

# CAMPO DE VELOCIDAD DEL ECUADOR – VEC\_Ec

## OBTENIDO A TRAVÉS DE MEDIDAS GPS DE LOS ÚLTIMOS 15 AÑOS

Autores:

CISNEROS, David A.

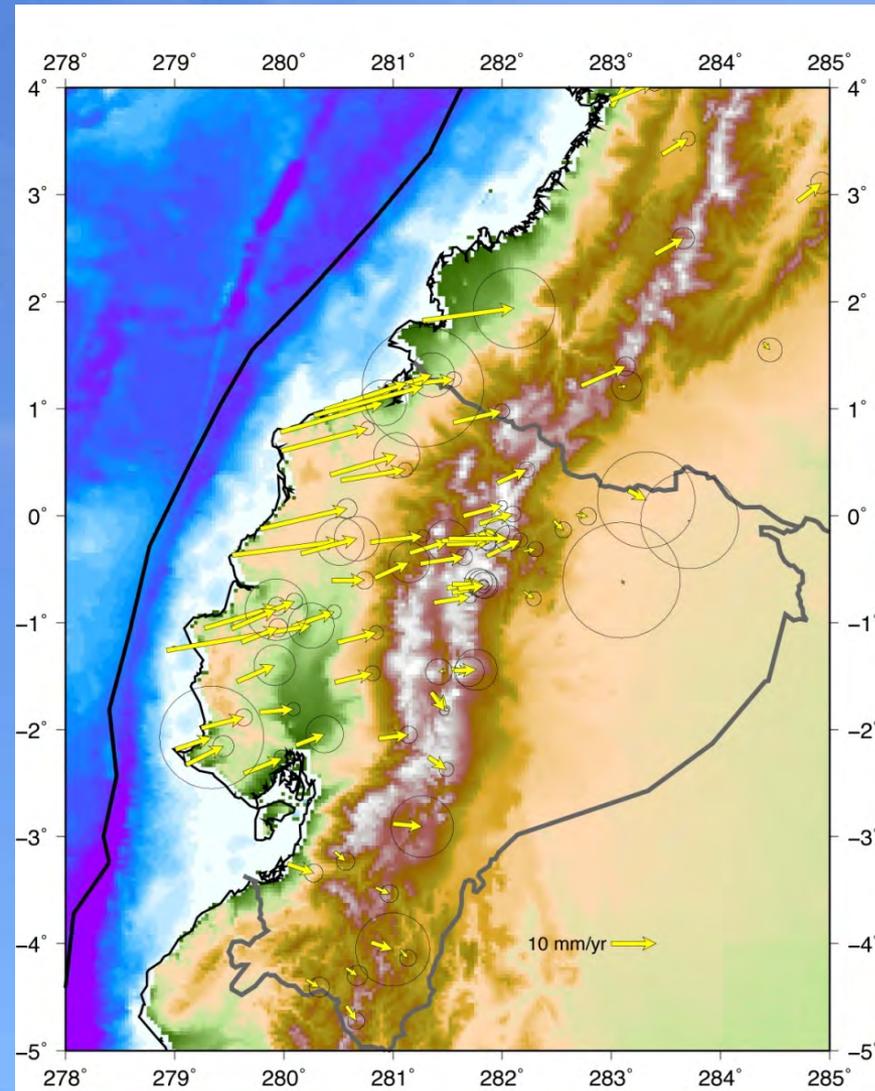
INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR

QUITO - ECUADOR

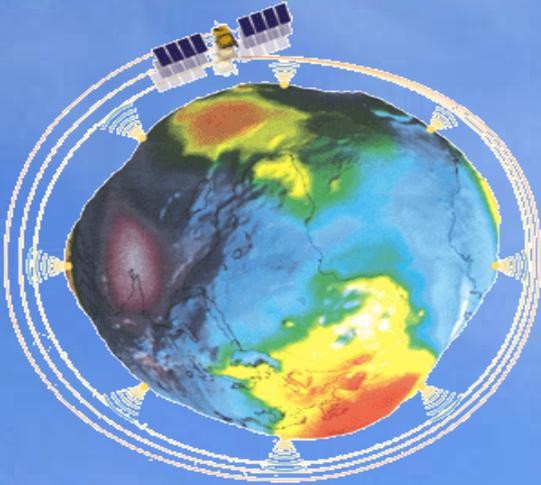
NOCQUET, Jean-Mathieu

Géosciences Azur

Sophia Antipolis - Valbonne, FRANCE



# 1.- INTRODUCCIÓN



Partiendo del hecho que en la Tierra todo se mueve y su forma cambia constantemente, salta la pregunta de conocer con certeza si el Marco Geodésico de Referencia Nacional vigente en el Ecuador es dinámicamente compatible al movimiento lineal y no lineal de la corteza terrestre, brindando una cierta precisión al momento de expresar sus coordenadas referidas a una época y un ITRF definido.

El RF vigente a nivel nacional está constituido por la RED NACIONAL GPS DEL ECUADOR – RENAGE, materializada a través de 135 mojones de concreto ajustados a SIRGAS95, ITRF94, época 1995.4. (DGFI-IGM).

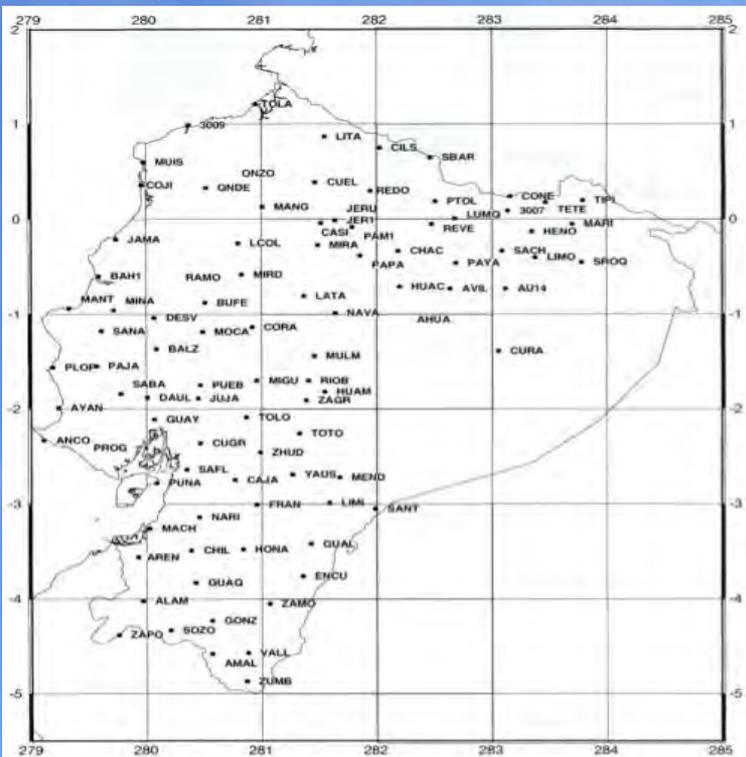
**La RENAGE, es el Marco Geocéntrico de Referencia Nacional materializado a través de estaciones Pasivas y el sustento técnico por el cual el Ecuador atravesó el umbral de la Geodesia Convencional a la era de los GNSS.**



RENAGE, 135 sites  
BERNESE 4.0  
ITRF: 94-EPOCH: 1995.4

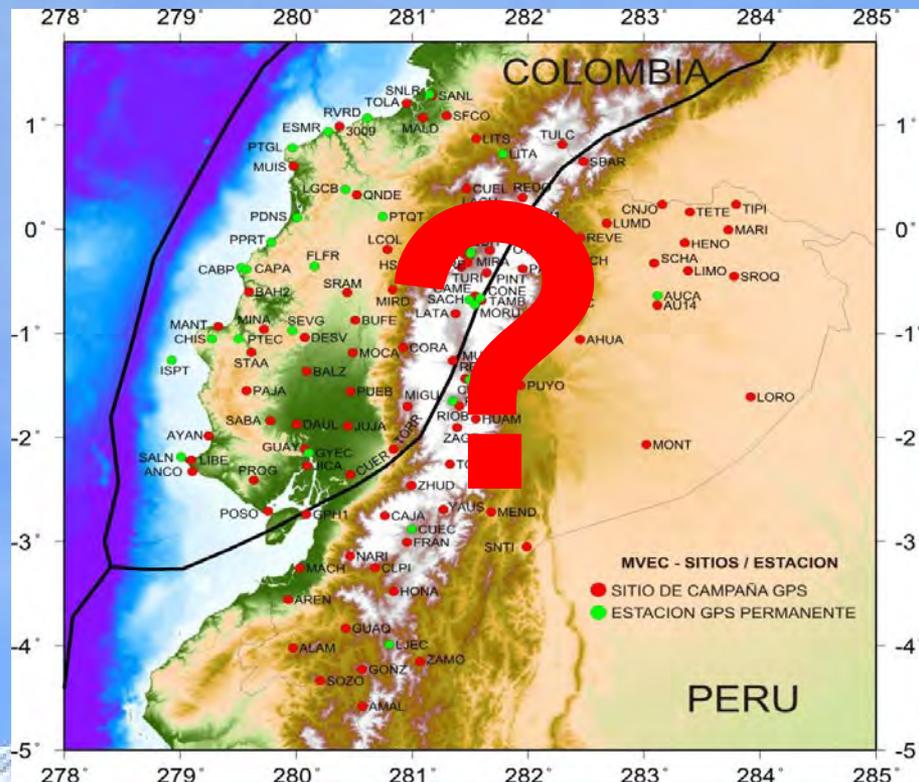
16 AÑOS

RENAGE (PASIVA)  
REGME (ACTIVA)  
RF: IGS08-EPOCH: 2012.0



EVENTOS  
Y  
FENOMENOS  
GEOFISICOS

MOVIMIENTO  
LINEAL  
NO LINEAL



SIRGAS95 en el transcurso del tiempo ha experimentado varios agentes y fenómenos físicos que afectan su consistencia: desplazamiento de las placas tectónicas, los efectos de la subducción, sismos, fallas geológicas, deformación local e incluso diferencias en el cálculo de las efemérides y la actualización del ITRS.

Las coordenadas SIRGAS deben ser corregidas por estos movimientos antes de ser utilizadas como un Marco de Referencia.

## 2.- JUSTIFICACIÓN

Las coordenadas SIRGAS95 de las estaciones terrestres que materializan la RENAGE, no son válidas para una época diferente a 1995.4, por tal razón es necesario trasladar las coordenadas a la época actual de observación para garantizar la compatibilidad entre el segmento espacial, el segmento de control y las mediciones realizadas por el usuario del sistema GPS/GNSS.

Para compatibilizar estas diferencias con el tiempo, se requieren para cada estación las componentes de velocidad  $\mathbf{V}$  ( $dX/dt$ ,  $dY/dt$ ,  $dZ/dt$ ).

$$X(t) = X(t_0) + (t-t_0) * V_x$$

$$Y(t) = Y(t_0) + (t-t_0) * V_y$$

$$Z(t) = Z(t_0) + (t-t_0) * V_z$$

Precisamente esta compatibilización es el principal justificativo para desarrollar un Campo de Velocidad en el Ecuador que permita determinar con certeza la magnitud (diferencia expresada en metros) existente entre las coordenadas SIRGAS 95 y las calculadas en el Marco de Referencia “vigente”.

ITRF92 ITRF93 ITRF94 ITRF96 ITRF97 ITRF2000 ITRF2005 IGS05 ITRF2008 IGS08 ...

**SIRGAS REFERENCE FRAME**

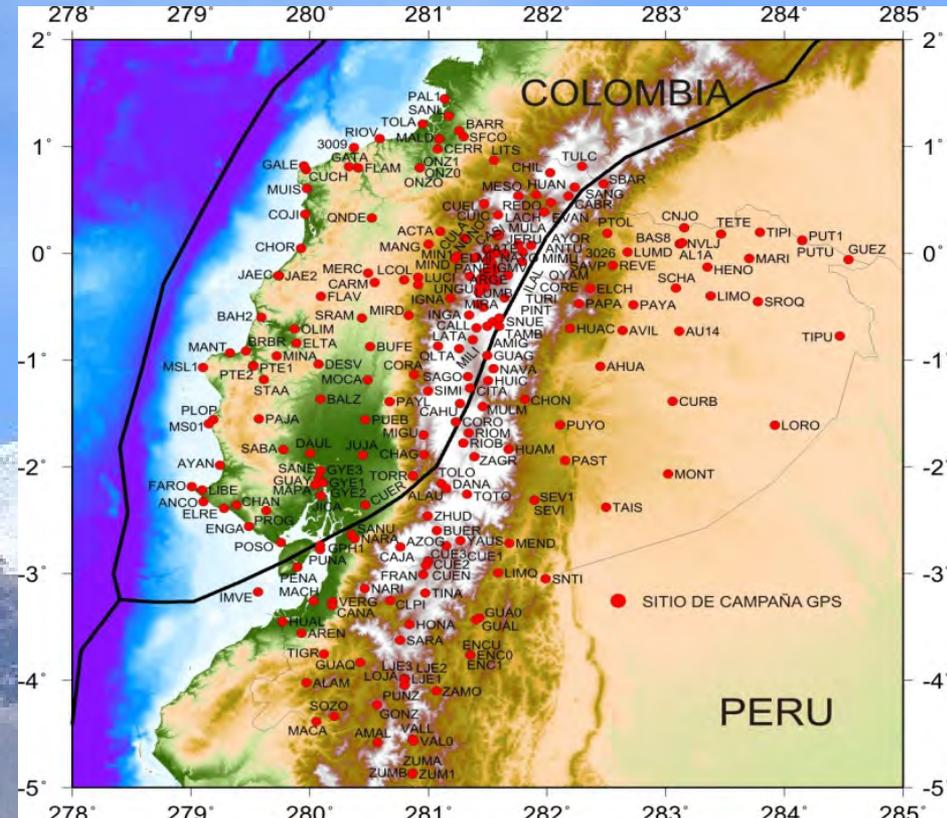
### 3.- DESCRIPCIÓN DEL SET DE DATOS USADOS EN EL PROYECTO.

La precisión obtenida al calcular un campo de velocidad depende de la estrategia de procesamiento aplicada para el cálculo, la calidad de las observaciones GPS, la duración de cada una de ellas y la cantidad de mediciones repetidas de un mismo punto obtenidas en épocas diferentes de tiempo.

**RED PASIVA – RENAGE** Se analizó toda la información generada en las campañas de medición de la RENAGE y las densificaciones que se derivan de ésta, a lo largo de los últimos 15 años, es decir:

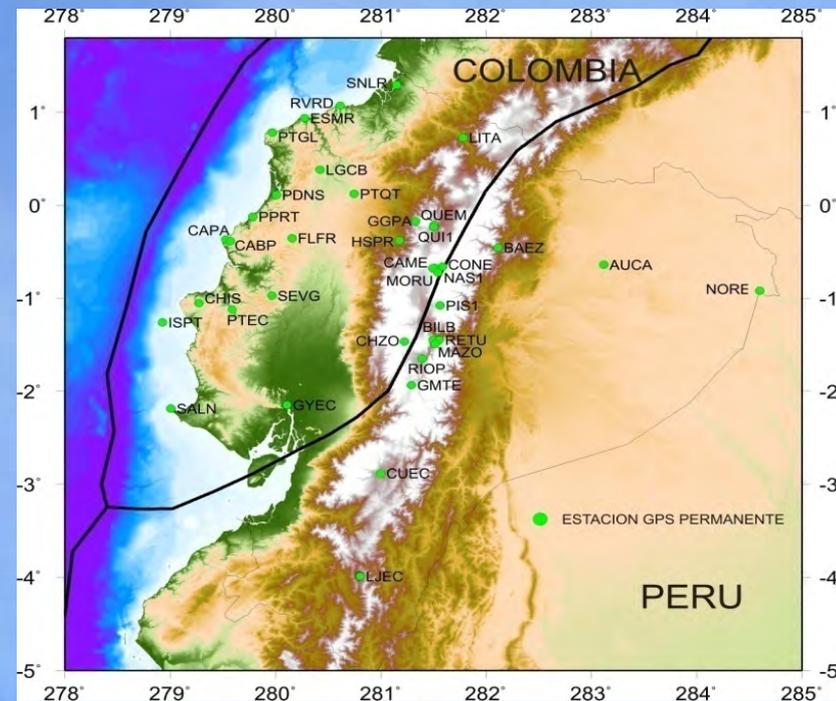
entre los años **1994 (enero de 1994, GPS Week 730) y 2011 (marzo de 2011, GPS Week 1627)**; con el objetivo de obtener una gran precisión del campo y un recubrimiento a escala del territorio nacional.

Existen sitios que no poseen medidas GPS redundantes que permitan establecer un cálculo de velocidad siendo la destrucción prematura del monumento la principal causa por la cual no se efectuaron medidas GPS posteriores.



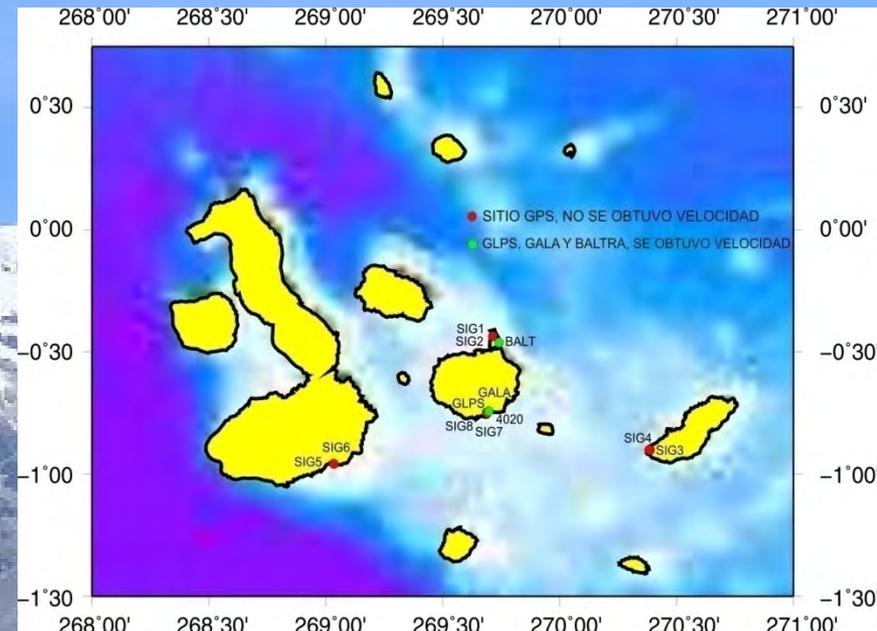
## REDES ACTIVAS: REGME – RENGEO – ADN

En los últimos cuatro años se han instalado varias estaciones de operación continua dentro del territorio nacional, administradas por entidades del estado y distribuidas en redes con múltiples propósitos (marco de referencia, geofísica, gestión del riesgo, etc.).

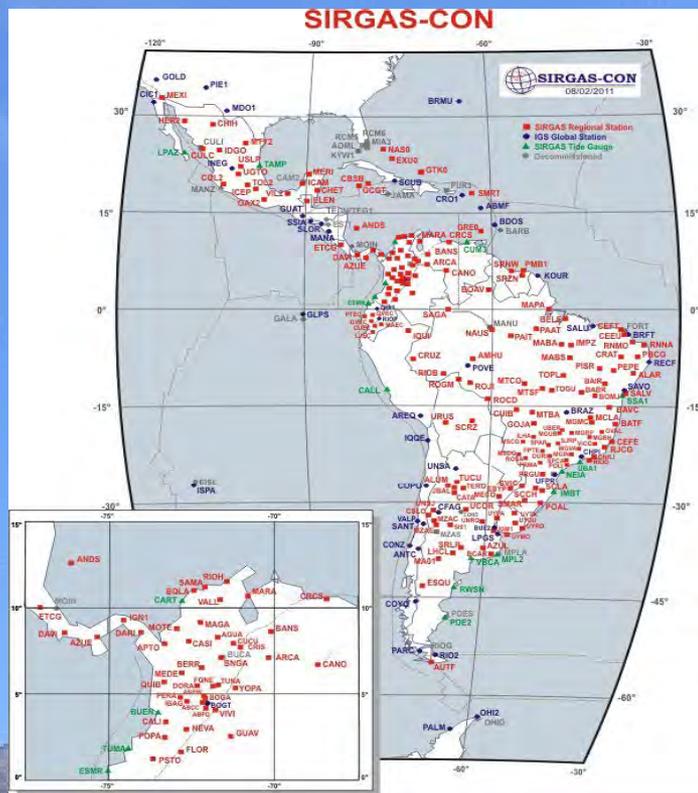


## TERRITORIO INSULAR GALÁPAGOS

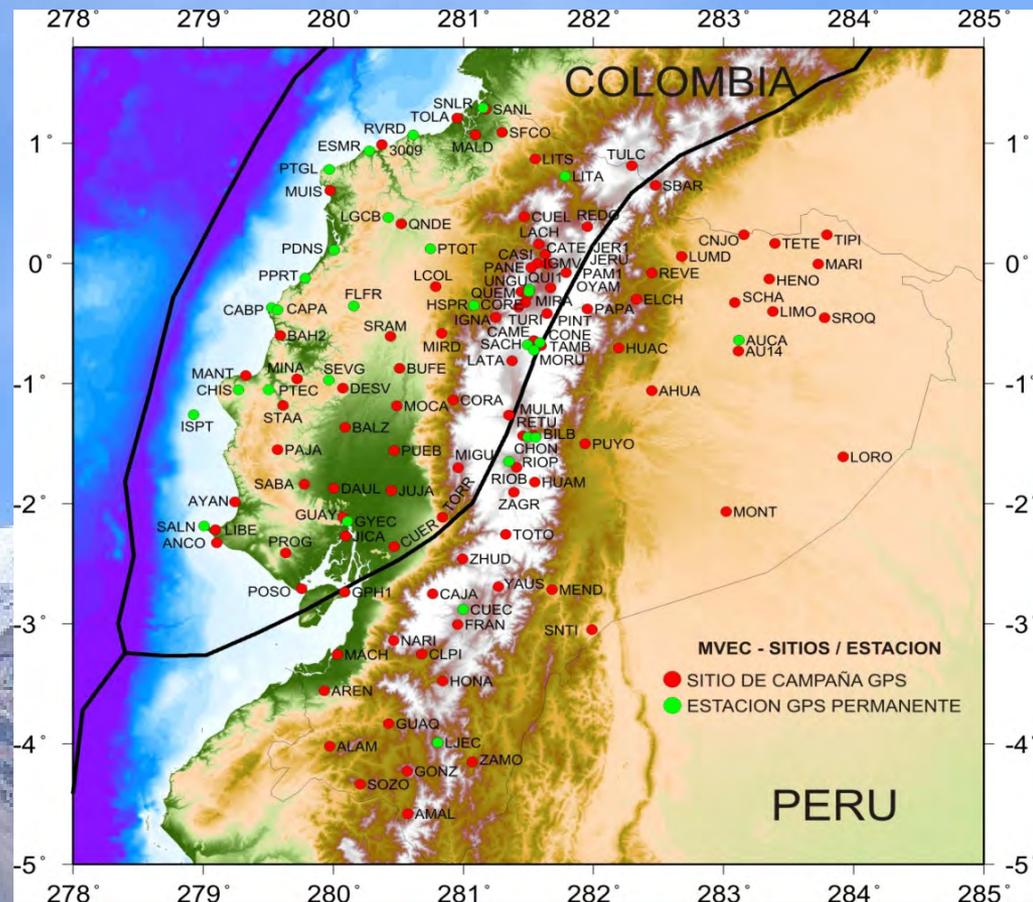
El territorio insular del archipiélago de Galápagos, no cuenta con mucha información de sitios GPS de la cual se pueda obtener un buen cálculo de velocidad, por tal razón se utilizó únicamente la información disponible del mojón Baltra y la estación permanente del IGS denominada GLPS y GALA, la cual se encuentra ubicada en la estación científica Charles Darwin, en la isla Santa Cruz.



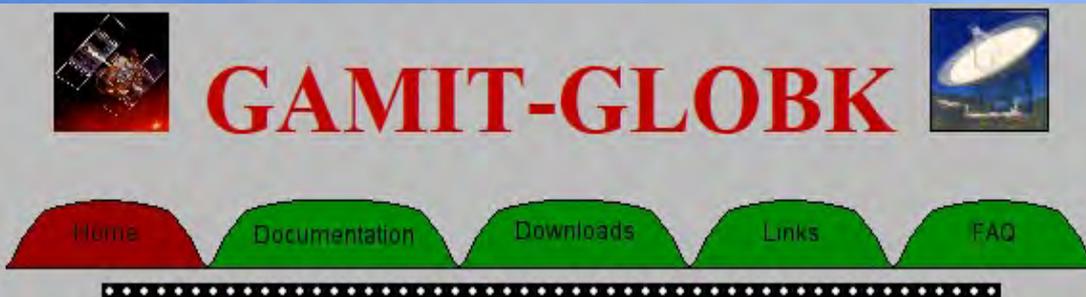
**SIRGAS-CON**, se usaron datos de estaciones permanentes de países vecinos, como es el caso de Colombia a través del IGAC, Brasil a través del IBGE y Perú a través del IGN - DGFI. Estos datos fueron usados para mejorar la cobertura de la red a nivel regional e identificar a esta escala movimientos o desplazamientos provocados por fenómenos geofísicos.



Para definir el número de **sitios finales** que se usaron en el cálculo del campo de velocidad, tanto de Campañas GPS (Red Pasiva) como de Estaciones GPS Permanentes (Red Activa), se realizó un procesamiento preliminar y se evaluó los resultados obtenidos tomando en cuenta aspectos como: la calidad de sus soluciones obtenidas, el margen de repetibilidad y el análisis de las series de tiempo.



## 4.- METODOLOGÍA PROCESAMIENTO GPS MEDIANTE EL SOFTWARE CIENTÍFICO GAMIT / GLOBK



La plataforma de procesamiento científico usado en el proyecto es el software GAMIT/GLOBK versión 10.4 desarrollado por el Instituto de Tecnología de Massachusetts (King & Bock, 2010) y el sistema operativo LINUX (distribución Ubuntu 10.10). Tanto el sistema operativo como el software de procesamiento científico son herramientas informáticas catalogadas como Open Source.

<http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/>



# GAMIT

Algoritmo mínimos cuadrados ponderados, calcula soluciones libres (libre de un marco de referencia) en el espacio, para lo cual utiliza dobles diferencias de fase entre las estaciones terrestres y satélites para cancelar completamente los efectos de las variaciones del reloj.

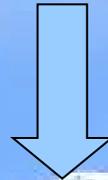
La estrategia de procesamiento incluye:

(Download) Parámetros de Rotación de la Tierra (EOP)

Órbitas Precisas del IGS (eph-repro1), Grillas Atmosféricas - Carga Oceánica

Efectos de las mareas de la Luna y Sol respecto al Marco de Referencia IGS08. (ut1, luntab, soltab)

Parámetros calculados como los Retrasos al Cenit en las ondas de los satélites inducidas por la tropósfera, la posición y las ambigüedades de fase.



## h-files loosely constrained

h-files soluciones libres en el espacio por cada día procesado, es necesario estabilizarlas para analizar la repetibilidad, series temporales, RINEX, confirmar la K del procesamiento y analizar el comportamiento de las soluciones estabilizadas en el transcurso del tiempo.

# GLRED

## Estabilizar solución libre 7 Parámetros Helmert - ITRF

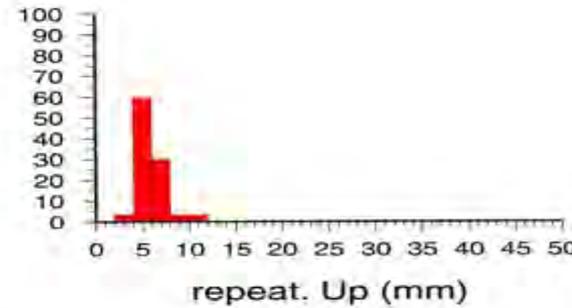
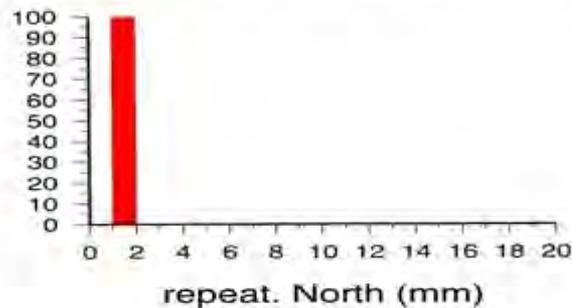
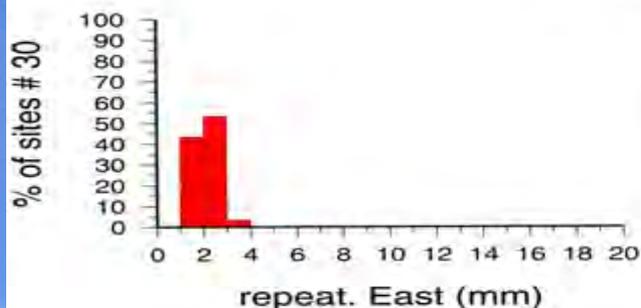


Series de tiempo de los sitios pasivos y activos  
Test de repetibilidad  
Identificar y remover outliers de cada estación  
Análisis a Corto Plazo – Campaña anual  
Análisis a Largo Plazo – Campañas Juntas

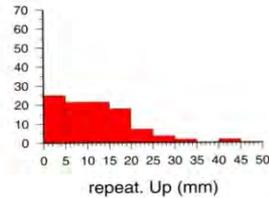
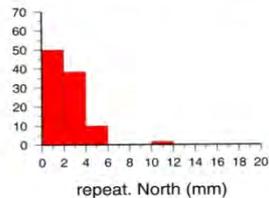
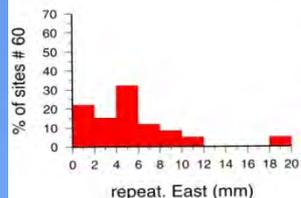
**La Repetibilidad** cuantifica la magnitud en término de la diferencia y variación de la coordenada de un mismo punto en el transcurso del tiempo; considerando todos los agentes externos que puedan provocar un salto importante en las series de tiempo de cada estación.

## REPETIBILIDAD A LARGO PLAZO - COMPONENTE: E, N, U

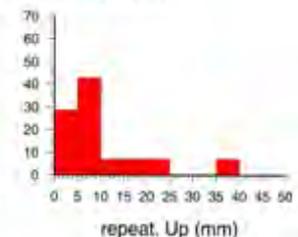
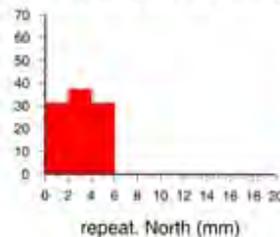
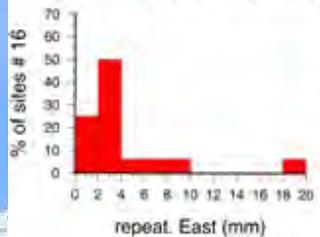
### ESTACIONES GPS PERMANENTES



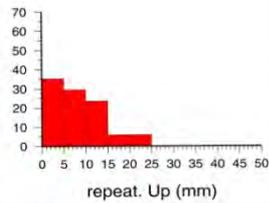
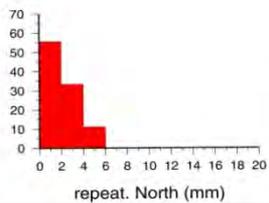
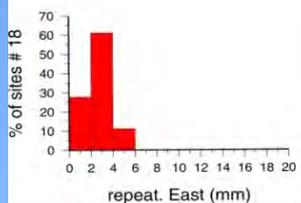
### REPETIBILIDAD COMPONENTE: E, N, U - CAMPAÑA GPS DEL AÑO 1994



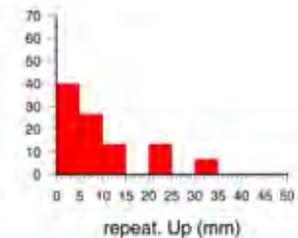
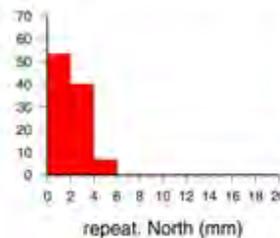
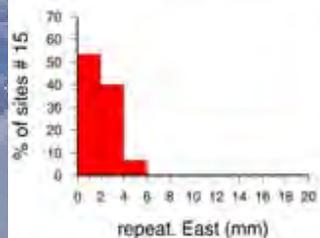
### REPETIBILIDAD COMPONENTE: E, N, U - CAMPAÑA GPS DEL AÑO 2010



### REPETIBILIDAD COMPONENTE: E, N, U - CAMPAÑA GPS DEL AÑO 1996



### REPETIBILIDAD COMPONENTE: E, N, U - CAMPAÑA GPS DEL AÑO 2011

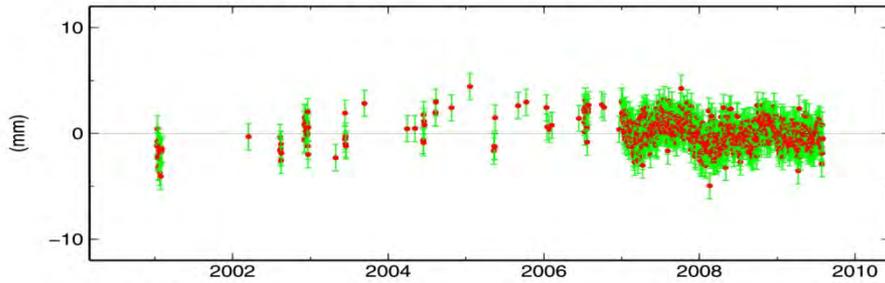


El nivel de repetibilidad (wrms) en la mayor parte de las series de tiempo es muy bueno.

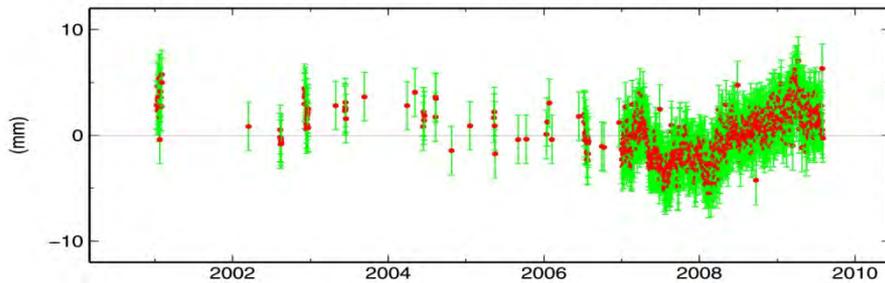
El nivel de dispersión de la repetibilidad dentro del ITRF, se mantiene dentro de los 3-5 mm en la componente horizontal y 30 mm en la componente vertical.

Para el cálculo de una serie de tiempo se necesitan al menos dos medidas GPS de larga duración de un mismo punto en épocas diferentes de tiempo.

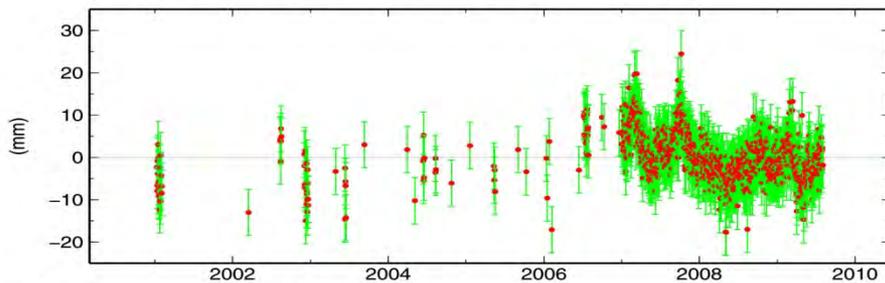
QUI1 to N Solution 1  
wmean(mm)=  $0.00 \pm 0.04$  nrms= 1.00 wrms= 1.2 mm # 1027



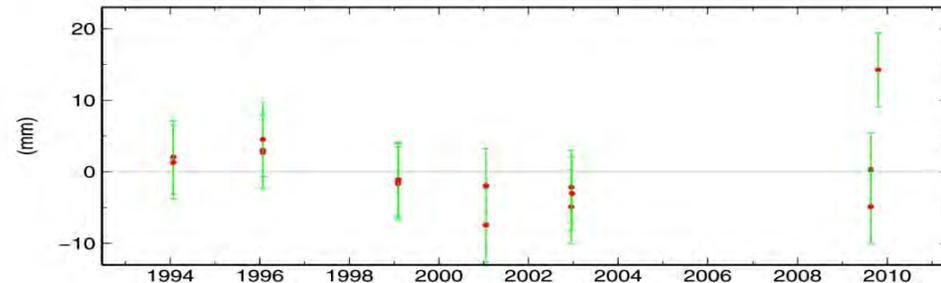
QUI1 to E Solution 1  
wmean(mm)=  $-0.00 \pm 0.07$  nrms= 1.00 wrms= 2.3 mm # 1027



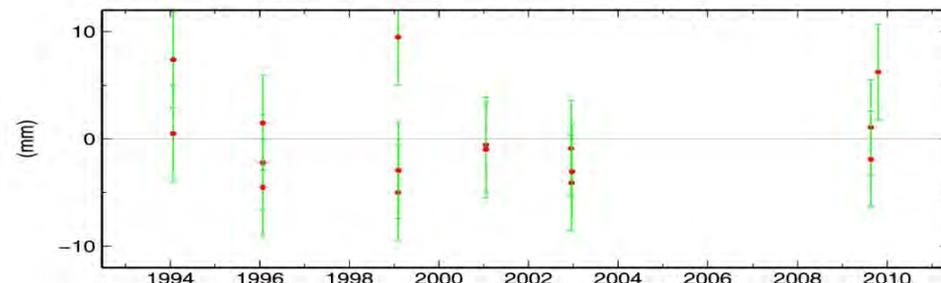
QUI1 to U Solution 1  
wmean(mm)=  $-0.00 \pm 0.17$  nrms= 1.00 wrms= 5.5 mm # 1027



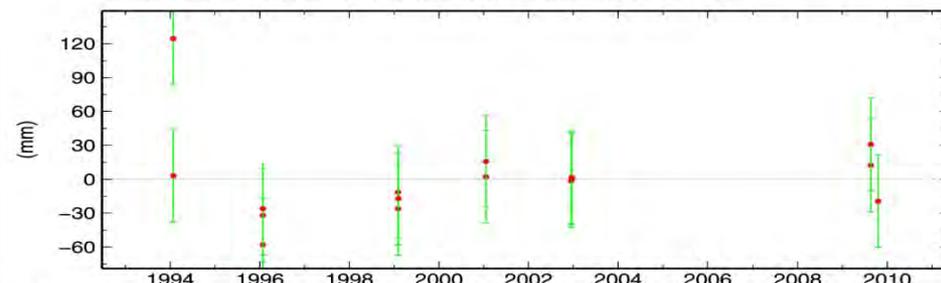
QNDE to N Solution 1  
wmean(mm)=  $-0.00 \pm 1.29$  nrms= 0.97 wrms= 5.0 mm # 16



QNDE to E Solution 1  
wmean(mm)=  $0.00 \pm 1.11$  nrms= 0.97 wrms= 4.3 mm # 16



QNDE to U Solution 1  
wmean(mm)=  $0.00 \pm 10.22$  nrms= 0.97 wrms= 39.5 mm # 16



# GLOBK (FILTRO DE KALMAN)

## Solución Acumulada, Estimación de Velocidades

Las velocidades son vectores de desplazamiento que tienen una dirección y una magnitud definida. GLOBK toma todas las soluciones libres calculadas por GAMIT para cada día de observación GPS y las ingresa al Filtro de Kalman, el cual por medio de la estimación secuencial de mínimos cuadrados acumula progresivamente coordenadas y velocidades de todas las soluciones libres (filtra únicamente las soluciones que mantienen un valor  $X^2 < 1$ ) obteniendo una **SOLUCIÓN ACUMULADA FINAL (LIBRE)**.

**SAF**, posee las coordenadas y velocidades de los sitios (dirección y magnitud) a lo largo de los 16 años de medidas GPS y referida a una época específica. Definimos la época 2011.0



La **SAF** se encuentra libre en el espacio (en un lugar cuyos ejes son totalmente desconocidos) por tal razón, es necesario **ESTABILIZARLA** dentro de un Marco de Referencia definido, el cual tiene un origen, velocidades y posiciones conocidas (Global Reference Frame).

# Estabilizar la Solución Acumulada

En GEODESIA

**PROCEDIMIENTO**

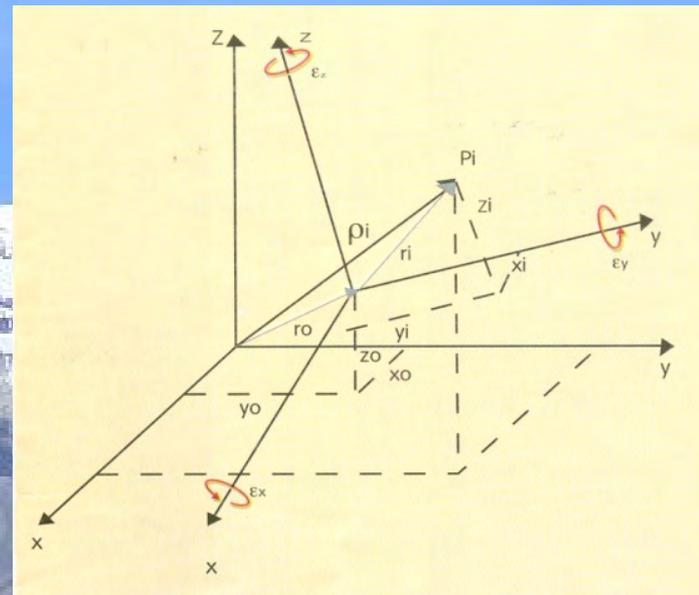
ESTABILIZACIÓN = MARCO DE REFERENCIA

14 parámetros son usados para estabilizar la solución dentro de un Marco de Referencia Global (por ejemplo ITRF94, ITRF2000, IGS08, etc), tomando como referencia estaciones IGS cercanas que no sufran efectos geodinámicos o estén afectadas por fenómenos geofísicos transitorios (cambios bruscos de la posición con respecto al movimiento lineal). Por tal razón la solución acumulada está bien definida dentro de un marco y época de referencia, por lo que podemos utilizarla para evaluar y obtener con precisión las posiciones y velocidades de los sitios pasivos/activos.

The 91 primary stations of the IGS08 core network

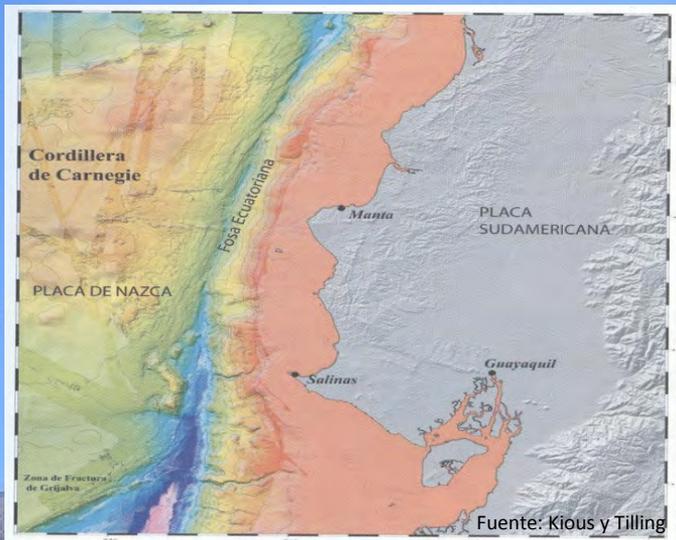
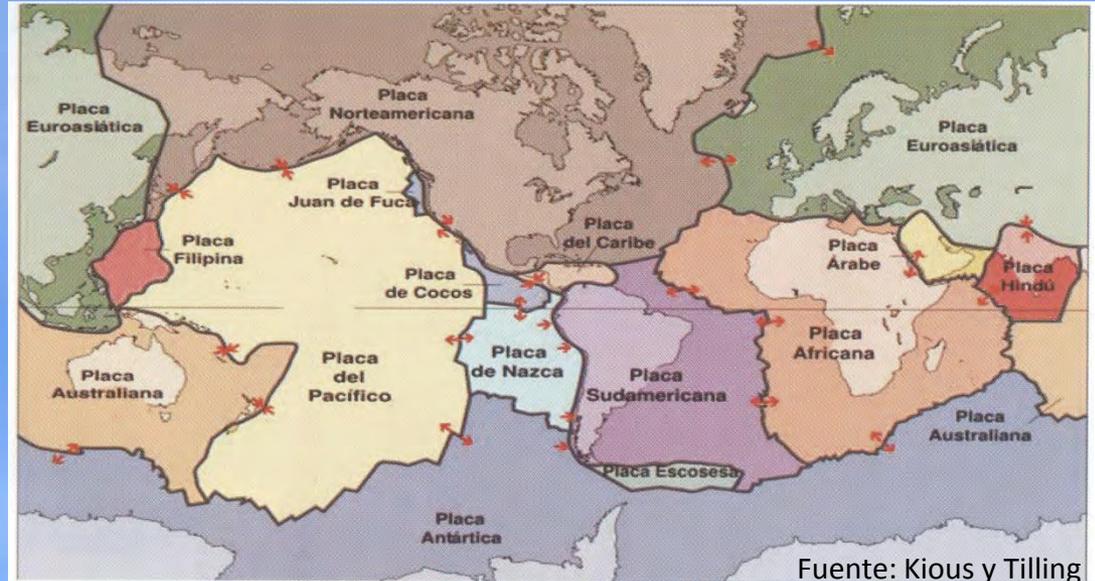
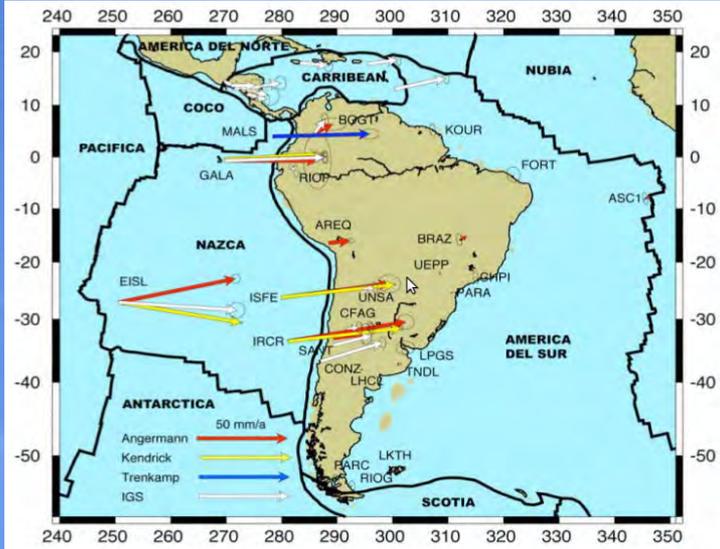


Cuando existen velocidades hay que tomar en cuenta el Drift de los parámetros.



## 5.- Análisis del VEC\_Ec, conforme a la cinemática de Placas Tectónicas presentes en América del Sur y sus efectos a nivel local.

Teóricamente, la corteza terrestre se encuentra dividida en al menos 15 Placas Tectónicas, las mismas que interactúan entre sí; moviéndose en diferentes direcciones y con magnitudes independientes.



La Placa Submarina de Nazca converge con la Placa Continental de Sudamérica en la Fosa de Subducción, la cual se encuentra a una distancia aproximada de 100 – 200 Km de la costa continental.

El Ecuador está situado sobre la zona de frontera en la cual se “acomoda/acopla” el movimiento de convergencia de la placa oceánica de Nazca hacia el continente Sudamericano.

## VEC\_Ec, REFERIDO AL SOAM (E)

**ZONA 1:** Ubicada en la parte Oriental, al Este de la Cordillera de los Andes y alejada de la zona de Subducción.

En término del desplazamiento, podemos ver que no existe mayor magnitud en los sitios ubicados en esta zona, lo cual concuerda con la teoría.

La mayor parte de los sitios tienen una velocidad mínima y una dirección similar conforme a la tendencia del movimiento de la placa Sudamericana.

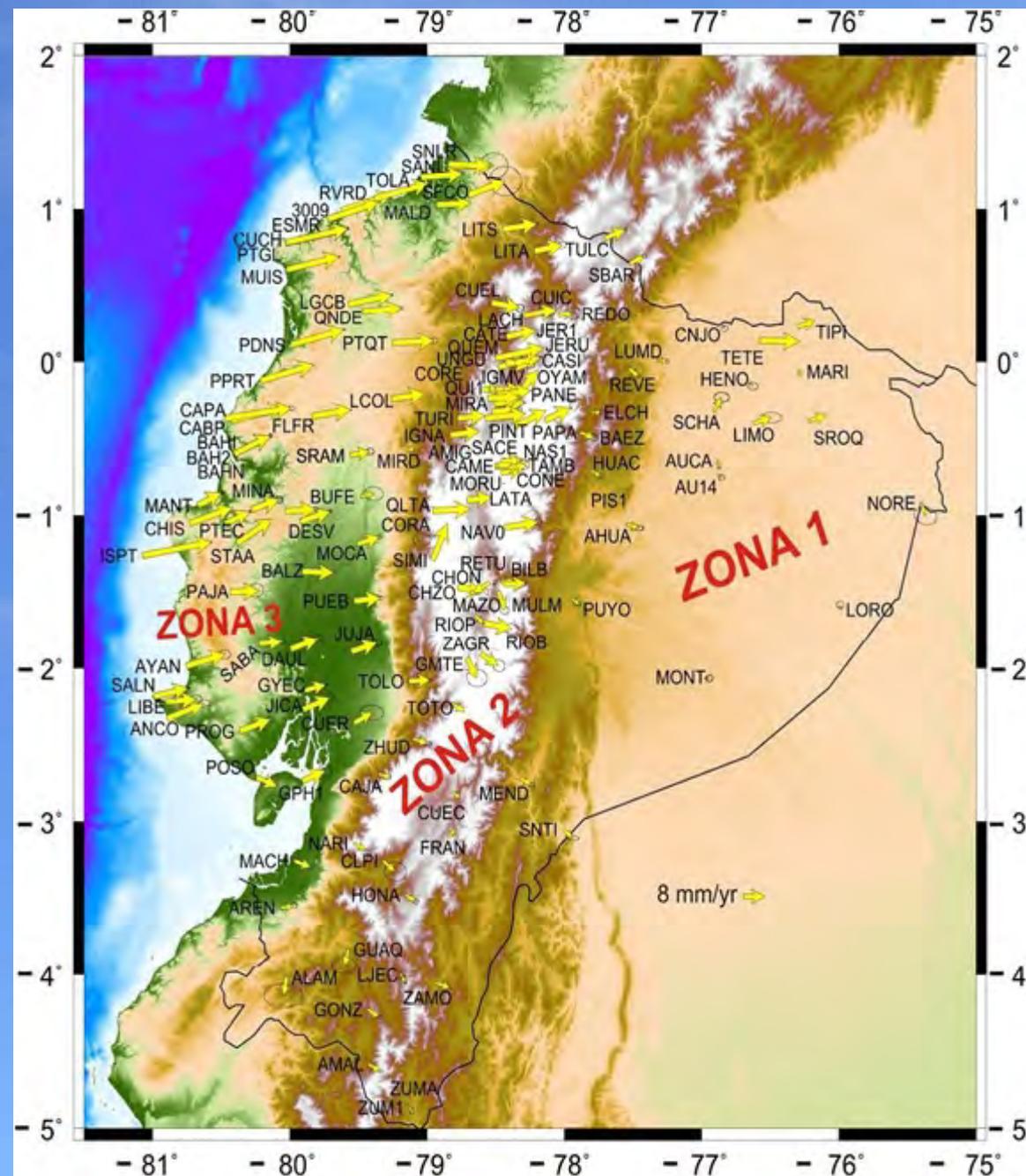
**ZONA 2:** Entre el interior estable de la placa América del Sur y la fosa de subducción se extiende el bloque nor andino.

Esta zona posee afectación de la subducción y deformación local producida por la presencia de la cordillera y su actividad sísmica/volcánica.

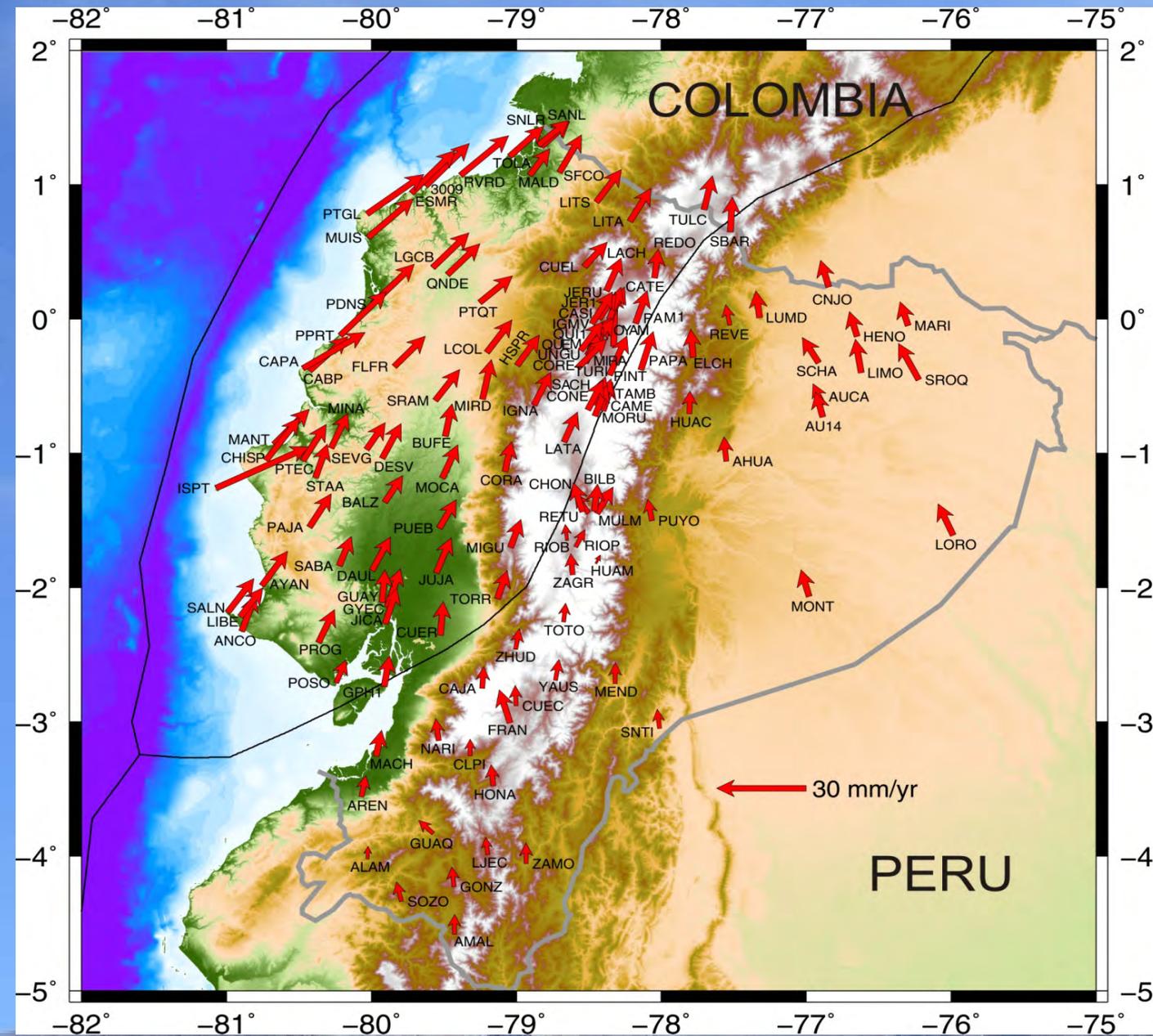
Los sitios presentes en este sector, muestran un comportamiento variable en cuanto a la magnitud de su velocidad y los vectores se desplazan en diferentes direcciones de manera independiente.

**ZONA 3:** Nos referimos por completo a la zona costera. En esta zona el movimiento es inestable e independiente.

Los sitios se mueven en magnitudes diferentes en relación a la parte estable de la placa sudamericana. Posee deformación local causada por efectos de subducción de las placas marítima de Nazca y continental de Sudamérica en la zona de convergencia (fosa de subducción).



## 6.- Campo de Velocidades del Ecuador - VEC\_Ec



Placa Tectónica  
Sudamericana  
Zona 17 - 18

Marco de Referencia  
Global: IGS08

Época de referencia:  
2011.0

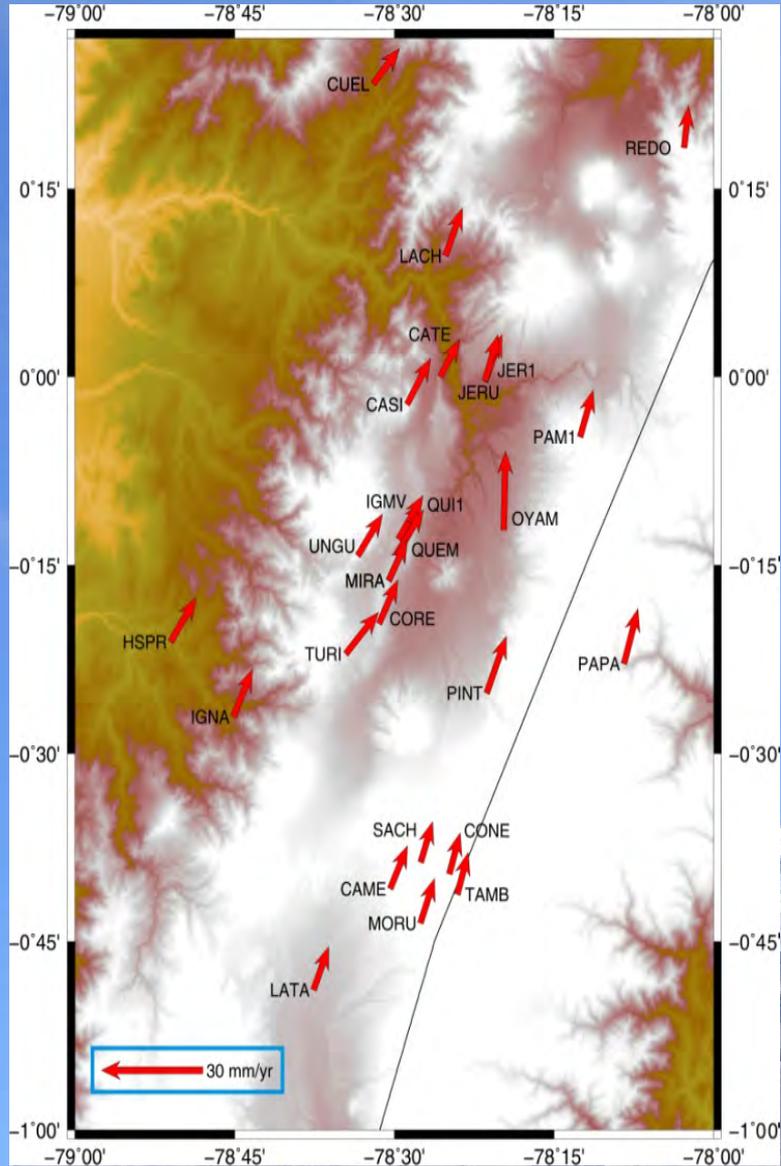
EMC Activas = 30  
Sitios Pasivos = 102

Nivel de Acuerdo y Precisión:  
VEC\_Ec - IGS

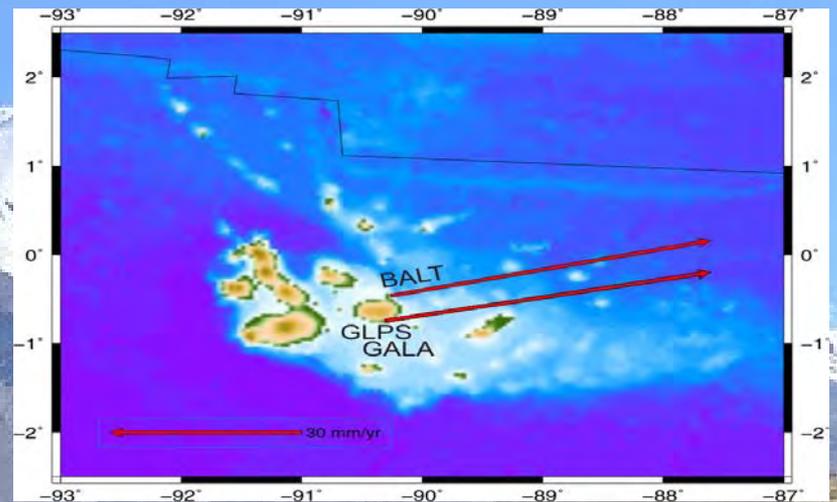
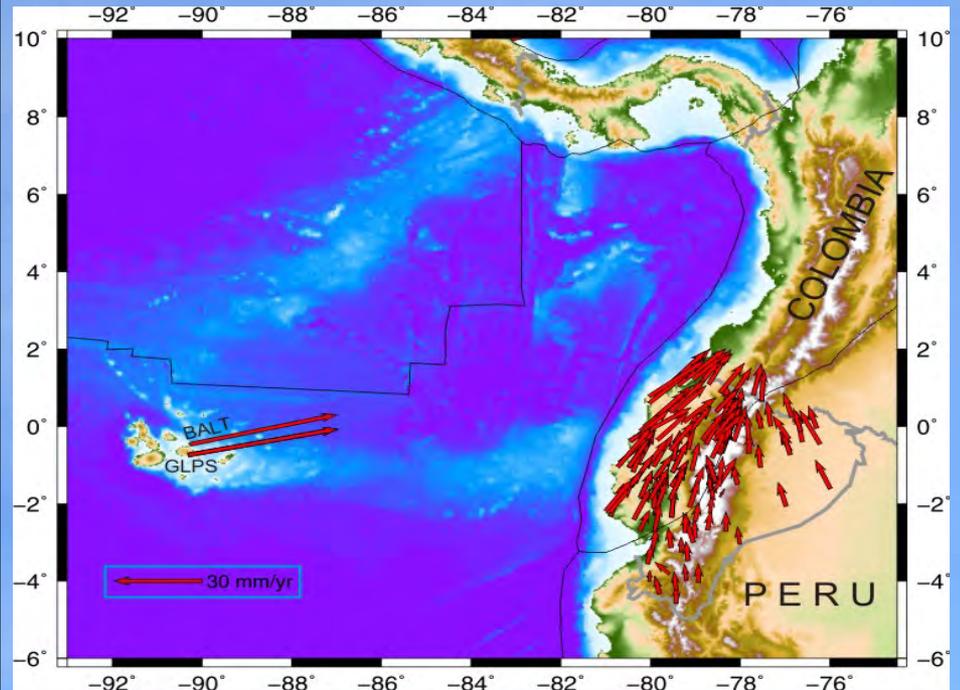
$Me_X = 0.15 \text{ mm}$   
 $Me_Y = -0.60 \text{ mm}$   
 $Me_Z = -0.10 \text{ mm}$

$Me_{Vx} = 0.15 \text{ mm}$   
 $Me_{Vy} = -0.60 \text{ mm}$   
 $Me_{Vz} = -0.10 \text{ mm}$

# VEC\_Ec D.M. QUITO PLACA SUDAMERICANA, ZONA 17

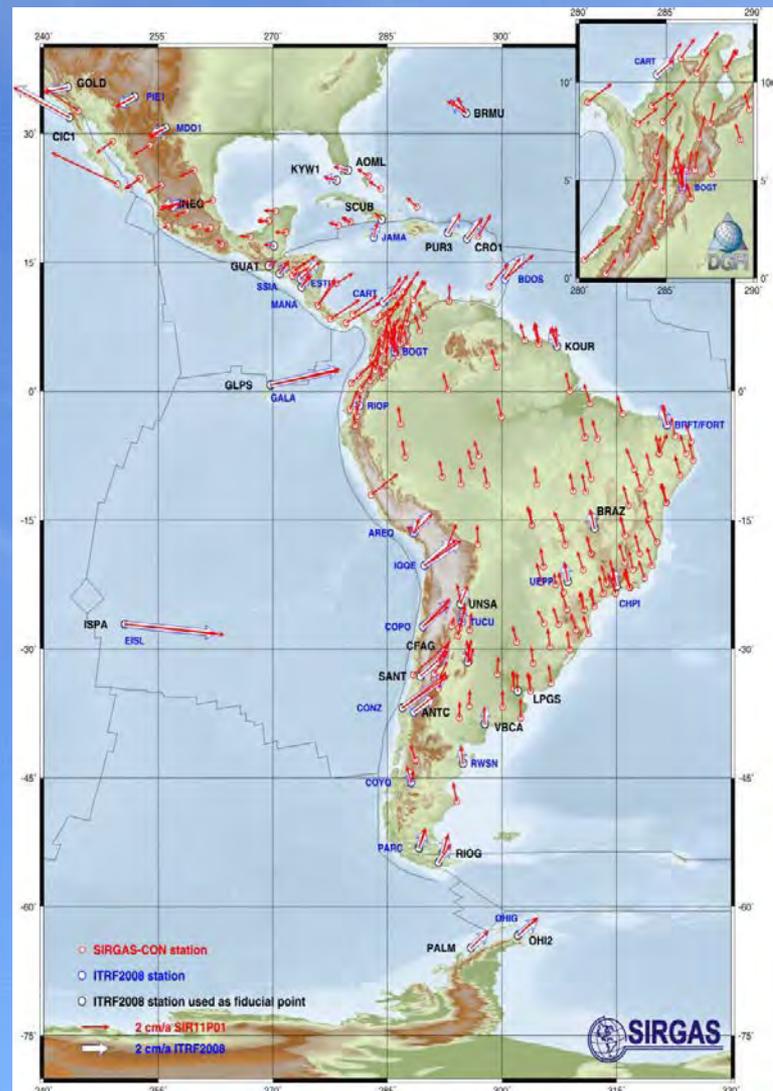


# VEC\_Ec ARCHIPIÉLAGO GALÁPAGOS PLACA NAZCA, ZONA 15 - 16

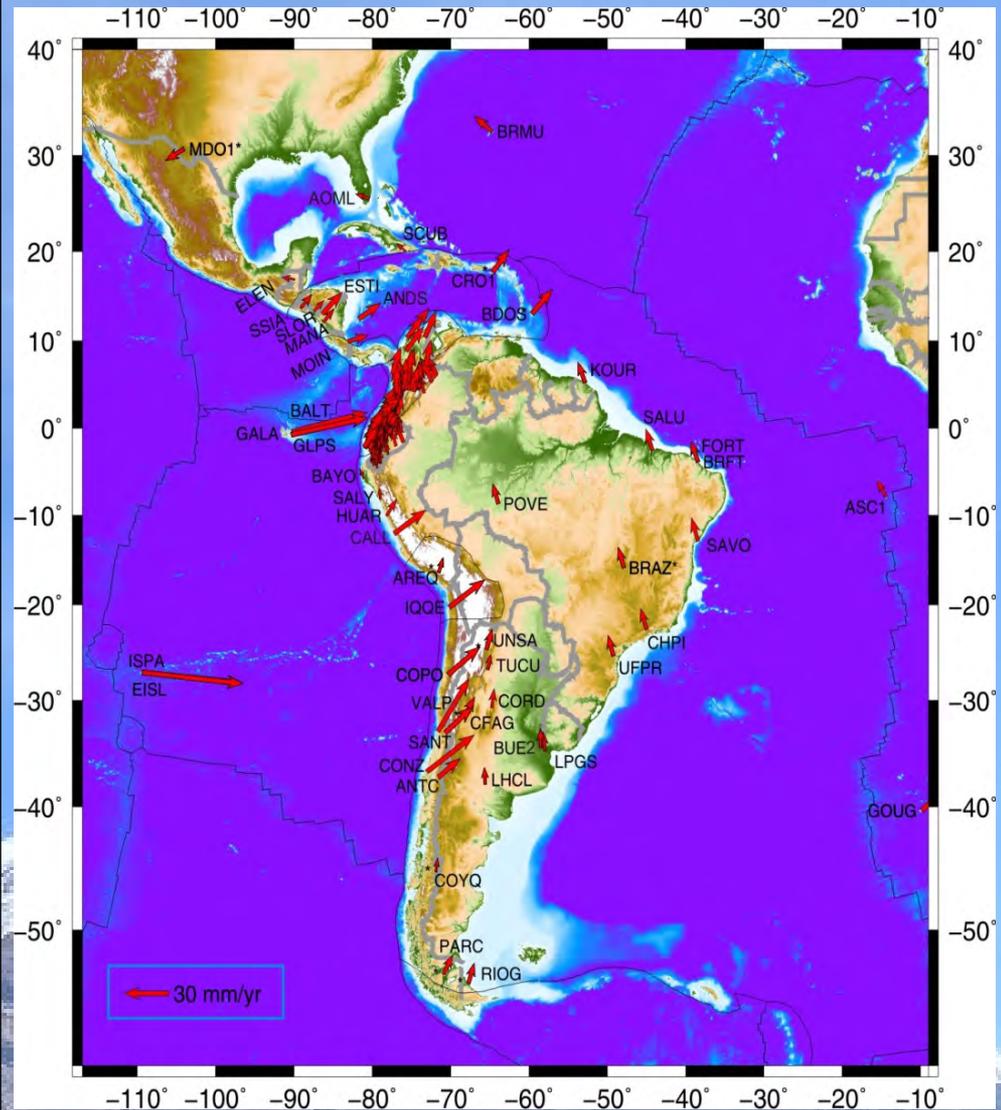




# SOLUCIÓN MULTI ANUAL SIR11P01



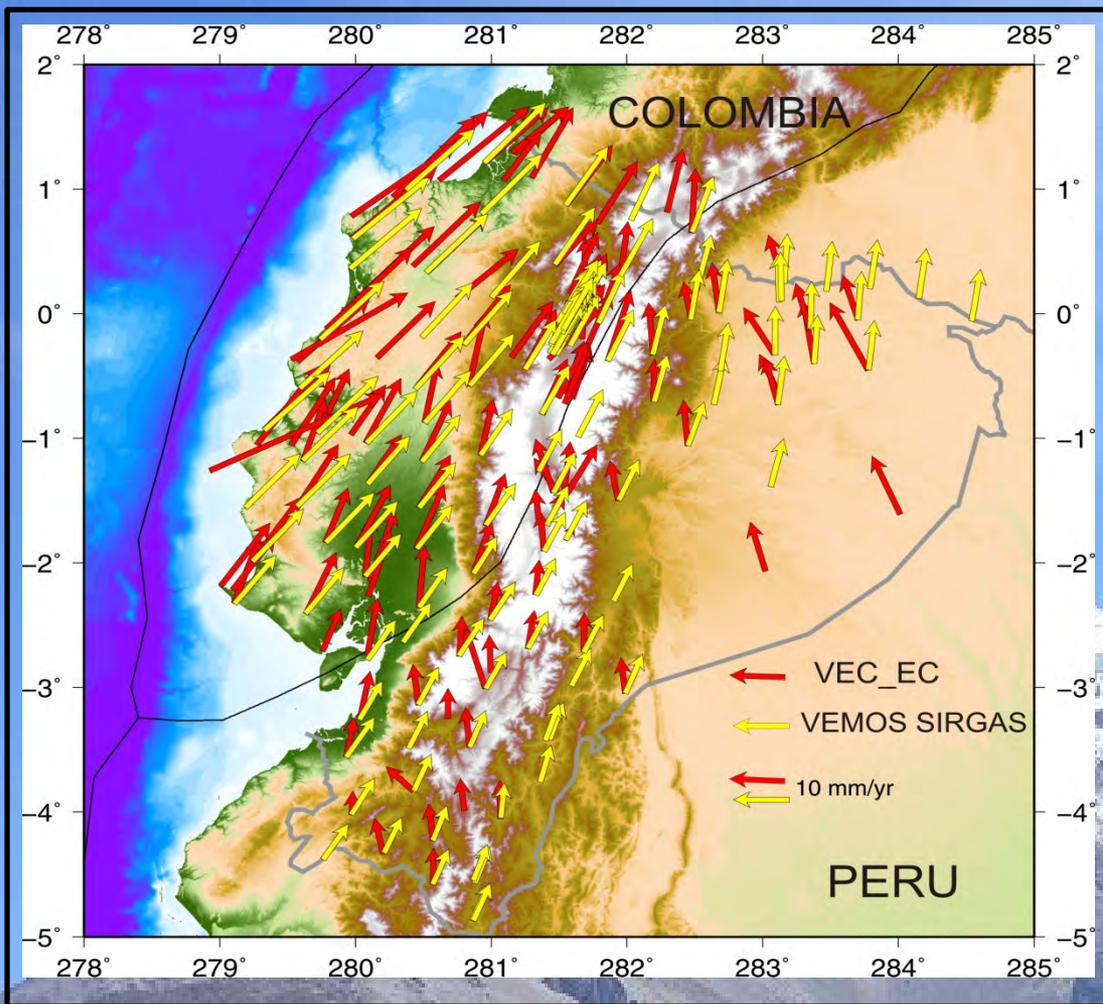
# SOLUCIÓN MULTI ANUAL VEC\_EC



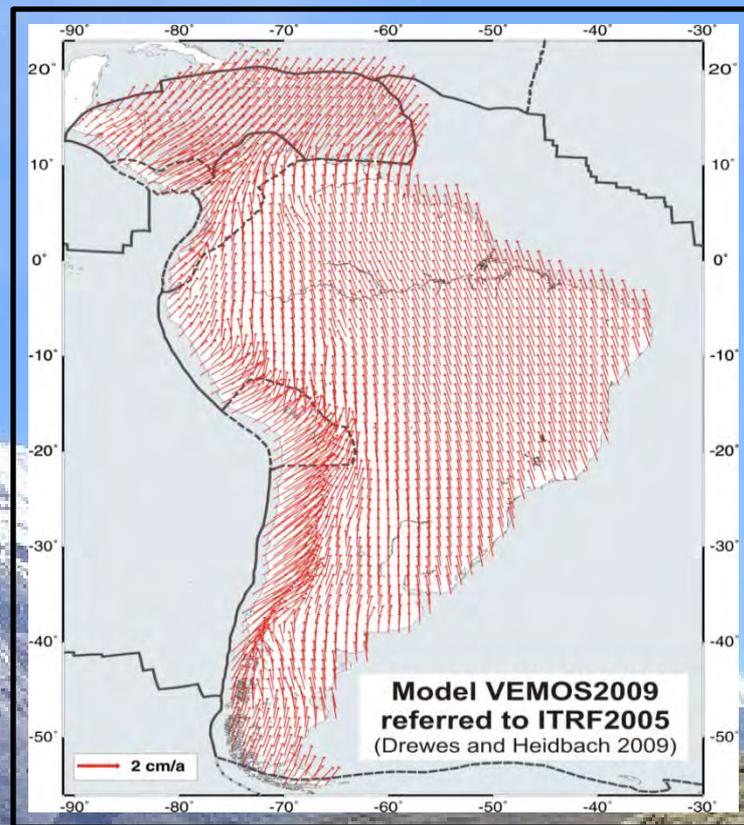
ITRF 2008

## 7.- Modelo de Interpolación VEMOS y el Campo de Velocidades del Ecuador

Como podemos observar, los vectores de velocidad obtenidos mediante la aplicación del Modelo de Velocidades VEMOS (color amarillo), difieren en magnitud y dirección respecto a los obtenidos con el Campo Velocidades Ecuador VEC\_Ec (color rojo). Es evidente, que la diferencia existente se debe a que las velocidades determinadas por el Modelo Vemos, son obtenidas por medio de la aplicación de un modelo de interpolación (VMS2009) ; mientras que las velocidades generadas por el VEC\_Ec, resultan del cálculo de medidas GPS redundantes de larga duración en épocas diferentes de tiempo.



VERTICE	MODELO VEMOS - SIRGAS			CAMPO VELOCIDAD VEC_EC		
	vX (m)	vY (m)	vZ (m)	vX (m)	vY (m)	vZ (m)
Esmeraldas	0.0124	0.0025	0.0118	0.01422	0.00357	0.01532
LATACUNGA	0.0052	0.0009	0.0095	0.00641	-0.00895	0.01062
QUININDE	0.0112	0.0021	0.0114	0.01038	0.00368	0.01109
PROGRESO	0.0072	0.0008	0.0089	0.00519	0.0018	0.01199



Al evaluar las CRD SIRGAS95 (RENAGE) respecto a las obtenidas en IGS08, podemos observar que, la diferencia existente está en el orden de los centímetros en las tres componentes, siendo la componente horizontal del punto Baltra la que posee mayor desplazamiento (Este = 0.78m).

Cabe indicar también, que el tiempo transcurrido entre los dos marcos de referencia es de:  $(t - t_0) = 15.6$  años; siendo  $t = 2011.0$  y  $t_0 = 1995.4$ .

VERTICE	RENAGE SIRGAS 95, ITRF 94, época 1995.4						RENAGE IGS08, época 2011.0					
	COORDENADAS CARTESIANAS			COORDENADAS PLANAS			COORDENADAS CARTESIANAS			COORDENADAS PLANAS		
	X	Y	Z	N	E	h	X	Y	Z	N	E	h
<b>Esmeraldas</b>	1148305.483	-6272977.101	109353.910	109346.874	652825.861	19.949	1148305.688	-6272976.994	109354.156	109347.122	652826.082	19.885
			<b>DIFERENCIA</b>	<b>-0.248 m.</b>	<b>-0.221 m.</b>	<b>0.064 m.</b>						
<b>BALTRA</b>	-28822.438	-6377927.538	-50938.985	9949022.611	805120.619	60.448	-28821.651	-6377927.434	-50938.794	9949022.801	805121.407	60.339
			<b>DIFERENCIA</b>	<b>-0.190 m.</b>	<b>-0.788 m.</b>	<b>0.109 m.</b>						
<b>LATACUNGA</b>	1258247.886	-6255142.665	-90040.863	9909956.133	764160.996	2941.238	1258247.972	-6255142.642	-90040.693	9909956.303	764161.085	2941.230
			<b>DIFERENCIA</b>	<b>-0.170 m.</b>	<b>-0.089 m.</b>	<b>0.008 m.</b>						
<b>QUININDE</b>	1165008.426	-6270855.124	36218.099	36216.016	669656.419	122.105	1165008.600	-6270855.013	36218.288	36216.206	669656.610	122.029
			<b>DIFERENCIA</b>	<b>-0.190 m.</b>	<b>-0.191 m.</b>	<b>0.076 m.</b>						
<b>GLPS</b>	-33796.164	-6377522.618	-82120.929	9917818.126	800125.779	7.418	-33795.397	-6377522.677	-82120.741	9917818.314	800126.547	7.471
			<b>DIFERENCIA</b>	<b>-0.188 m.</b>	<b>-0.768 m.</b>	<b>-0.053 m.</b>						

## 8.- Conclusiones

- Para la campaña GPS de 1998, el uso de los receptores codeless ASHTECH L-XII generó un problema sobre la componente Este; debido a un error de reloj existente en este tipo de receptor.
- El procesamiento GPS de 1994, forzó a calcular líneas base muy largas debido a un número reducido de estaciones del IGS existentes en ese tiempo, cuya consecuencia disminuyó la precisión del cálculo.
- El nivel de dispersión de la repetibilidad de los sitios pasivos y activos dentro del ITRF, se mantiene dentro de los 3-5 mm en la componente horizontal y 20 mm en la componente vertical.
- El Campo de Velocidad confirma la deformación local en el Ecuador continental de 0 a 3 cm/a y concuerda con la estimación del movimiento de la Placa Sudamericana a razón de 1 cm/a.
  - Movimiento estimado en la Costa es de 2 cm/año;
  - En la Sierra de los Andes el movimiento estimado es de 1.5 cm/año.
  - En el sector Oriental se estima un movimiento menor a 1 cm/año.
  - En Galápagos el movimiento estimado concuerda con la placa de Nazca a razón de 5 cm/año aprox.
- La Geodesia requiere del análisis geofísico para garantizar un nivel de precisión en todos los resultados.
- El mantenimiento del marco de referencia SIRGAS incluye, por lo tanto, aparte de la conservación física del monumento (redes pasivas), la evolución en el tiempo de las coordenadas de referencia para garantizar la compatibilidad entre el segmento espacial, el segmento de control y las mediciones realizadas por el usuario del sistema GNSS.
- A partir de los datos del VEC\_Ec, desarrollar un modelo de velocidad local para el Ecuador.
- Aquellos puntos cuyas velocidades no han sido derivadas de ocupaciones GPS repetidas en diferentes épocas de tiempo, sino obtenidas a partir de un modelo de interpolación, no deben usarse como puntos de referencia. [www.sirgas.org](http://www.sirgas.org)

## 9.- Agradecimientos

- Instituto Geográfico Militar del Ecuador – IGM.
- Centro de Procesamiento de Datos GNSS del Ecuador – CEPGE.
- Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador – REGME.
- Proceso de Geodesia, IGM – Ecuador.
- Institut de Recherche pour le Développement. IRD – France.
- Géosciences Azur - GeoAzur France.
- Le Centre national de la recherche scientifique CNRS – France.
- Nice Université, Sophia Antipolis, Valbone – France.
- Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional – IGEPN.
- Escuela Politécnica Nacional – EPN.
- Massachusetts Institute of Technology. MIT – USA.
- Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas. SIRGAS.
- Instituto Geográfico Nacional del Perú.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC. Colombia.
- Centro de Procesamiento IGAC. Colombia.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística IBGE. Brasil.
- Centro de Procesamiento CIMA. Argentina.
- Deutsches Geodatisches Forschungsinstitut DGFI. Alemania
- Instituciones públicas y privadas que apoyan el desarrollo de la REGME a nivel nacional.

