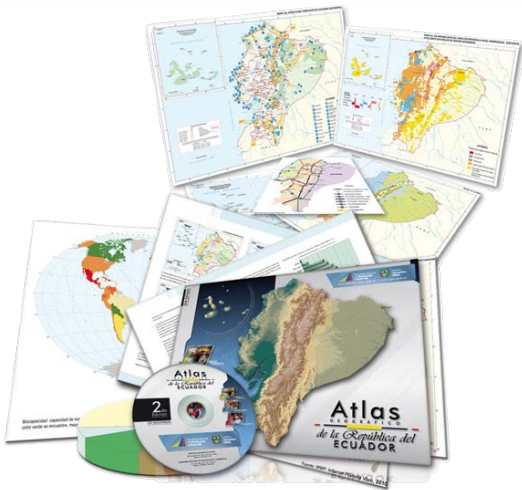




I N S T I T U T O

*Geográfico Militar*



en cooperación con:



y el auspicio de:



# GENERACIÓN DE MODELOS LOCALES DE CORRECCIÓN EN LA DEFINICIÓN DEL MARCO DE REFERENCIA GEODÉSICO DEL ECUADOR

## SIMPOSIO SIRGAS 2014

La Paz, Bolivia. 24 – 26 Noviembre 2014

<sup>1</sup> Pilapanta, C., <sup>2</sup> Tierra, A. & <sup>1</sup> Romero, R.

<sup>1</sup> Instituto Geográfico Militar del Ecuador. Quito – Ecuador

<sup>2</sup> Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE. Sangolquí – Ecuador



I N S T I T U T O

*Geográfico Militar*



Secretaría Nacional  
de Educación Superior,  
Ciencia, Tecnología e Innovación



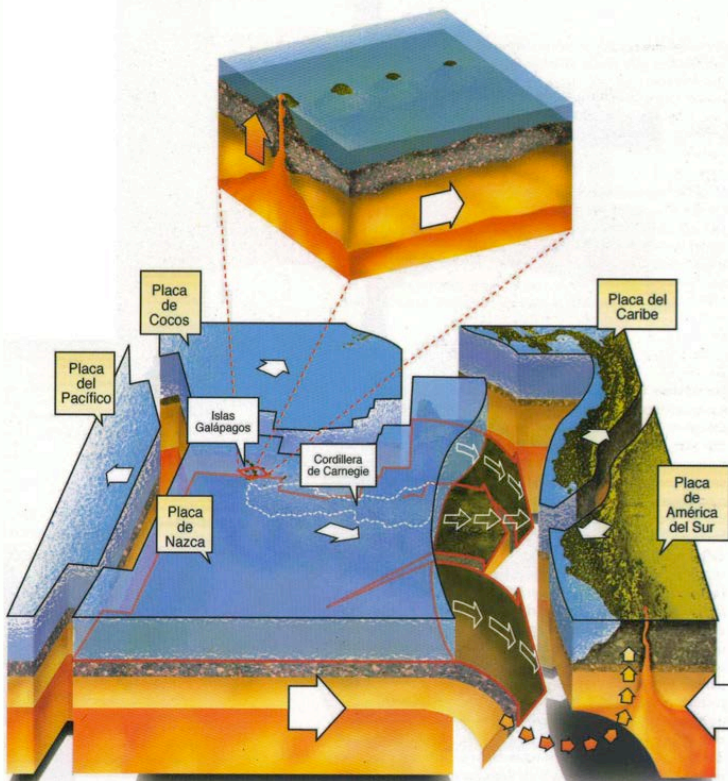
Ministerio  
de Defensa  
Nacional



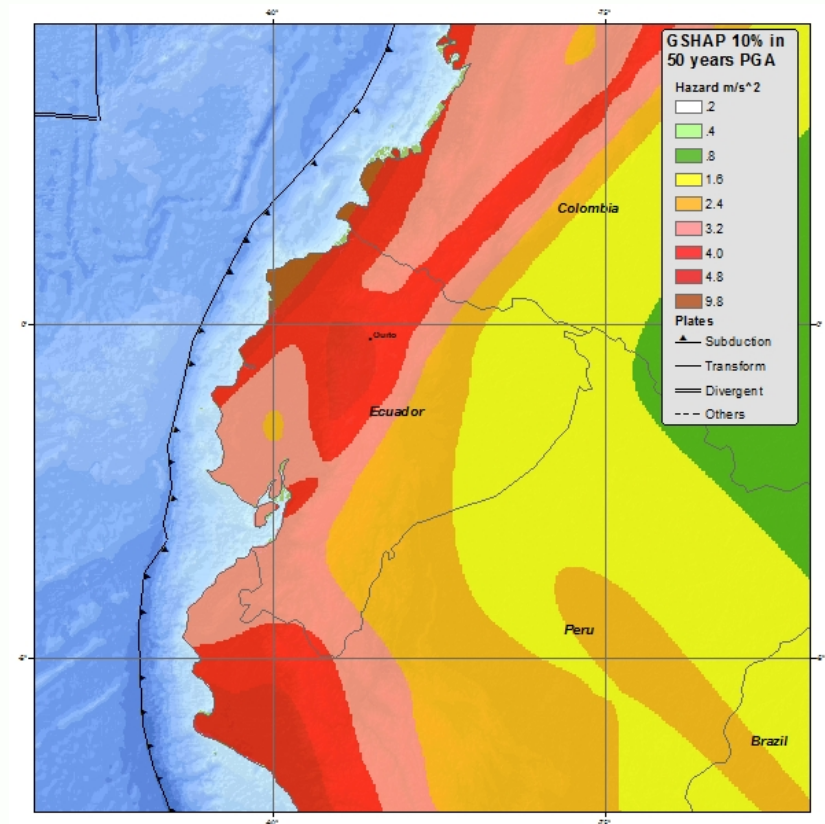
**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# GENERALIDADES

## PROCESOS GEODINÁMICOS DEL ECUADOR



Fuente: Gallardo & Toulkeridis, T. 2008



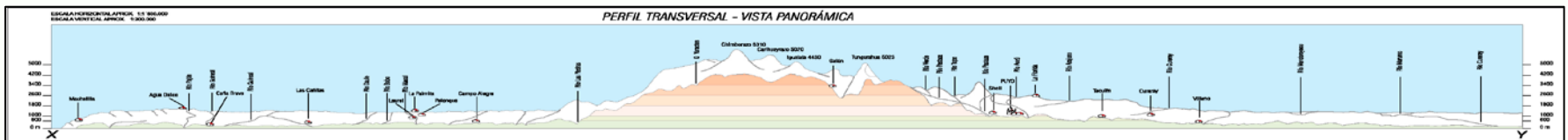
Fuente: USGS. 2014





I N S T I T U T O  
Geográfico Militar

# VARIABILIDAD CLIMATOLÓGICA DEL ECUADOR



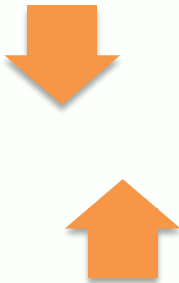
Fuente: Ministerio de Turismo. 2014 & IGM. 2012



I N S T I T U T O  
*Geográfico Militar*

## MODELO GENERAL DE PROCESAMIENTO Y MODELAMIENTO

- ✓ Petit, G. & Luzum, B. 2010. "IERS Conventions (2010)". IERS Technical Note No. 36



- ✓ Sánchez, L. et al. 2013. "Guía para los Centros de Análisis SIRGAS". Sitio web: [www.sirgas.org](http://www.sirgas.org)



I N S T I T U T O

Geográfico Militar



Secretaría Nacional  
de Educación Superior,  
Ciencia, Tecnología e Innovación



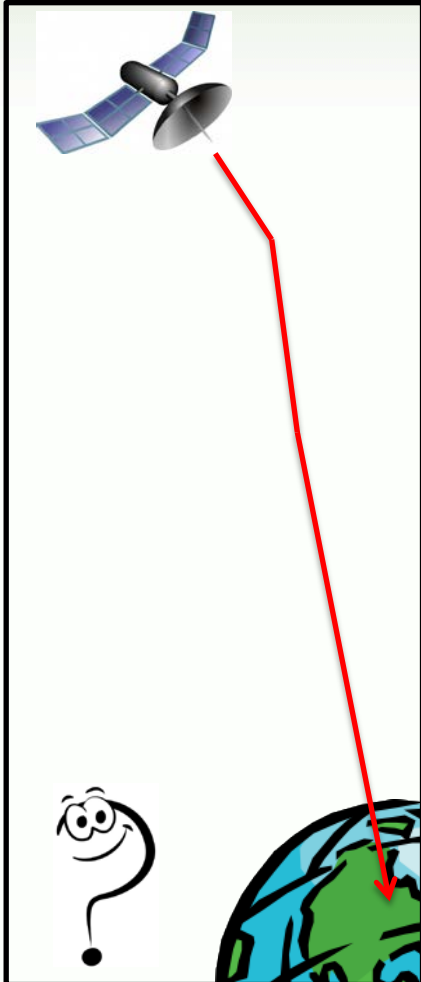
Ministerio  
de Defensa  
Nacional



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## MODELO GENERAL DE PROCESAMIENTO Y MODELAMIENTO





#### Errores en la posición del satélite

- Efemérides Precisas

#### Errores instrumentales en el satélite

- ✓ Reloj
- ✓ Variaciones del centro de fase
- Posicionamiento Diferencial. Parametrización
- Calibración de antenas emisoras

#### Propagación de la señal

- ✓ **Tropósfera**
- ✓ Ionósfera
- ✓ Multicamino (satélite y receptor)
- **Modelamiento. Efecto Troposférico**
- Modelamiento. Efecto Ionosférico
- Selección del lugar. Parametrización

#### Variaciones de la posición del receptor

- ✓ Mareas Terrestres
- ✓ Carga oceánica y atmosférica
- ✓ Movimientos Tectónicos
- Modelamiento de variaciones
- Modelamiento de cargas
- Aplicación de velocidades lineales

#### Errores instrumentales en el receptor

- ✓ Reloj
- ✓ Variaciones del centro de fase
- Posicionamiento Diferencial. Parametrización
- Calibración de antenas receptoras

#### Ruidos

- ✓ Saltos de Ciclo
- ✓ Propagación entre canales
- ✓ Interferencias y otros
- Resolución de ambigüedades
- Mejoramiento de los equipos
- Medidas prácticas

Fuente: Sanchez, L. 2008



# ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD CLIMATOLÓGICA DEL ECUADOR

## CASO DE ESTUDIO. ESTACIÓN DE MONITOREO CONTINUO EPEC

RETRASO TROPOSFÉRICO TOTAL. ESTACIÓN GNSS DE MONITOREO CONTINUO ESPE  
COMPARACIÓN ENTRE MODELOS GPT2 Y RINEX METEOROLÓGICO

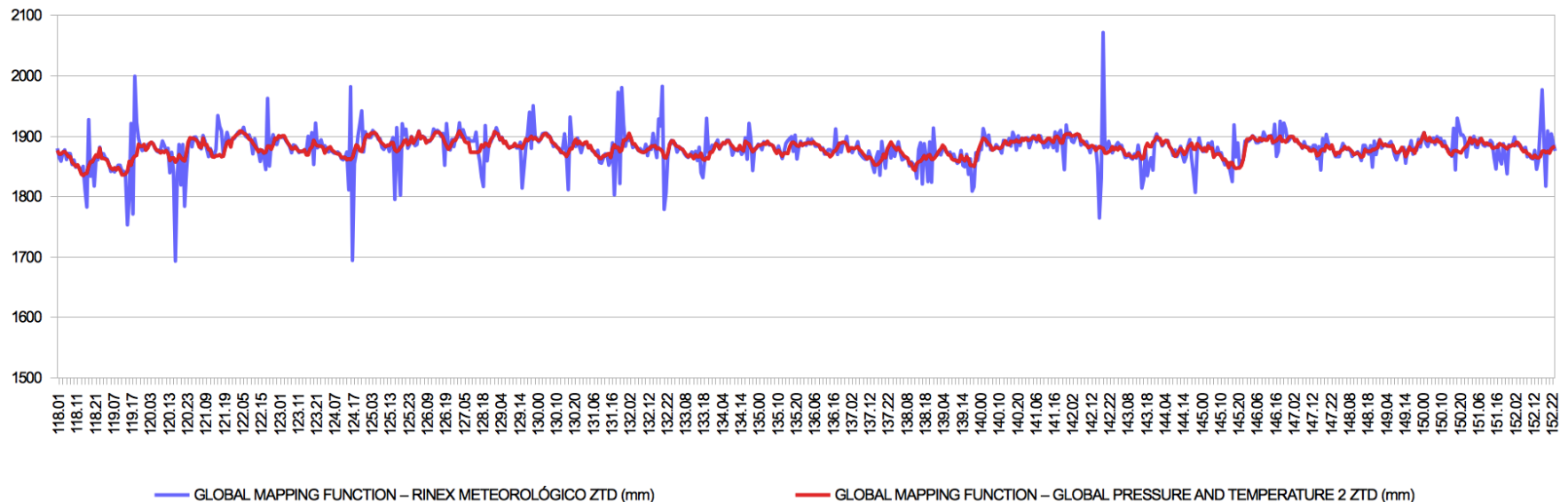


Figura 1.1 Serie Temporal de la Variable de Retraso Troposférico calculada en la Estación GNSS EPEC

Fuente: Pilapanta, C. & Tierra, A. 2012





I N S T I T U T O

*Geográfico Militar*



Secretaría Nacional  
de Educación Superior,  
Ciencia, Tecnología e Innovación



Ministerio  
de Defensa  
Nacional



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# DESARROLLO

# INFRAESTRUCTURA GEODÉSICA DEL ECUADOR

## RED GNSS DE MONITOREO CONTINUO DEL ECUADOR. REGME

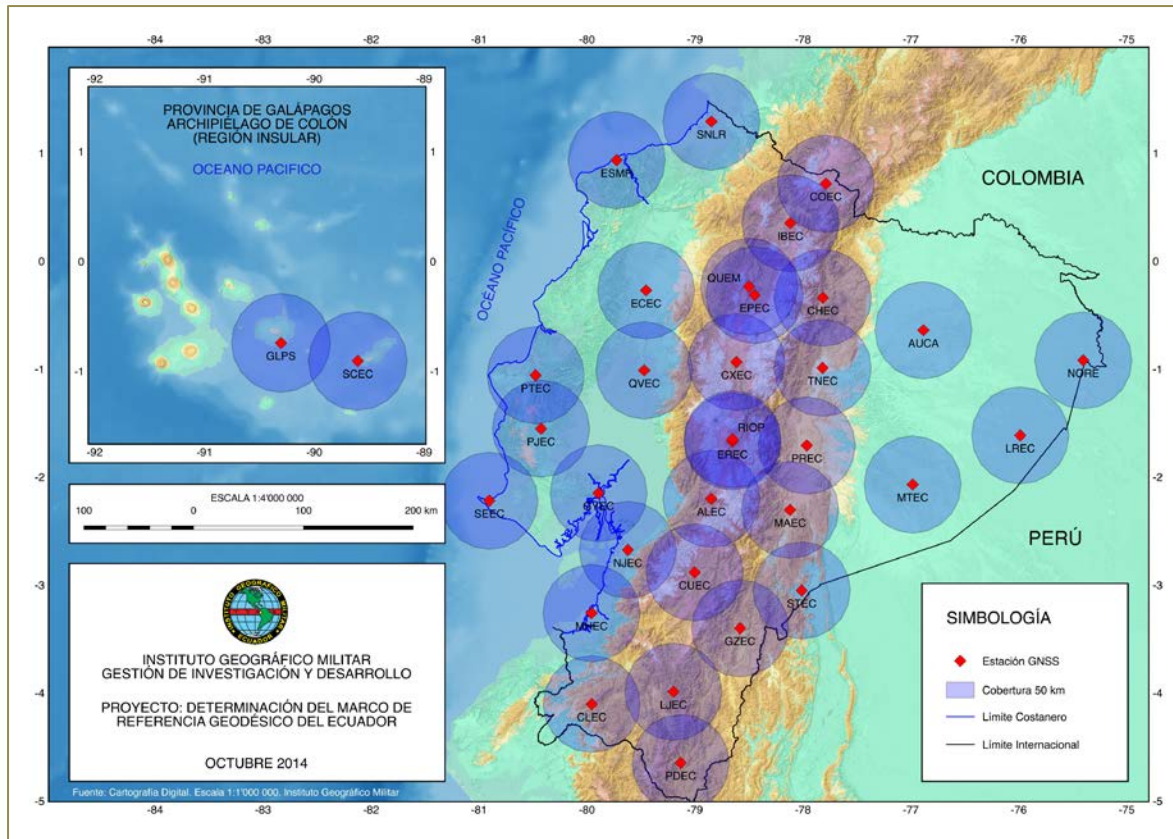


Figura 2.1. Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador. REGME

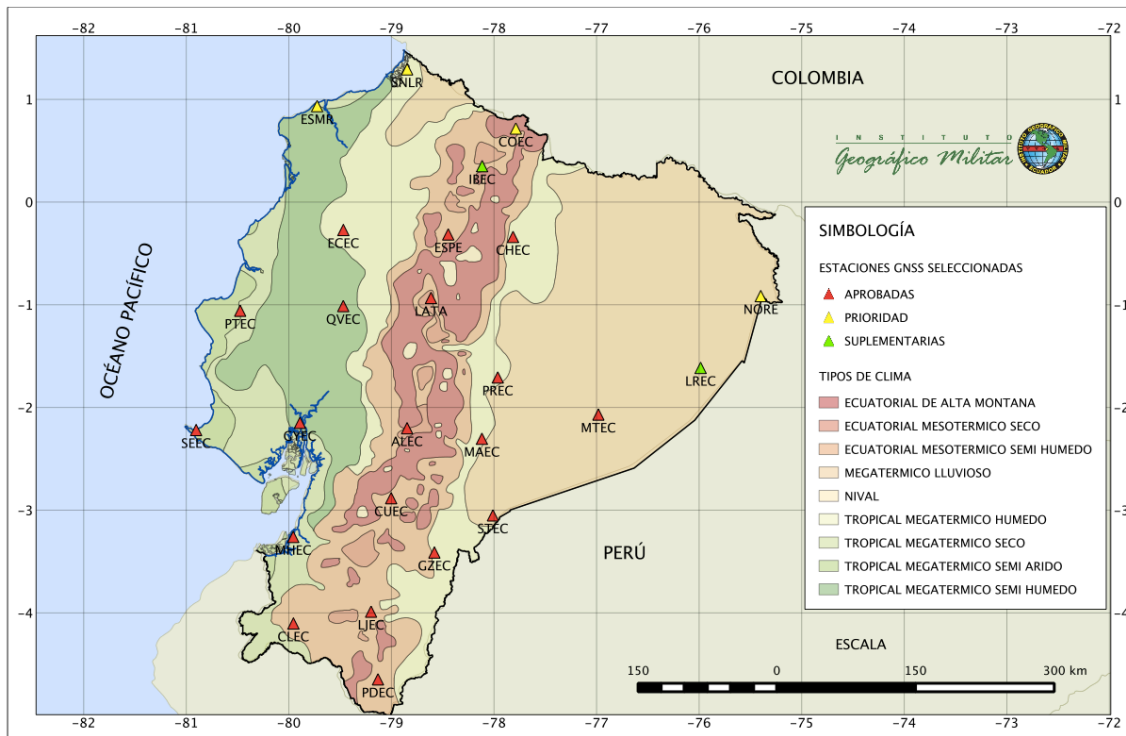
Fuente: IGM. 2013

## REGME EN LA ACTUALIDAD

- ✓ TOTAL IGM  
20 ESTACIONES GNSS
- ✓ RED CONTINENTAL SIRGAS  
32 ESTACIONES GNSS  
(10 ESTACIONES. SOL. SIR11P01)
- ✓ RED MUNDIAL IGS  
02 ESTACIONES GNSS  
- GLPS = UNAVCO  
- RIOP = IGEPN
- ✓ POLIEDRO MUNDIAL IGb08  
01 ESTACIONES GNSS (GLPS)

## ZONAS CLIMATOLÓGICAS DEL ECUADOR

ESTACIONES GNSS DE MONITOREO CONTINUO DEL ECUADOR CON SISTEMA DE MEDICIÓN METEOROLÓGICO MET4A



Fuente: Cartografía Digital IGM. Escala 1:1'000.000 / Información Digital Red de Monitoreo Continuo del Ecuador - REGME

Elaborado por: Christian C. Pilapanta Amagua. Gestión de Investigación y Desarrollo - IGM

Figura 2.2. Mapa de Zonas Climáticas del Ecuador

Fuente: IGM. 2013

SE ESTABLECE UNA NECESIDAD ...

- ✓ DETERMINAR LAS ZONAS CLIMÁTICAS (MICROCLIMAS), A FIN DE ESTABLECER UNA RED METEOROLÓGICA DE ALTA PRECISIÓN INTERCONECTADA A LA RED GNSS DE MONITOREO CONTINUO DEL ECUADOR.
- ✓ MEJORAMIENTO EN LA PRECISIÓN DE LAS SOLUCIONES POSICIONALES, A FIN DE ESTABLECER COORDENADAS MUCHO MÁS ESTABLES (Y CERCANAS A LA REALIDAD).



# INFRAESTRUCTURA GNSS – MET DEL ECUADOR

## RED GNSS - MET DE MONITOREO CONTINUO DEL ECUADOR. REGME

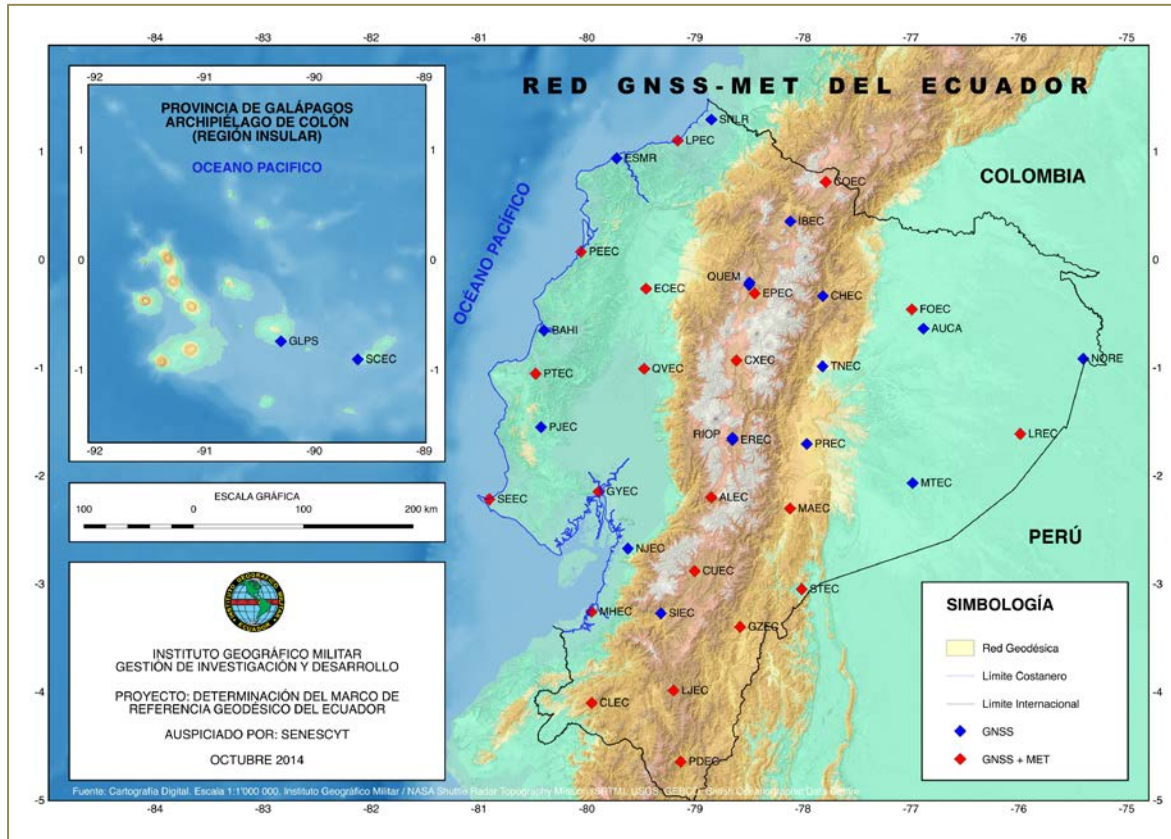


Figura 2.3. Red GNSS - MET de Monitoreo Continuo del Ecuador. REGME

Fuente: IGM. 2013

## REGME – MET EN LA ACTUALIDAD

✓ 21 SISTEMAS DE MEDICIÓN  
METEORÓLOGICOS INTERCONECTADOS A  
LA INFRAESTRUCTURA GEODÉSICA  
NACIONAL

✓ MEDICIONES Y/O VALORES

PRESIÓN  
TEMPERATURA  
HUMEDAD RELATIVA

✓ INTERVALO

01 MINUTO  
15 MINUTOS



## INFRAESTRUCTURA GNSS – MET DEL ECUADOR

RED GNSS - MET DE MONITOREO CONTINUO DEL ECUADOR. REGME



Figura 2.4. Red GNSS - MET de Monitoreo Continuo del Ecuador. REGME

Fuente: IGM. 2013

### REGME – MET EN LA ACTUALIDAD

✓ 21 SISTEMAS DE MEDICIÓN  
METEORÓLOGICOS INTERCONECTADOS A  
LA INFRAESTRUCTURA GEODÉSICA  
NACIONAL

✓ MEDICIONES Y/O VALORES

PRESIÓN

TEMPERATURA

HUMEDAD RELATIVA

✓ INTERVALO

01 MINUTO

15 MINUTOS



I N S T I T U T O

*Geográfico Militar*



Secretaría Nacional  
de Educación Superior,  
Ciencia, Tecnología e Innovación



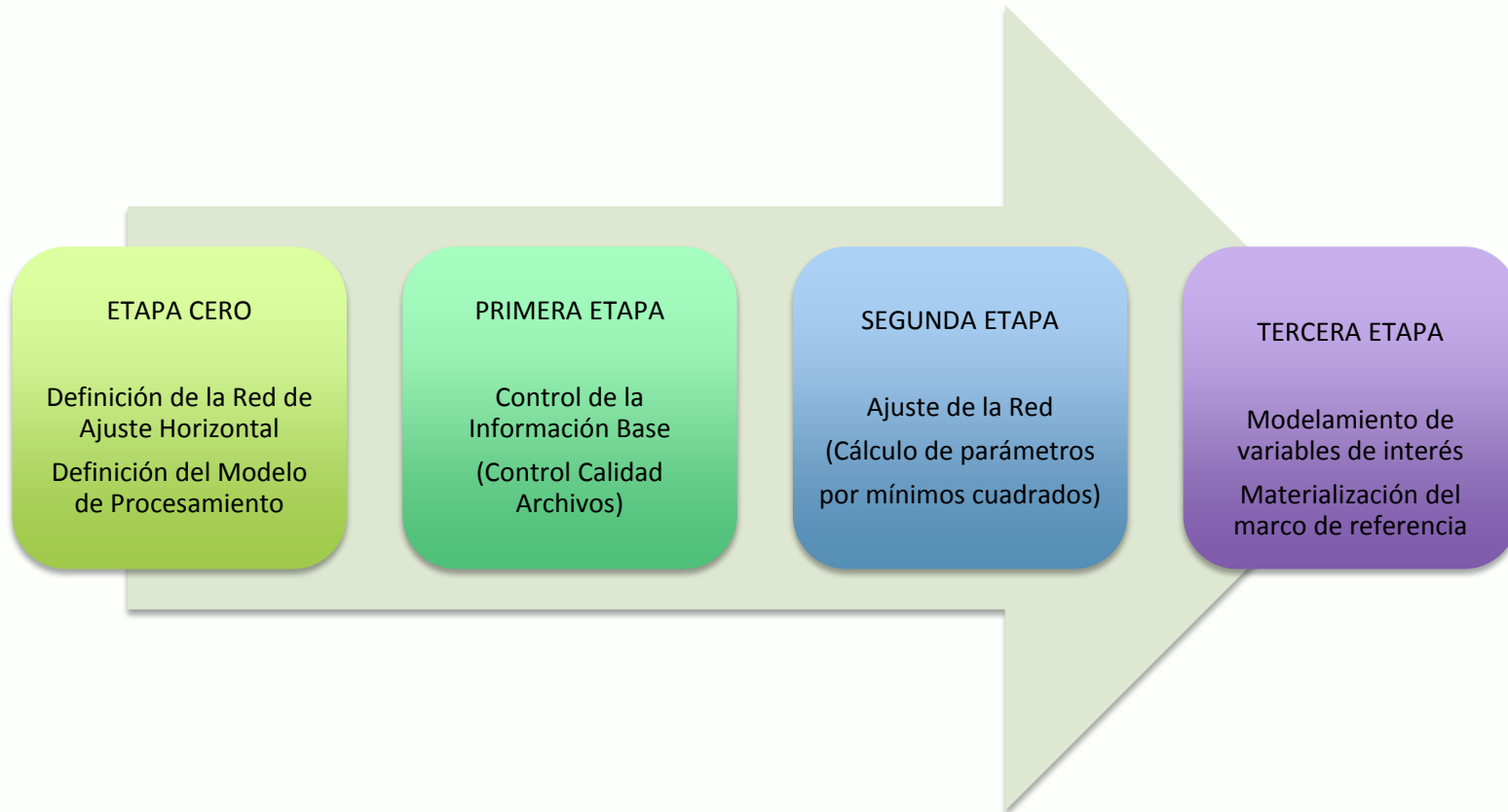
Ministerio  
de Defensa  
Nacional



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## ETAPAS PRINCIPALES DEL PROCESO

### MODELO GENERAL DE PROCESAMIENTO





I N S T I T U T O  
*Geográfico Militar*

## ETAPA CERO. DETERMINACIÓN DE LA RED DE AJUSTE FUNDAMENTAL

Estaciones IGB08 CORE

Código	Estación	País
BRAZ	Brasilia	Brasil
BRFT	Eusebio	Brasil
BRMU	Bermuda	Reino Unido
CONZ	Concepción	Chile
GLPS	Galápagos	Ecuador
ISPA	Isla de Pascua	Chile
LPGS	La Plata	Argentina
MDO1	Fort Davis	Estados Unidos
USNO	Washington	Estados Unidos

RED REGIONAL SIRGAS - CON

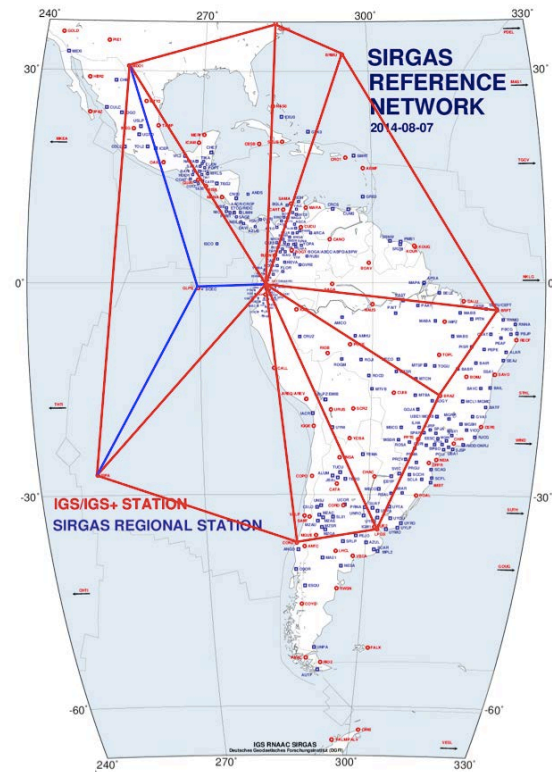
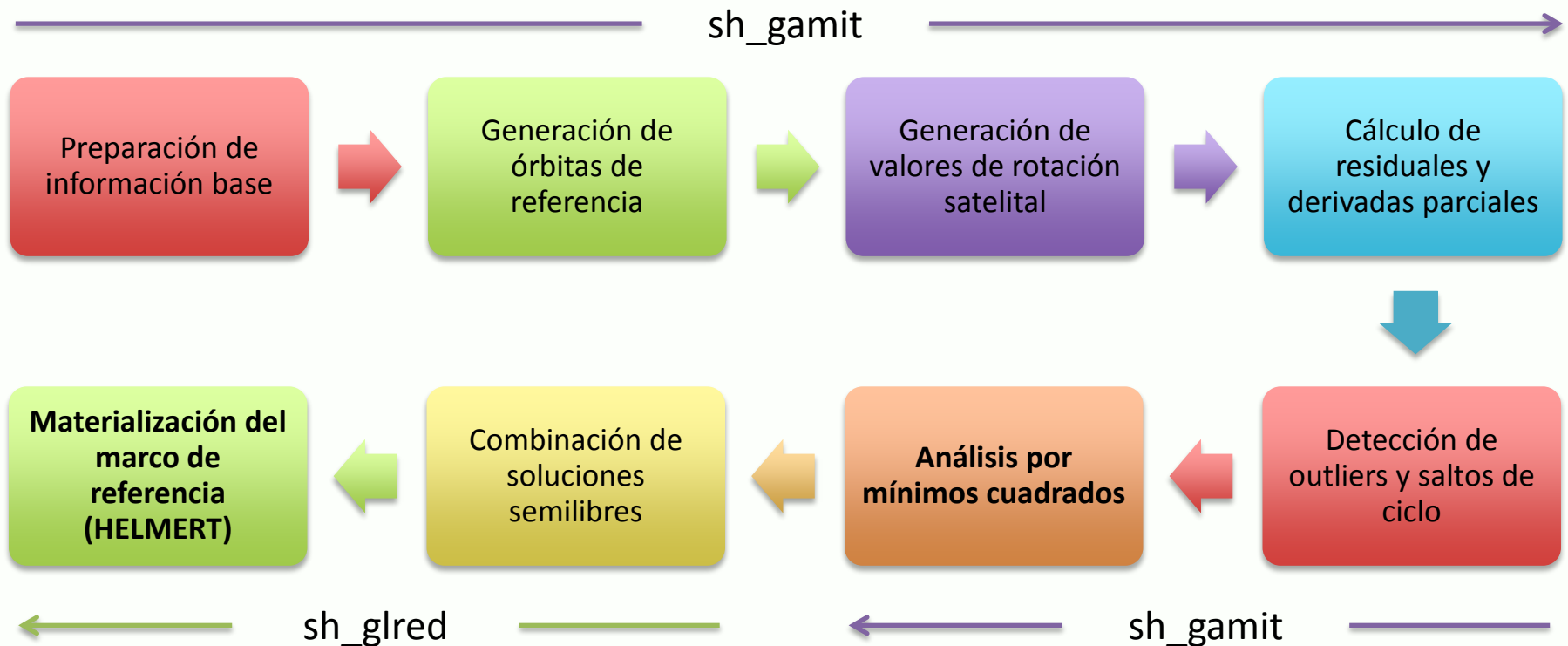


Figura 2.5. Red GNSS Regional. Red SIRGAS - CON

Fuente: SIRGAS. 2014



## ETAPA CERO. DEFINICIÓN DEL MODELO GENERAL DE PROCESAMIENTO



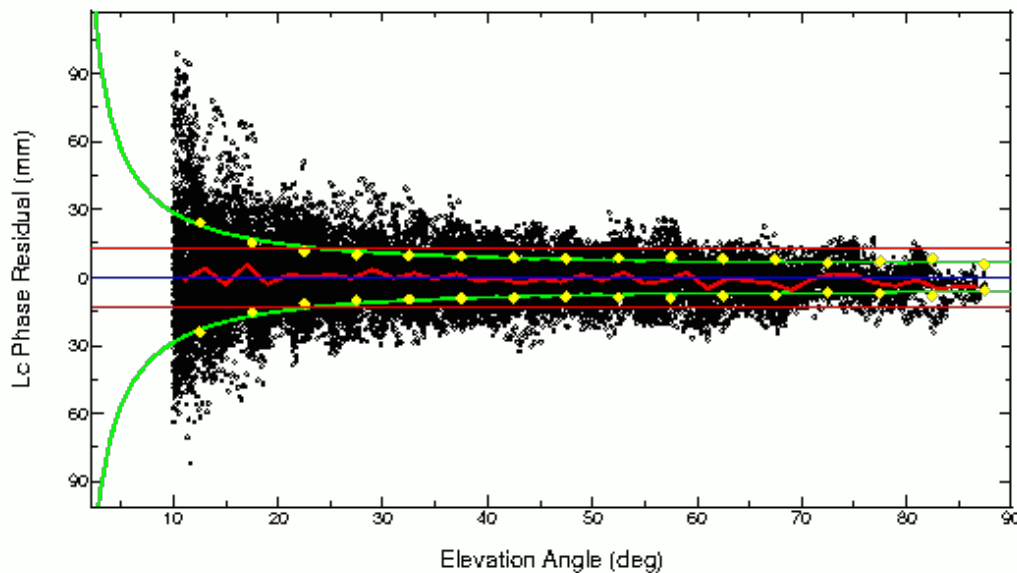
**SOFTWARE PRINCIPAL. GAMIT – GLOBK. VERSIÓN 10.5**



# PRIMERA ETAPA. CONTROL DE CALIDAD DE LA INFORMACIÓN

## ANÁLISIS DE RESIDUALES Y ÁNGULOS DE ELEVACIÓN

ESPE RMS=12.7mm error model  $a^2+b^2/(\sin(\text{elev}))^2$   $a=4.4\text{mm}$   $b=4.9\text{mm}$   
rms (mm) rms (mm) rms (mm)



### PARÁMETROS:

1. Línea verde

Límites de tolerancia (Tendencia - Ruido)

2. Línea roja

Media de errores y cuartiles

3. Puntos negros

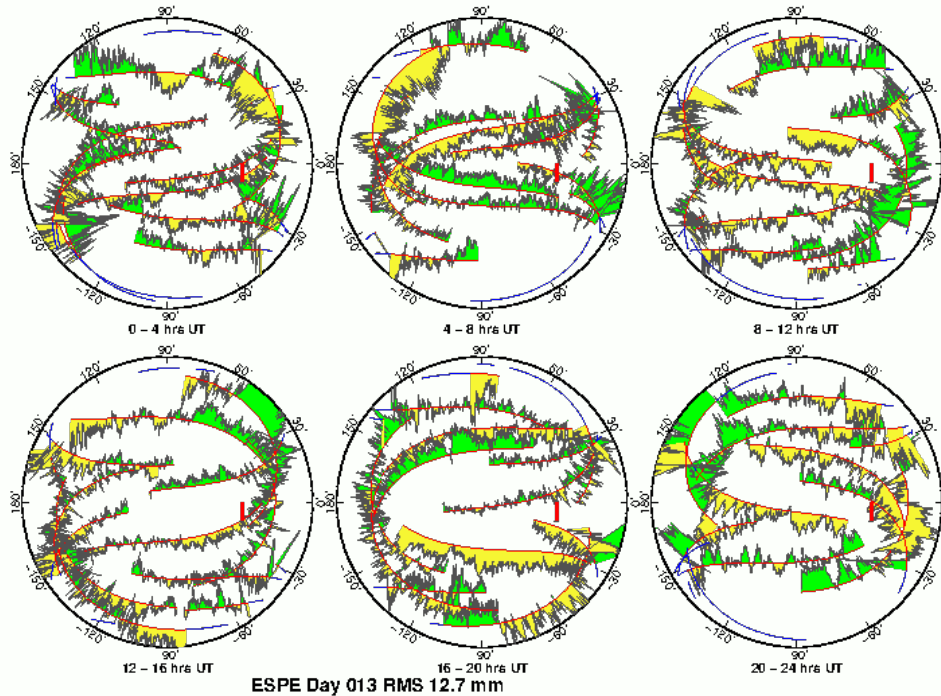
Residuales a diferentes ángulos de elevación

Figura 2.6 Gráficas de Control Básicas. Análisis de la Calidad del Sitio de Interés

Fuente: Pilapanta, C. & Tierra, A. 2012

# PRIMERA ETAPA. CONTROL DE CALIDAD DE LA INFORMACIÓN

## ANÁLISIS TEMPORAL DE RESIDUALES



### PARÁMETROS:

1. Zonas verdes

Residuales positivos

2. Zonas amarillas

Residuales negativos

3. Barra roja

Escala (5 mm)

GM 2013 Apr 28 11:55:32 ESPE DPM LC Residual Scale 0.5 Tick 19 mm

Figura 2.7. Gráficas de Control Básicos. Análisis de la Calidad de una Estación ubicada en un lugar despejado

Fuente: Pilapanta, C. & Tierra, A. 2012

## SEGUNDA ETAPA. CÁLCULO DE LAS OBSERVACIONES

- ✓ Linealización de las observaciones
- ✓ Determinación del modelo estocástico (Estimación a priori de la calidad)

$$\Sigma = \sigma_0^2 Q_{bb}$$

- ✓ Cálculo de los parámetros iniciales mediante el método de mínimos cuadrados.

$$V^T P V = \text{mínimo}$$

- ✓ Análisis de la matriz varianza – covarianza de los parámetros

$$K_{xx} = \sigma_0^2 Q_{xx}$$

- ✓ Cálculo del error medio de las coordenadas

$$\sigma_x = \sigma_0 Q_{xx}$$

$q_{X1X1}$	$q_{X1Y1}$	$q_{X1X2}$	$q_{X1Y2}$	$q_{X1X3}$	$q_{X1Y3}$	...	$q_{X1XP}$	$q_{X1YP}$
$q_{Y1X1}$	$q_{Y1Y1}$	$q_{Y1X2}$	$q_{Y1Y2}$	$q_{Y1X3}$	$q_{Y1Y3}$	...	$q_{Y1XP}$	$q_{Y1YP}$
$q_{X2X1}$	$q_{X2Y1}$	$q_{X2X2}$	$q_{X2Y2}$	$q_{X2X3}$	$q_{X2Y3}$	...	$q_{X2XP}$	$q_{X2YP}$
$q_{Y2X1}$	$q_{Y2Y1}$	$q_{Y2X2}$	$q_{Y2Y2}$	$q_{Y2X3}$	$q_{Y2Y3}$	...	$q_{Y2XP}$	$q_{Y2YP}$
$q_{X3X1}$	$q_{X3Y1}$	$q_{X3X2}$	$q_{X3Y2}$	$q_{X3X3}$	$q_{X3Y3}$	...	$q_{X3XP}$	$q_{X3YP}$
$q_{Y3X1}$	$q_{Y3Y1}$	$q_{Y3X2}$	$q_{Y3Y2}$	$q_{Y3X3}$	$q_{Y3Y3}$	...	$q_{Y3XP}$	$q_{Y3YP}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...
$q_{XPX1}$	$q_{XPY1}$	$q_{XPX2}$	$q_{XPY2}$	$q_{XPX3}$	$q_{XPY3}$	...	$q_{XPXP}$	$q_{XPYP}$
$q_{YPX1}$	$q_{YPY1}$	$q_{YPX2}$	$q_{YPY2}$	$q_{YPX3}$	$q_{YPY3}$	...	$q_{YPXP}$	$q_{YPYP}$

Figura 2.8. 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

## TERCERA ETAPA. MODELAMIENTO DE LAS VARIABLES DE INTERÉS

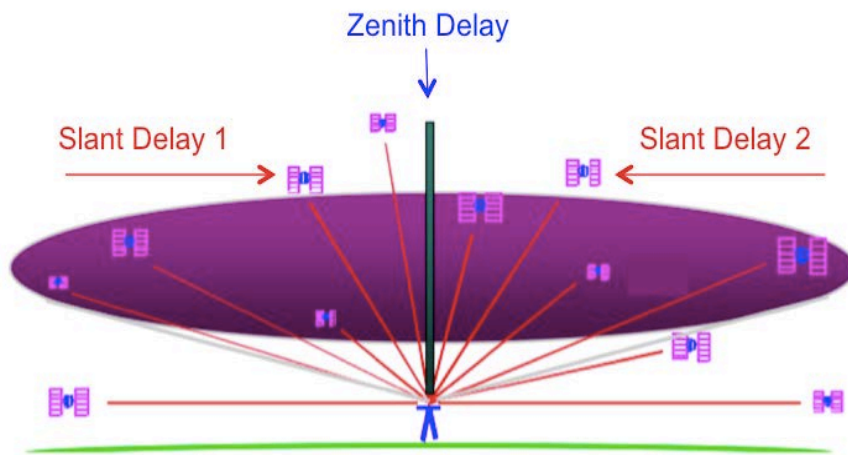


Figura 2.10. Principio básico del proceso de refracción troposférica

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

$$\delta\rho_{trop}^0 = 10^{-6} \int N(s) ds$$

Retraso Troposférico Cenital

O mediante el modelo simplificado:

$$\delta\rho_{trop}^0 = \frac{2277 \times 10^{-6}}{\cos Z} \left( P + \left\{ \frac{1255}{T} + 0,05 \right\} \cdot e^{-1,16 \tan^2 z} \right)$$

Modelo de Saastamoinen (1972)

Donde:

- P** Presión
- T** Temperatura
- z** Ángulo de elevación

$$\delta\rho_{trop}(z) = m_{t,d}(z) \delta\rho_{trop,d}^0 + m_{t,w}(z) \delta\rho_{trop,w}^0$$



## TERCERA ETAPA. MODELAMIENTO DE LAS VARIABLES DE INTERÉS

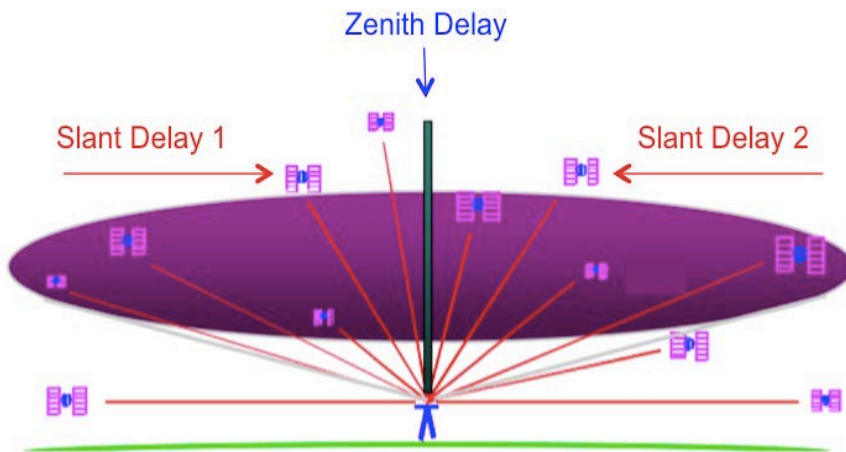


Figura 2.10. Principio básico del proceso de refracción troposférica

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

**Table 1** The “best average” values of the  $k_1$ ,  $k_2$ , and  $k_3$  coefficients in Eq. (15), as presented by Rüeger (2002a,b)

	$k_1$ (K/hPa)	$k_2$ (K/hPa)	$k_3$ (K <sup>2</sup> /hPa)
375 ppm CO <sub>2</sub>	77.6890	71.2952	375463
392 ppm CO <sub>2</sub>	77.6900	71.2952	375463

For  $k_1$  two values are given corresponding to two different carbon dioxide concentrations: 375 ppm (2004 level, used by Rüeger (2002a,b) and 392 ppm (2012 level)

Ecuación General. Vapor de Agua

$$PW = \frac{IWV}{\rho_{w,fl}}$$

$$IWV = \Pi \Delta L_w^z,$$

$$\Pi = \frac{10^6 M_w}{\left[ k'_2 + \frac{k_3}{T_m} \right] R}$$

Donde:

$\rho_{w,fl}$  Densidad del agua (kg/m<sup>3</sup>)

## TERCERA ETAPA. MODELAMIENTO DE LAS VARIABLES DE INTERÉS

### SOL. POST-PROCESAMIENTO Y SOL. TIEMPO REAL

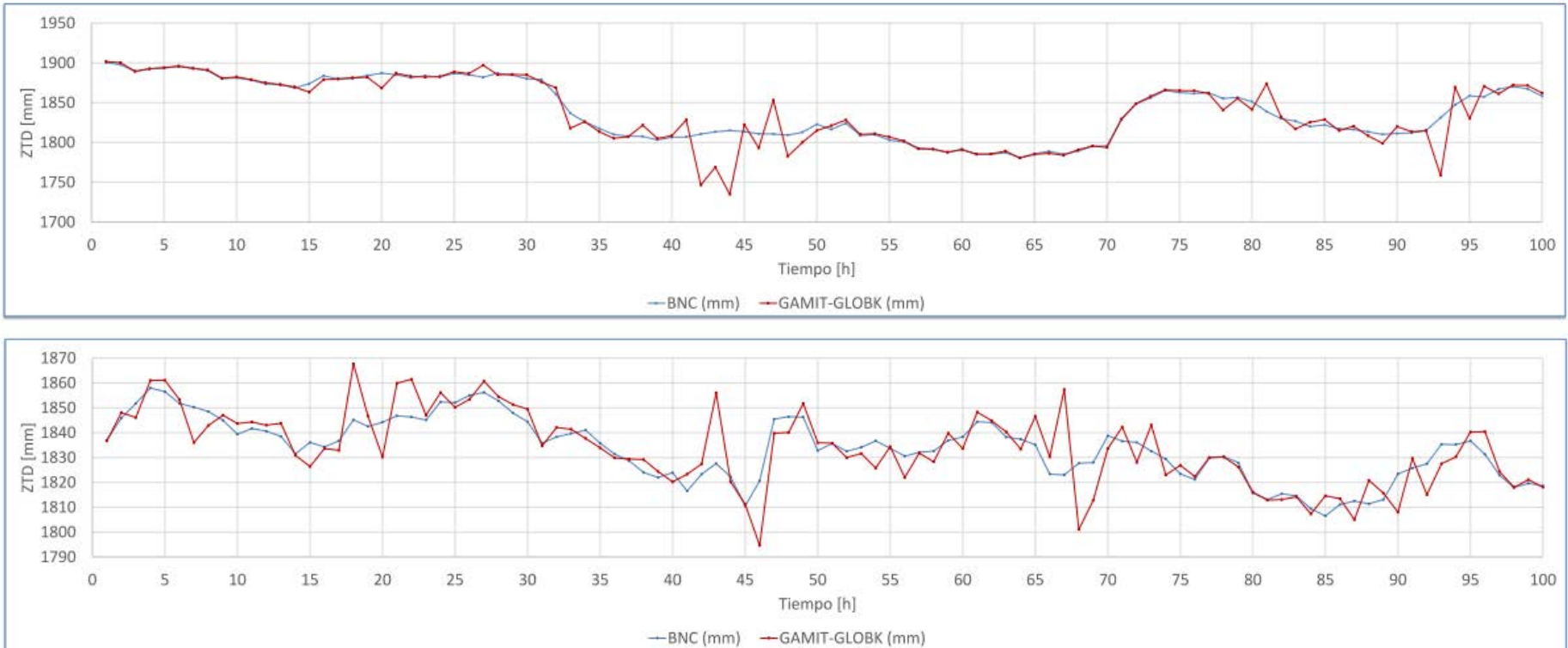


Figura 2.11. Series temporales de la variable de retraso troposférico para las Estaciones GNSS EPEC

## TERCERA ETAPA. MODELAMIENTO DE LAS VARIABLES DE INTERÉS

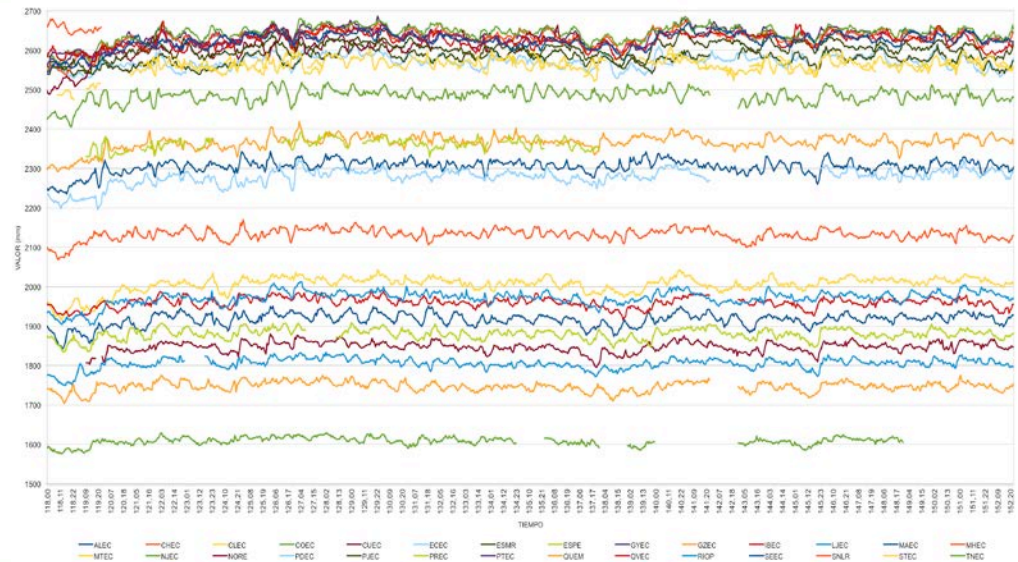
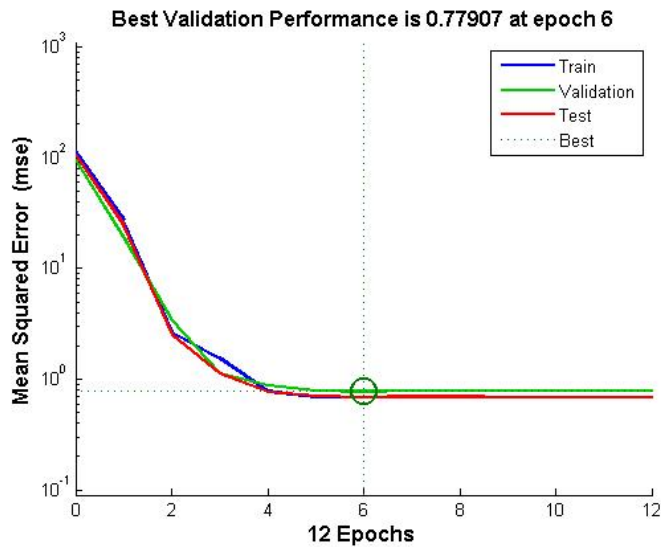
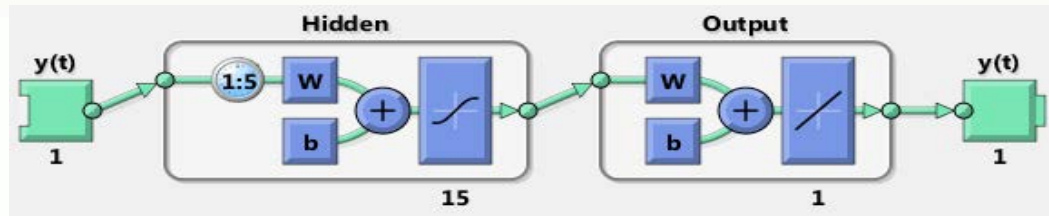


Figura 2.12. Series temporales de la variable de retraso troposférico para las Estaciones GNSS que conforman la REGME

Fuente: Pilapanta, C. & Tierra, A. 2014



## TERCERA ETAPA. MODELAMIENTO DE LAS VARIABLES DE INTERÉS

### ETAPAS DE ENTRENAMIENTO, GENERALIZACIÓN Y APRENDIZAJE

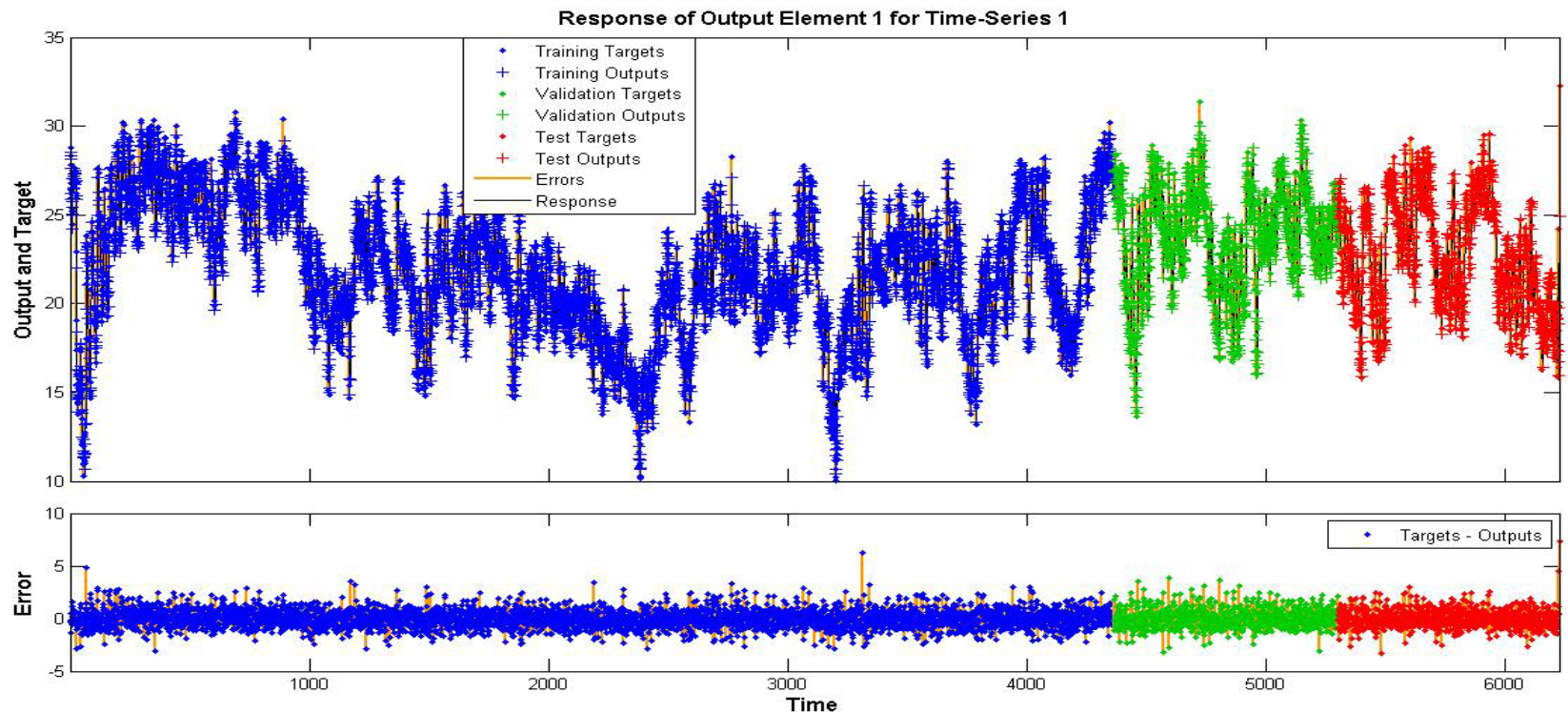


Figura 2.13. Modelamiento de la Serie Temporal. Conjuntos de entrenamiento, generalización y aprendizaje





I N S T I T U T O  
*Geográfico Militar*

## TERCERA ETAPA. MODELAMIENTO DE LAS VARIABLES DE INTERÉS

### RESIDUALES Y ESTADÍSTICAS GENERALES DEL MODELAMIENTO

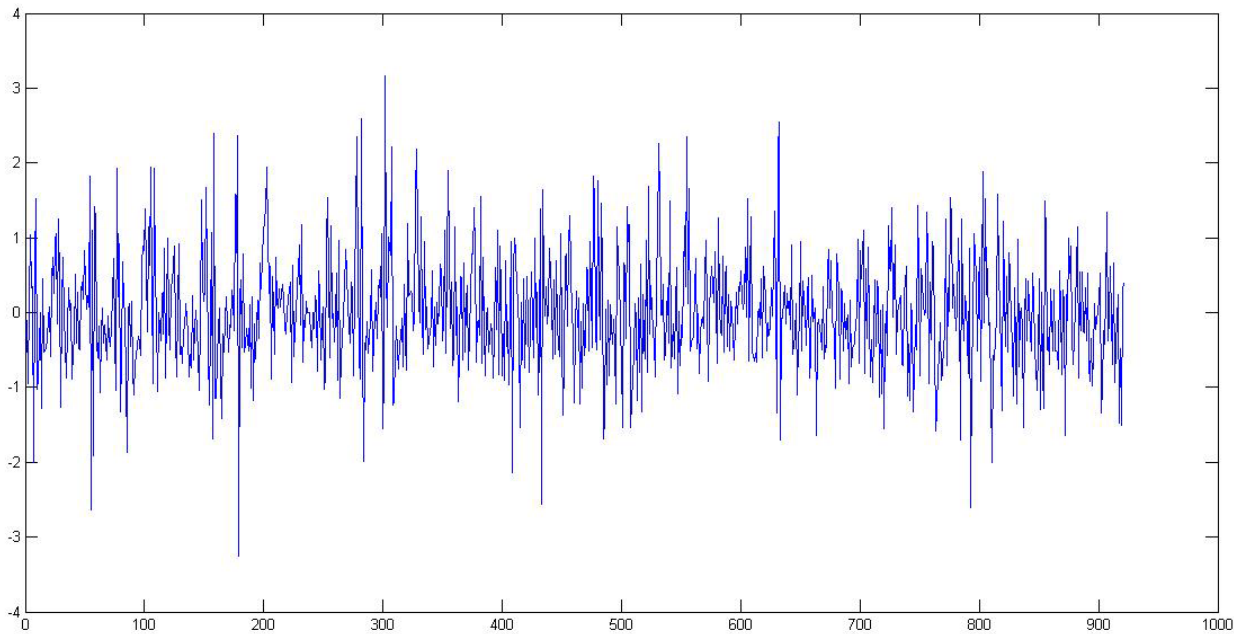


Figura 2.14. Residuales del Modelamiento

Estadístico	Valor
Media	0,01 mm
Desviación E.	0,78 mm
Máximo	3,03 mm
Mínimo	-3,20 mm

## TERCERA ETAPA. MATERIALIZACIÓN DE LA SOLUCIÓN

### RED GNSS DE MONITOREO CONTINUO DEL ECUADOR. REGME

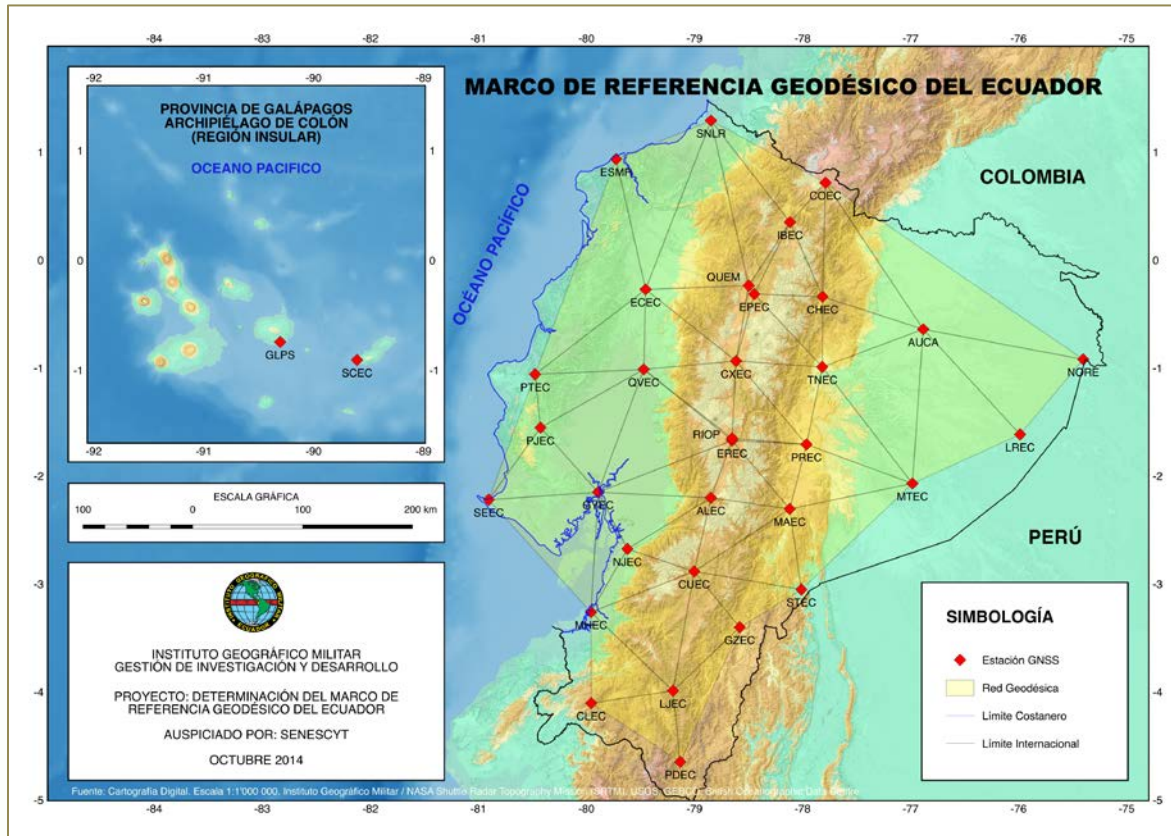
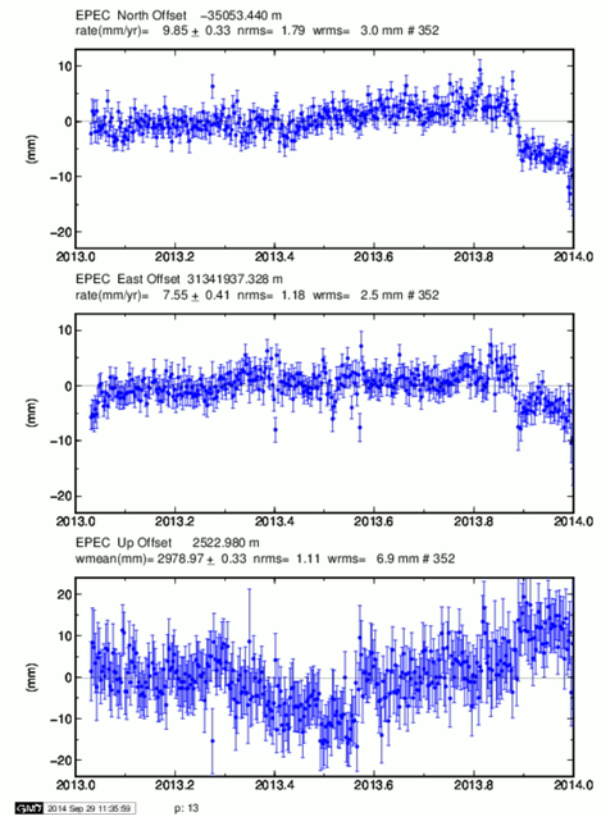


Figura 2.15. Red Fundamental de Ajuste Calculada

Fuente: IGM. 2013





I N S T I T U T O

*Geográfico Militar*



Secretaría Nacional  
de Educación Superior,  
Ciencia, Tecnología e Innovación



Ministerio  
de Defensa  
Nacional



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# RESULTADOS



I N S T I T U T O

Geográfico Militar



Secretaría Nacional  
de Educación Superior,  
Ciencia, Tecnología e Innovación



Ministerio  
de Defensa  
Nacional



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## DIFERENCIAS SEMANALES POR SEMANA

### COMPARACIÓN ENTRE SOLUCIÓN CALCULADA Y SOLUCIÓN SIRGAS

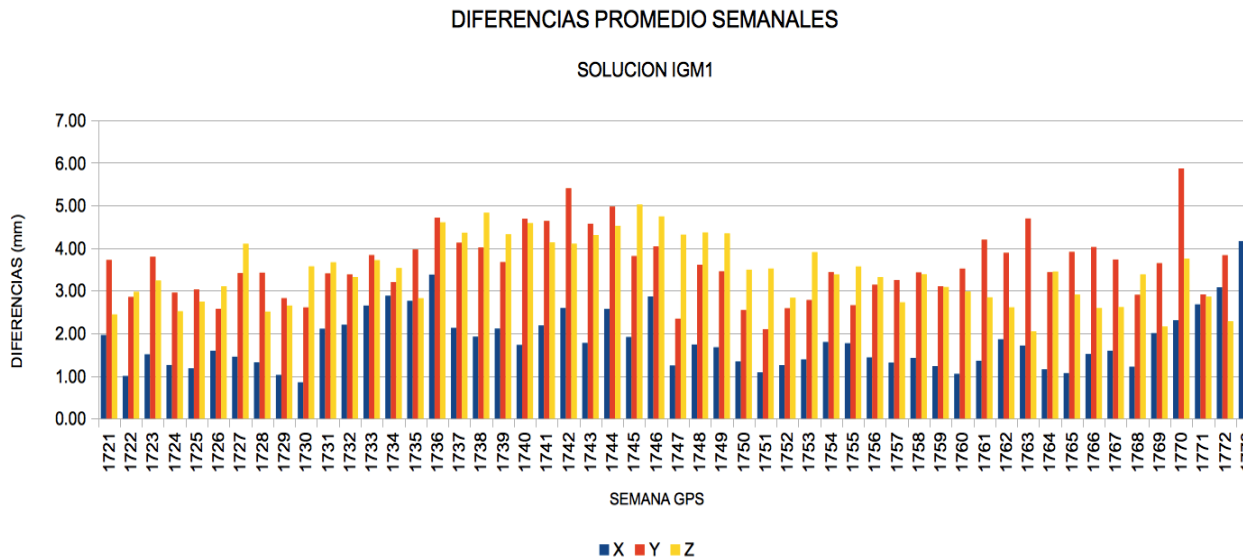


Figura 3.1. Diferencia de soluciones con SIRGAS

#### VALORES PROMEDIO

1. EJE X

1.82 mm

2. EJE Y

3.61 mm

3. EJE Z

3.45 mm

PROMEDIO

2.96 mm



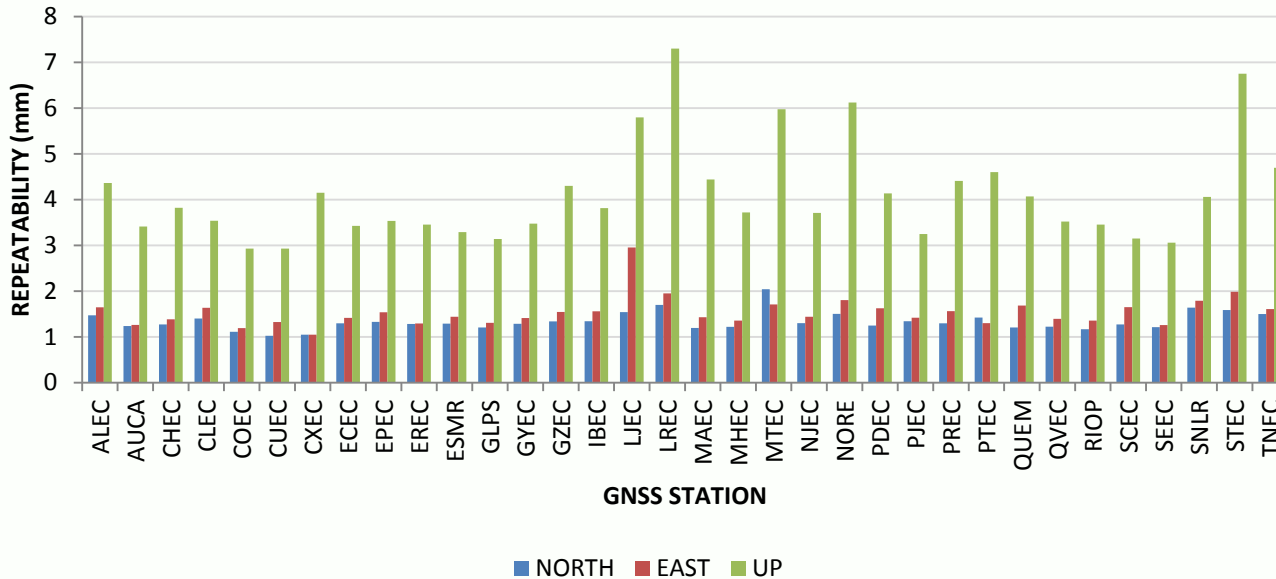


I N S T I T U T O  
*Geográfico Militar*

# REPETIBILIDAD DE LA SOLUCIÓN AJUSTADA POR ESTACIÓN

## ESTADÍSTICAS GENERALES

STABILIZATION WRMS. MULTI-STATION REPEATABILITY



### VALORES PROMEDIO

#### HORIZONTAL

1. EJE NORTE

1.34 mm

2. EJE ESTE

1.54 mm

#### VERTICAL

3. ALTURA

4.11 mm

Figura 3.2 Repetibilidad Promedio por Estación GNSS

Fuente: Pilapanta, C. & Tierra, A. 2014



I N S T I T U T O

*Geográfico Militar*



Secretaría Nacional  
de Educación Superior,  
Ciencia, Tecnología e Innovación



Ministerio  
de Defensa  
Nacional



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACION PARA LA EXCELENCIA

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



I N S T I T U T O

*Geográfico Militar*



Secretaría Nacional  
de Educación Superior,  
Ciencia, Tecnología e Innovación



Ministerio  
de Defensa  
Nacional



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

- ✓ El uso de una infraestructura meteorológica interoperable con la Red Geodésica Fundamental ha permitido obtener un nuevo enfoque en referencia a las relaciones existentes entre el modelamiento de las variables que influyen en las diferentes etapas del procesamiento y la determinación de las soluciones posicionales como tal.
- ✓ El modelamiento de variables atmosféricas temporales, ya sea mediante procesos en tiempo real y/o post-procesamiento permite establecer una línea base para la generación de modelos de simulación, así como de sistemas de alerta temprana para la toma de decisiones debido a posibles riesgos y fenómenos naturales.
- ✓ Es necesario establecer redes de cooperación internacional, enmarcadas en el estudio de los diferentes procesos relacionados con el uso de los sistemas de posicionamiento global, a fin de integrar y articular los procedimientos, metodologías y técnicas utilizadas por cada país y con ello fortalecer la generación de modelos locales y/o regionales.



I N S T I T U T O

*Geográfico Militar*



Secretaría Nacional  
de Educación Superior,  
Ciencia, Tecnología e Innovación



Ministerio  
de Defensa  
Nacional



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



# GRACIAS POR SU ATENCIÓN ...

Christian G. Pilapanta A.

[christian.pilapanta@mail.igm.gob.ec](mailto:christian.pilapanta@mail.igm.gob.ec)

Alfonso R. Tierra C.

[artierra@espe.edu.ec](mailto:artierra@espe.edu.ec)

Ricardo V. Romero Ch.

[ricardo.romero@mail.igm.gob.ec](mailto:ricardo.romero@mail.igm.gob.ec)