8521	0.0008	5.1978 e <sup>-05</sup>
	<b>8</b>	<b>0.8751</b>	<b>0.0007</b>	<b>4.3891 e<sup>-05</sup></b>



### 4.2.2 Funciones de Ajuste para la Componente Y

Tabla 4.2 Estadísticas generales por función de ajuste para la componente Y

FUNCIÓN	ORDEN	R <sup>2</sup>	RMSE	SSE
<b>1. Lineal</b>	1	0.2450	0.0059	0.0033
<b>2. Polinomial</b>	2	0.3017	0.0058	0.0031
	3	0.2991	0.0058	0.0031
	4	0.6599	0.0041	0.0015
	5	0.7228	0.0037	0.0012
	6	0.8092	0.0031	0.0008
	7	0.8169	0.0030	0.0008
	8	0.8373	0.0029	0.0007
	<b>3. Exponencial</b>	1	0.3345	0.0056
2		0.3394	0.0056	0.0029
<b>4. Gaussiana</b>	1	0.1713	0.0063	0.0037
	2	-	-	-
	3	0.7890	0.0033	0.0009
	4	0.4638	0.0053	0.0024
	5	-	-	-
	6	-	-	-
	7	0.8515	0.0030	0.0006
	8	0.8793	0.0027	0.0005
<b>5. Serie de Fourier</b>	1	0.3919	0.0054	0.0027
	2	0.7137	0.0037	0.0013
	3	0.8374	0.0029	0.0007
	4	0.9112	0.0021	0.0003
	5	0.9087	0.0022	0.0004
	6	0.9162	0.0021	0.0003
	7	0.9173	0.0021	0.0003
	<b>8</b>	<b>0.9253</b>	<b>0.0021</b>	<b>0.0003</b>

## 4.2.3 Funciones de Ajuste para la Componente Z

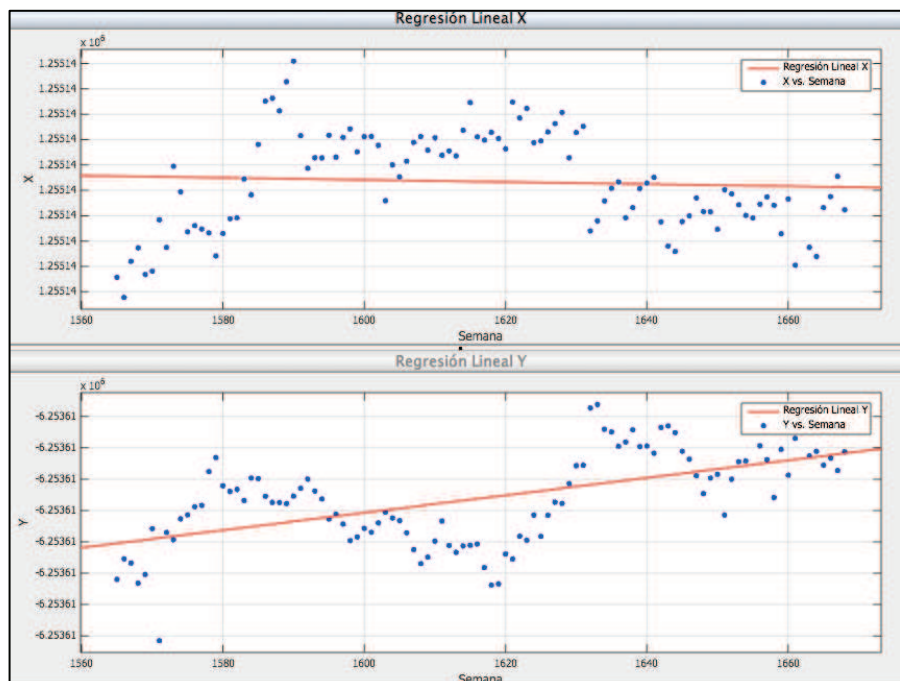
Tabla 4.3 Estadísticas generales por función de ajuste para la componente Z

FUNCIÓN	ORDEN	R <sup>2</sup>	RMSE	SSE
<b>1. Lineal</b>	1	0.9382	0.0021	1.7577 e <sup>-04</sup>
<b>2. Polinomial</b>	2	0.9380	0.0014	1.7642 e <sup>-04</sup>
	3	0.9379	0.0014	1.7672 e <sup>-04</sup>
	4	0.9644	0.0010	1.0137 e <sup>-04</sup>
	5	0.9637	0.0011	1.0322 e <sup>-04</sup>
	6	0.9788	0.0007	5.6479 e <sup>-05</sup>
	7	0.9833	0.0007	4.7625 e <sup>-05</sup>
	8	0.9832	0.0007	4.7948 e <sup>-05</sup>
	<b>3. Exponencial</b>	1	0.9443	0.0013
2	0.9446	0.0013	1.5759 e <sup>-04</sup>	
<b>4. Gaussiana</b>	1	0.8777	0.0019	3.4812 e <sup>-04</sup>
	2	-	-	-
	3	0.9773	0.0008	6.4530 e <sup>-05</sup>
	4	0.9758	0.0008	6.8860 e <sup>-05</sup>
	5	0.9841	0.0007	4.5248 e <sup>-05</sup>
	6	0.9831	0.0007	4.8232 e <sup>-05</sup>
	7	0.9822	0.0008	5.0535 e <sup>-05</sup>
	8	0.9892	0.0006	3.0839 e <sup>-05</sup>
<b>5. Serie de Fourier</b>	1	0.9443	0.0013	1.5845 e <sup>-04</sup>
	2	0.9729	0.0009	7.7227 e <sup>-05</sup>
	3	0.9807	0.0007	5.4901 e <sup>-05</sup>
	4	0.9837	0.0007	4.6313 e <sup>-05</sup>
	5	0.9859	0.0006	4.0042 e <sup>-05</sup>
	6	0.9891	0.0006	3.1073 e <sup>-05</sup>
	7	0.9898	0.0005	2.9124 e <sup>-05</sup>
	<b>8</b>	<b>0.9904</b>	<b>0.0005</b>	<b>2.7339 e<sup>-05</sup></b>

Como se puede observar, las mejores funciones de ajuste son aquellas de mayor orden en cada una de sus clases, sobresaliendo en gran parte las series de Fourier de orden 8 en cada una de las componentes evaluadas.

En este sentido, un aspecto sumamente importante a ser analizado, son los valores estadísticos obtenidos por las funciones lineales para cada una de las componentes, ya que a partir de ellas se evidencia la poca efectividad que tienen estos modelos en el ajuste e interpretación de las variaciones, si estas no presentan una dinámica linealmente marcada.

Así, para el caso específico de las componentes X e Y (Ver Figura 4.3), donde la variación posee un comportamiento muy cambiante, su coeficiente de determinación no sobrepasa la media, es decir, la calidad del modelo de ajuste es realmente baja.



**Figura 4.3 Ajuste de las variaciones posicionales a partir de una regresión lineal**

Finalmente, y ya una vez analizadas las estadísticas de cada uno de los modelos, se puede concluir que la función de mejor ajuste e interpretación de las variaciones posicionales de cada una de las componentes son las series de Fourier de orden 8, por lo cual y siguiendo lo manifestado en el literal 2.7.3, ecuaciones 2.41, 2.42, 2.43 y 2.44, se establecen las ecuaciones principales de cada modelo, incluido sus estadísticas generales como:

### 4.3 FUNCIONES DE AJUSTE FINALES POR COMPONENTE

#### 4.3.1 Serie de Fourier. Componente X

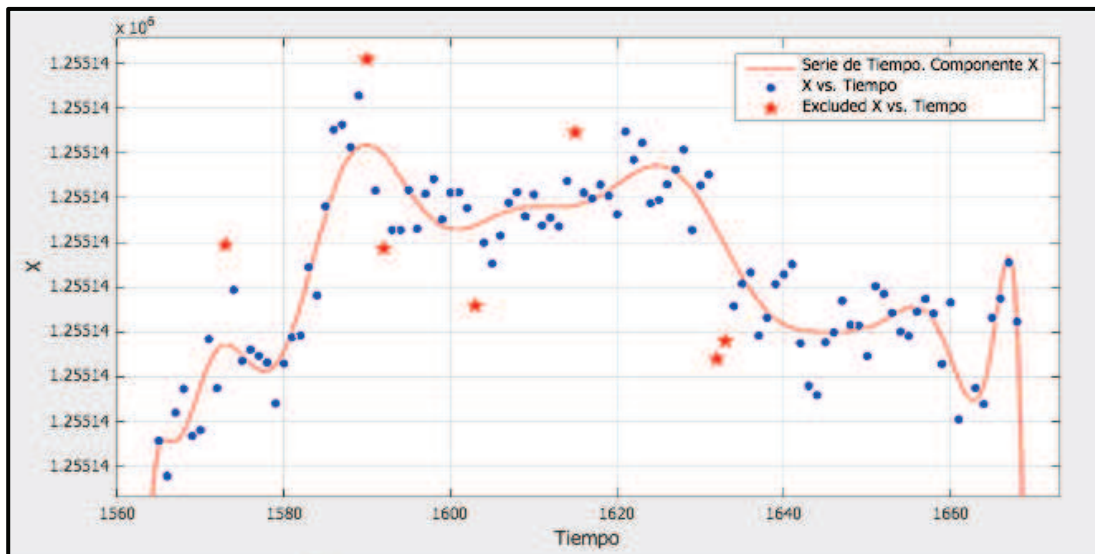


Figura 4.4 Serie de Fourier calculada para la componente X de la Estación RIOP

$$f(x) = a_0 + a_1 \cos \omega x + b_1 \sin \omega x + a_2 \cos 2\omega x + b_2 \sin 2\omega x + a_3 \cos 3\omega x + b_3 \sin 3\omega x + a_4 \cos 4\omega x + b_4 \sin 4\omega x + a_5 \cos 5\omega x + b_5 \sin 5\omega x + a_6 \cos 6\omega x + b_6 \sin 6\omega x + a_7 \cos 7\omega x + b_7 \sin 7\omega x + a_8 \cos 8\omega x + b_8 \sin 8\omega x$$

Fórmula 4.1 Serie de Fourier calculada para la componente X de la Estación RIOP

Tabla 4.4 Coeficientes de la Series de Fourier calculados para la componente X. Estación RIOP

COEFICIENTE	VALOR	COEFICIENTE	VALOR
$a_0$	$-4.997 e^{+09}$	$\omega$	0.01017
$a_1$	$-6.686 e^{+09}$	$b_1$	$-5.914 e^{+09}$
$a_2$	$-7.737 e^{+08}$	$b_2$	$-6.286 e^{+09}$
$a_3$	$2,000 e^{+09}$	$b_3$	$-2.913 e^{+09}$
$a_4$	$1,474 e^{+09}$	$b_4$	$-3.680 e^{+08}$
$a_5$	$4,319 e^{+08}$	$b_5$	$2.248 e^{+08}$
$a_6$	$3.929 e^{+07}$	$b_6$	$1.024 e^{+08}$
$a_7$	$-5.444 e^{+06}$	$b_7$	$1.453 e^{+07}$
$a_8$	$-9.177 e^{+05}$	$b_8$	$4.861 e^{+05}$

4.3.2 Serie de Fourier. Componente Y

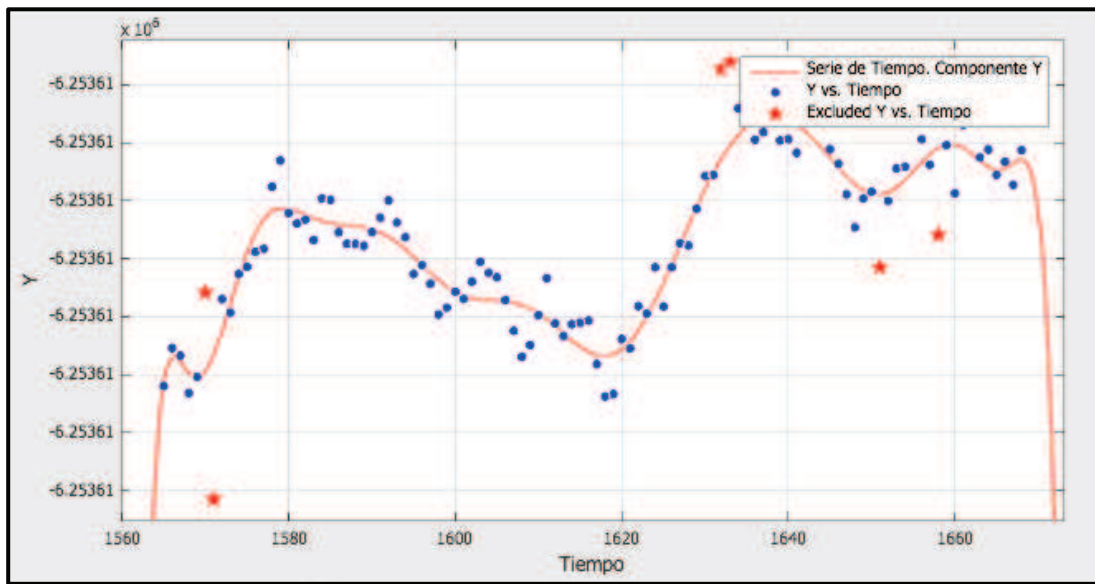


Figura 4.5 Serie de Fourier calculada para la componente Y de la Estación RIOP

$$f(x) = a_0 + a_1 \cos \omega x + b_1 \sin \omega x + a_2 \cos 2\omega x + b_2 \sin 2\omega x + a_3 \cos 3\omega x + b_3 \sin 3\omega x + a_4 \cos 4\omega x + b_4 \sin 4\omega x + a_5 \cos 5\omega x + b_5 \sin 5\omega x + a_6 \cos 6\omega x + b_6 \sin 6\omega x + a_7 \cos 7\omega x + b_7 \sin 7\omega x + a_8 \cos 8\omega x + b_8 \sin 8\omega x$$

Fórmula 4.2 Serie de Fourier calculada para la componente Y de la Estación RIOP

Tabla 4.5 Coeficientes de la Series de Fourier calculados para la componente Y. Estación RIOP

COEFICIENTE	VALOR	COEFICIENTE	VALOR
$a_0$	$- 6.254 e^{+06}$	$\omega$	0.03077
$a_1$	109.400	$b_1$	- 56.840
$a_2$	- 55.950	$b_2$	79.550
$a_3$	8.741	$b_3$	- 64.260
$a_4$	12.020	$b_4$	33.870
$a_5$	- 11.690	$b_5$	- 11.030
$a_6$	5.279	$b_6$	1.555
$a_7$	- 1.279	$b_7$	0.229
$a_8$	0.132	$b_8$	- 0.094

4.3.3 Serie de Fourier. Componente Z

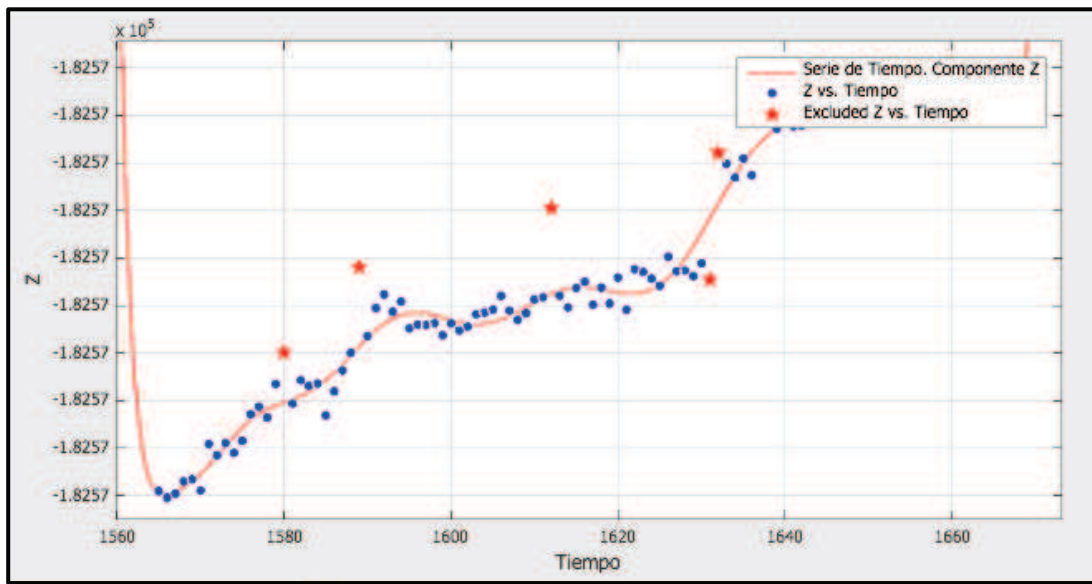


Figura 4.6 Serie de Fourier calculada para la componente Z de la Estación RIOP

$$f(x) = a_0 + a_1 \cos \omega x + b_1 \sin \omega x + a_2 \cos 2\omega x + b_2 \sin 2\omega x + a_3 \cos 3\omega x + b_3 \sin 3\omega x + a_4 \cos 4\omega x + b_4 \sin 4\omega x + a_5 \cos 5\omega x + b_5 \sin 5\omega x + a_6 \cos 6\omega x + b_6 \sin 6\omega x + a_7 \cos 7\omega x + b_7 \sin 7\omega x + a_8 \cos 8\omega x + b_8 \sin 8\omega x$$

Fórmula 4.3 Serie de Fourier calculada para la componente Z de la Estación RIOP

Tabla 4.6 Coeficientes de la Series de Fourier calculados para la componente Z. Estación RIOP

COEFICIENTE	VALOR	COEFICIENTE	VALOR
$a_0$	$1.421 e^{+08}$	$\omega$	0.01220
$a_1$	$-1.674 e^{+08}$	$b_1$	$-1.921 e^{+08}$
$a_2$	$-2.489 e^{+07}$	$b_2$	$1.805 e^{+08}$
$a_3$	$8.613 e^{+07}$	$b_3$	$-5.642 e^{+07}$
$a_4$	$-4.341 e^{+07}$	$b_4$	$-1.220 e^{+07}$
$a_5$	$6.346 e^{+06}$	$b_5$	$1.337 e^{+08}$
$a_6$	$1.369 e^{+06}$	$b_6$	$-3.147 e^{+08}$
$a_7$	$-4.793 e^{+05}$	$b_7$	$1.519 e^{+05}$
$a_8$	$2.996 e^{+04}$	$b_8$	$1.822 e^{+04}$

## 4.4 ESTADÍSTICAS GENERALES DE LAS FUNCIONES FINALES

### 4.4.1 Estadísticas de la Serie de Fourier. Componente X

Tabla 4.7 Estadísticas generales de la función de ajuste final para la componente X

NOMBRE	ABREVIATURA	VALOR
1. Suma de cuadrados del error	SSE	$4.389 e^{-05}$
2. Error medio cuadrático	RMSE	$7.501 e^{-04}$
3. Error R cuadrado	$R^2$	0.8751
4. Error R cuadrado ajustado	$R^2$ ajustado	0.8479

### 4.4.2 Estadísticas de la Serie de Fourier. Componente Y

Tabla 4.8 Estadísticas generales de la función de ajuste final para la componente Y

NOMBRE	ABREVIATURA	VALOR
1. Suma de cuadrados del error	SSE	$3.291 e^{-04}$
2. Error medio cuadrático	RMSE	$2.054 e^{-03}$
3. Error R cuadrado	$R^2$	0.9253
4. Error R cuadrado ajustado	$R^2$ ajustado	0.9091

### 4.4.3 Estadísticas de la Serie de Fourier. Componente Z

Tabla 4.9 Estadísticas generales de la función de ajuste final para la componente Z

NOMBRE	ABREVIATURA	VALOR
1. Suma de cuadrados del error	SSE	$2.734 e^{-05}$
2. Error medio cuadrático	RMSE	$5.846 e^{-04}$
3. Error R cuadrado	$R^2$	0.9904
4. Error R cuadrado ajustado	$R^2$ ajustado	0.9884

## 4.5 DETERMINACIÓN DE LA IDONEIDAD DEL MODELO POR COMPONENTE

### 4.5.1 Prueba de hipótesis t sobre los coeficientes de correlación de cada una de las componentes

Una vez establecidas las funciones de ajuste para cada componente, el siguiente paso se centra en el análisis estadístico de sus valores, más apropiadamente de la correlación existente entre sus variables y por ende de la calidad del modelo, lo cual es posible, gracias al uso de la denominada Distribución del Coeficiente de Correlación<sup>45</sup>.

De esta manera, si asumimos las hipótesis nula y alternativa como:

$$H_0: \rho = 0$$

$$H_1: \rho \neq 0$$

y evaluamos la función t, a un nivel de confianza del 95%, a través de la relación:

$$t = \frac{r}{\sqrt{1-r^2}} * \sqrt{n-2} \quad (4.1)$$

Obtenemos los diferentes valores de los modelos generados para cada una de las componentes de la estación RIOP, los cuales se presentan a continuación en la tabla 4.10.

**Tabla 4.10 Valores obtenidos para la prueba de hipótesis t**

NOMBRE	r	t
<b>1. Modelo. Componente X</b>	0.9355	26,6016
<b>2. Modelo. Componente Y</b>	0.9619	35,3705
<b>3. Modelo. Componente Z</b>	0.9952	102,0776

<sup>45</sup> Romo, L. 1998. "Estadística. Principios básicos para el análisis de errores experimentales". Escuela Politécnica del Ejército – Centro de Investigaciones Científicas. EDIESPE. Págs. 185 – 189.



A continuación, mediante el uso de una tabla de distribución t-student<sup>46</sup>, determinamos el límite de la zona de rechazo para el número de grados de libertad, en nuestro caso 101, lo cual da como resultado un valor de 1,98 como límite crítico. (Ver gráfica 4.7)

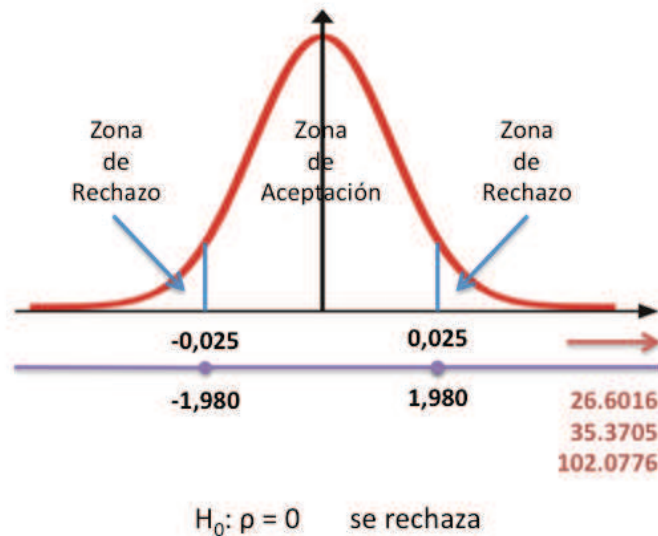


Figura 4.7 Prueba de hipótesis t sobre los coeficientes de correlación

Analizando los valores obtenidos en la prueba de hipótesis, se puede verificar como la hipótesis nula para cada uno de los casos se rechaza, lo cual da lugar a la aceptación de la hipótesis alternativa y por ende a la existencia de correlación entre las variables de cada uno de los modelos, validando así su funcionamiento.

#### 4.5.2 Prueba de hipótesis F sobre los coeficientes de determinación de cada una de las componentes

Por otro lado, para verificar la idoneidad del modelo y/o función resultante, se parte de la asunción que: “en caso que la variable X, no contribuya a la predicción de la variable Y, la parte determinística del modelo, no cambiará aun cuando X cambie”<sup>47</sup>, es decir, sus coeficientes serán igual a 0.

<sup>46</sup> Instituto de Matemática y Estadística "Prof. Ing. Rafael Laguardia". 2012. "TABLA DE LA DISTRIBUCION t-Student con n grados de libertad". Vínculo web: <http://imerl.fing.edu.uy/pye/material/tablas/tablat.pdf>

<sup>47</sup> Devore, J. 2008. "Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias". CENCAGE LEARNING. Octava Edición. Págs: 553 - 554

Así, partiendo del planteamiento de la hipótesis nula y alternativa, al 95% del nivel de confianza:

$$H_0: a_n = b_n = 0$$

$H_i$ : Al menos uno de los parámetros es distinto de 0

Se tiene que, el estadístico de prueba para la aprobación de la hipótesis nula sigue una distribución F, la cual puede ser calculada a través de la relación:

$$F = \frac{\frac{R^2}{K}}{\frac{1 - R^2}{n - (K + 1)}} \quad (4.2)$$

Siendo K, el número de parámetros y/o coeficientes del modelo evaluado (sin incluir a  $a_0$ ) y n el número de datos incluidos en el desarrollo de la función. En nuestro caso, esto sería,  $K = 16$  y  $n = 103$ , obteniendo así, un valor de F por componente igual a (Ver tabla 4.11):

**Tabla 4.11 Valores obtenidos para la prueba de hipótesis F**

NOMBRE	$R^2$	F
<b>1. Modelo. Componente X</b>	0.8751	37,6594
<b>2. Modelo. Componente Y</b>	0.9253	66,5795
<b>3. Modelo. Componente Z</b>	0.9904	554,5208

Finalmente, una vez evaluado el estadístico F, con K grados de libertad en el numerador y  $[n - (k + 1)]$  grados de libertad en el denominador y a través del uso de una tabla de distribución  $F^{48}$ , se determina un valor crítico para F igual a 1.746, con lo cual, en caso de que F supere dicho valor, la hipótesis se rechazaría. Visto gráficamente esto sería:

<sup>48</sup> Universidad Tecnológica Nacional de Argentina. 2012 "Tabla de valores críticos de la distribución F a un nivel de confianza del 95%". Vínculo Web: <http://www.mat.uda.cl/hsalinas/cursos/2008/probabilidad/TablaF05.pdf>

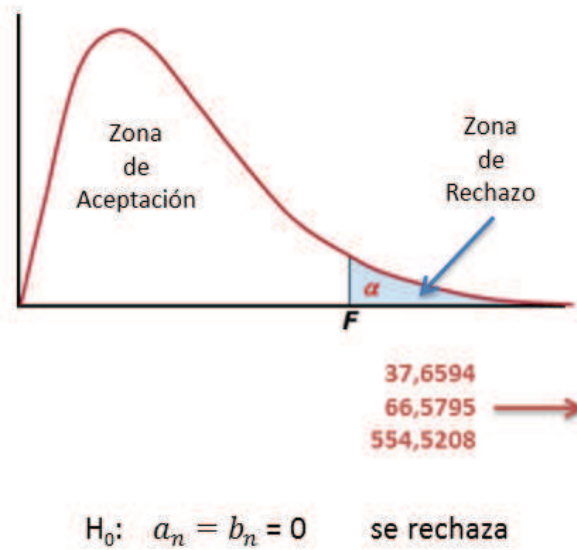


Figura 4.8 Prueba de hipótesis F sobre los coeficientes de determinación

Como la hipótesis nula se rechaza, se llega a la conclusión de que al menos uno de los coeficientes es distinto de cero, por ende se verifica la utilidad del modelo calculado para predecir los valores de Y, en nuestro caso, las variaciones de cada una de las componentes de la estación GNSS RIOP

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1. CONCLUSIONES

- ✓ La metodología establecida para la fase de ajuste y materialización de soluciones, ha permitido generar coordenadas geocéntricas en el marco de referencia IGS08, con precisiones cercanas al milímetro para cada uno de las componentes de la estación RIOP y con una diferencia promedio no mayor a los 5 mm respecto a las soluciones generadas por el centro de combinación oficial SIRGAS. En tal virtud, se puede manifestar, que dicha metodología ha cumplido en principio los requerimientos y expectativas planteadas al inicio del estudio, estableciéndose como un primer aporte para el análisis y generación de soluciones a nivel nacional, con miras al modelamiento de fenómenos y procesos geofísicos.
- ✓ En referencia al análisis de calidad de los datos posicionales de la estación GNSS RIOP, se observa, como todos los archivos pese a presentar un gran número de saltos de ciclo y en ciertos casos, valores de multipath cercanos a la media, su incidencia en la obtención y/o generación de observaciones es mínima, dando como resultado, un porcentaje de recepción medio del 96% para todos los archivos evaluados y por ende pasando el control de calidad para su inclusión en el proceso.
- ✓ Es importante denotar, que para el estudio se ha establecido por primera vez a nivel nacional, el uso de un modelo de corrección para la compensación del error por cargamento atmosférico, siendo el modelo escogido, el desarrollado por Tregoning, P. en 2005. Los resultados finales obtenidos con la incorporación de este modelo, demuestran que su exclusión del proceso, puede llegar a aportar a la solución final, un error cercano a los 4 mm sobre la componente horizontal y de 6 mm en la vertical.

- ✓ En lo que se refiere al análisis de residuales y a las estadísticas generales obtenidas posterior al ajuste de observaciones, se puede concluir que uno de los principales problemas que se encontró respecto a la estación de monitoreo continuo RIOP, se refiere a la existencia de grandes saltos de ciclo por motivo del alto contenido de electrones en la ionósfera. En tal sentido, para la compensación del error, se partió del uso de los mapas ionosféricos desarrollados por el Centro para la Determinación de Órbitas en Europa (CODE), los cuales permitieron en principio, compensar cerca del 40% del error total obtenido sin su inclusión y obtener una precisión media sobre la solución final 1,3 mm mejor a la inicial.
  
- ✓ Una vez que se ha comprobado la idoneidad de las diferentes series de Fourier obtenidas por cada componente cartesiana, a través de las diferentes pruebas de hipótesis, se puede afirmar que éstas, han cumplido con el objetivo general planteado en un principio, logrando definir en cierta forma, la variación desordenada de la estación de monitoreo continuo RIOP y con ello permitiendo establecer un nuevo método para su análisis e interpretación. Sin embargo, también es importante recalcar que debido a que la función sigue la tendencia de los datos, su precisión depende en gran medida, del número total de coordenadas utilizadas por componente para su determinación; así, en el caso específico de este estudio, donde el número de soluciones utilizadas corresponde a un total de 103 por cada eje coordenado, se ha obtenido una precisión promedio en el modelamiento y la predicción de datos, cercana al milímetro de error para la componente en X, 2 milímetros para la componente en Y, y medio milímetro para la componente en Z, dando un error total de 1,13 mm para el modelo general.

## 6.2. RECOMENDACIONES

- ✓ Debido a la eficacia que posee la metodología establecida en el presente estudio, se recomienda su uso y/o simulación en estudios de similares características, así como, en el modelamiento de fenómenos y procesos naturales de gran importancia para la comunidad.
- ✓ Pese a que, para el presente estudio se ha realizado un análisis exhaustivo de cada uno de los modelos y parámetros de corrección utilizados para la compensación de errores, se recomienda realizar un estudio puntual de su aporte sobre el ajuste final de soluciones, debido a que la mayoría de ellos, al ser modelos mundiales, han sido definidos bajo características globales y por ende su aporte en términos de precisión, dependerá en gran medida de la escala espacial que los defina y del intervalo de tiempo en el cual las observaciones fueron obtenidas. En caso de ser posible, la mejor opción siempre será utilizar modelos locales creados para el fin específico a seguir.
- ✓ En lo referente a los modelos de corrección de cargamento atmosférico y refracción ionosférica, es recomendable utilizar los modelos, siempre y cuando la red a procesar sea una red a nivel regional o mundial, ya que sus errores varían en función de la latitud en la cual se encuentre el punto en cuestión. Así, si los datos a ser procesados corresponden únicamente a una red con líneas base menores a los 100 km de distancia, los modelos no serán capaces de corregir correctamente su valor, dando en mucho de los casos, la presencia de un error mayor al ocasionado sin su inclusión.
- ✓ Al final y debido a la efectividad de la función matemática obtenida en el modelamiento de las variaciones posicionales de la estación GNSS RIOP, se recomienda su inclusión en el proyecto “Generación del Modelo de Velocidades de una Red Geodésica a partir de datos GPS”, y a su vez, en el cálculo de sus correspondientes vectores de velocidad, los cuales podrán ser obtenidos, siempre y cuando la función matemática resultante sea llevada a un modelo de regresión lineal, en donde su interpretación geométrica permita obtener el vector de velocidad acorde a lo indicado en la ecuación 2.40 del presente estudio, es decir, a través de un proceso exhaustivo de linealización.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bird, P. 2003. "An updated digital model of plate boundaries". *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. Vol. 4.

Bolder, D. J. & Gusba, S. 2002. "Exponentials, Polynomials, and Fourier Series: More Yield Curve Modelling at the Bank of Canada". Bank of Canada Working Paper No. 2002-29

Burt, J. et al. 2009. "Elementary Statistics for Geographers" The Guilford Press. Third Edition.

Capitaine, et al. 2002. "Proceedings of the IERS Workshop on the Implementation of the New IAU Resolutions". IERS Technical Note No. 29, Frankfurt am Main.

Cioce V. et al. 2010. "Aprovechamiento de la infraestructura observacional SIRGAS-CON en Venezuela para el seguimiento del vapor de agua troposférico". Reunión SIRGAS 2010. Lima, Perú.

Cimbaro, S. 2008. "Procesamiento de Datos GPS con GAMIT-GLOBK. Centro de Procesamiento GMA. Grupo de Trabajo I – SIRGAS". Reunión SIRGAS 2008. Montevideo, Uruguay.

Cisneros, D. 2011. "Formulario Informativo de la Estación de Monitoreo Continuo RIOBAMBA – RIOP". Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador.

Cisneros, D. & Nocquet, J. 2011. "Campo de Velocidades del Ecuador obtenido a partir de medidas GPS de los últimos 15 años". Reunión SIRGAS 2012. Concepción, Chile.

DeMets, C., Gordon, R. & Argus, D., 1990. "Current plate motions". *Geophys. J. Int.* 101

Devore, J. 2008. "Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias". CENCAGE LEARNING. Octava Edición.

Drewes, H. & Heidbach, O. 2009. "The 2009 horizontal velocity model for South America and the Caribbean". IAG Scientific Assembly.

El Comercio. 2011. “Los heridos quedaron en el olvido”. Sección País. Vínculo web: [http://www.elcomercio.com/pais/heridos-quedaron-olvido\\_0\\_608339320.html](http://www.elcomercio.com/pais/heridos-quedaron-olvido_0_608339320.html).

Herring, T. 2012. “Montserrat GAMIT/GLOBK/Track Workshop” GAMIT-GLOBK Homepage. Vínculo web: <http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/Montserrat12/Index.htm>

Herring, T. & King, R. 2012. GAMIT-GLOBK Homepage. Vínculo web: <http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/>

Herring, T., King, R & McClusky, S. 2010. “Introduction to GAMIT/GLOBK. Release 10.4”. Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences. Massachusetts Institute of Technology.

Herring, T., King, R & McClusky, S. 2010. “GAMIT. Reference Manual – GPS Analysis at MIT”. Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences. Massachusetts Institute of Technology.

Herring, T., King, R & McClusky, S. 2010. “GLOBK. Reference Manual – Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program”. Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences. Massachusetts Institute of Technology.

Huerta, E., Mangiaterra, A. & Noguera, G. 2005. “GPS. Posicionamiento satelital” UNR Editora – Universidad Nacional del Rosario.

IGS. 2011. “Upcoming switch to IGS08/igs08.atx”. Vínculo web: <http://igs08.jpl.nasa.gov/pipermail/igs08mail/2011/007544.html>

IGS Analysis Center Coordinator (ACC). 2012. “Figures and Statistics from the IGS Final GPS Orbit Combination”. Vínculo web: [http://acc.igs.org/igsacc\\_final.html](http://acc.igs.org/igsacc_final.html)

Instituto de Matemática y Estadística "Prof. Ing. Rafael Laguardia". 2012. “TABLA DE LA DISTRIBUCION *t-Student* con *n* grados de libertad”. Vínculo web: <http://imerl.fing.edu.uy/pye/material/tablas/tablat.pdf>

Jackson, K. 1979. “Fitting of Mathematical Functions to Biomechanical Data”. IEEE Transactions on Biomedical Engineering. Volume BME-26. Pág. 122 – 124

Laboratoire d'etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales. 2011. “FES global tidal atlas distribution”. Archiving Service. Vínculo web: [http://www-apache.legos.obs-mip.fr/en/share/soa/cgi/getarc/v0.0/index.pl.cgi?contexte=SOA&donnees=maree&produit=modele\\_fes](http://www-apache.legos.obs-mip.fr/en/share/soa/cgi/getarc/v0.0/index.pl.cgi?contexte=SOA&donnees=maree&produit=modele_fes)



- Leica Geosystems AG. 2008. "Introducción al Sistema GPS (Sistema de Posicionamiento Global)". GPS Basics.
- Mackern, V. 2003. "Materialización de un Sistema de Referencia Geocéntrico de alta precisión mediante observaciones GPS". Tesis Doctoral.
- Montenegro, G. 2005. "Introducción al Filtro Kalman". Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá. Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas. Colección. Documentos de Economía.
- Muhammad, T. 1991. "A simple algorithm for fitting measured data to Fourier series models". International Journal of Mathematical Education in Science and Technology. Volume 24, Issue 1, 1993
- Mussi, J. 2005. "Europa lanzó el primer satélite de navegación civil". Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación Argentina. Vínculo web: <http://www.ambiente.gob.ar/default.asp?IdArticulo=1724>
- Naval Research Laboratory - USA. 2004. "NRL Ionosphere Model: SAMI3". Atmospheric Science and Technology. Vínculo web: <http://www.nrl.navy.mil/research/nrl-review/2004/atmospheric-science-and-technology/huba/>
- Niell, A. E. 1996. "Global Mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths". Journal of Geodesy, vol. 101.
- Parra, A. 2000. "Modelos de Series de Tiempo de Geodesia Espacial aplicados a la Dinámica de Placas Tectónicas". Universidad de los Andes. Colombia.
- Saastamoinen, J. "Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites". The Use of Artificial Satellites for Geodesy. Vol. 15
- Sánchez, L. 2008. "Introducción al uso del Software Bernese" Documentación no publicada. Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut – DGFI.
- Seeber, G. 2003. "Satellite Geodesy". Editorial de Gruyter. 2da Edición.
- Sevilla, M. 1987. "Colocación Mínimos Cuadrados". IV Curso de Geodesia Superior. Universidad Complutense de Madrid.
- SIRGAS. 2012. "Soluciones Multianuales de SIRGAS-CON" Vínculo Web: <http://www.sirgas.org/index.php?id=154>

- Smith, E. K. & Weintraub, S. 1953. "The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies". Proceedings of the I.R.E, vol. 41
- Spilker, J. 1980. "GPS signal structure and performance characteristics". Navigation USA.
- Tierra, A. 2010. "Modelo de Velocidades usando una Red Neuronal Artificial". Reunión SIRGAS 2010. Lima, Perú.
- Tregoning, P. 2005. "Atmospheric pressure loading corrections applied to GPS data at the observation level". Geophysical Research Letters. Vol. 32 L22310.
- Universidad Tecnológica Nacional de Argentina. 2012 "Tabla de valores críticos de la distribución F (Fisher) a un nivel de confianza del 95%". Vínculo Web: <http://www.mat.uda.cl/hsalinas/cursos/2008/probabilidad/TablaF05.pdf>
- Vigny, C., et. al. 2011. "The 2010 Mw 8.8 Maule Mega-Trust Earthquake of Central Chile, Monitored by GPS". ScienceXpressReport.
- Viteri, A. & Tierra, A. 2011. "Control de calidad de archivos RINEX con TEQC". Revista Digital del VII Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE 2012. Sangolquí – Ecuador.
- Wikipedia. La Enciclopedia Libre. 2012. "Serie temporal". Categoría. Análisis de series temporales. Vínculo Web. [http://es.wikipedia.org/wiki/Serie\\_temporal](http://es.wikipedia.org/wiki/Serie_temporal)
- Wübbena, G. 1991. "Zur Modellierung von GPS Beobachtungen für die hochgenaue Positions- bestimmung". Wiss. Arb. Univ. Hannover.
- Zurita, P. 2011. "Avances ecuatorianos en el ámbito geodésico". Reunión SIRGAS 2011. Heredia, Costa Rica.



ERROR: undefinedfilename

OFFENDING COMMAND: C:\Users\ESPE\AppData\Local\Temp\PDFCreator\Spool\6733F2B398F4431AA3

STACK: