

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN
INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

Generación de un campo de deformación postsísmica para las estaciones de la REGME y la RENGEO del Ecuador Continental

Autora:

María Elizabeth Romero Cantos

Director del proyecto

Ing. César Leiva, Mgtr

Director de la carrera

Ing. Alexander Robayo Nieto, Msc

Docente evaluador

Ing. Alfonso Tierra, PhD

Secretaria académica

Ab. Michelle Benavides Guzmán

Marzo, 2023

CONTENIDOS

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

3. OBJETIVOS

4. CONCEPTOS Y GENERALIDADES

5. METODOLOGÍA

6. RESULTADOS

7. DISCUSIÓN

8. CONCLUSIONES

9. RECOMENDACIONES

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La vida útil de un Marco Geodésico de Referencia, radica entre 10 y 15 años, siempre y cuando no ocurra algún evento geofísico de gran impacto que pueda afectar su consistencia de manera anticipada.

El Ecuador al estar enlazado a la red continental **SIRGAS**, está sujeto a las convenciones que propone este organismo regional para conocer la posición de una estación en una época determinada utilizando:

- Parámetros de transformación entre marcos de referencia
- Velocidades

Cuando ocurre un sismo, con esta metodología se debe esperar a que pase un cierto tiempo de relajación para obtener las observaciones que permitan calcular nuevamente las velocidades, lo cual representa la inutilización de datos obtenidos durante este periodo postsísmico que incluso puede llegar a durar años.

El ITRF 2014, involucró en su generación dos innovaciones principales:

- Modelado de las señales estacionales (anuales y semestrales)
- La corrección de la **deformación postsísmica (PSD)** para los sitios que estuvieran sujetos a grandes terremotos, como es el caso del Ecuador.

2. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

Con el antecedente del terremoto del **16 de abril de 2016**, de magnitud 7.8 Mw, la metodología propuesta por SIRGAS, únicamente se puede garantizar hasta el 15 de abril.

No se pueden utilizar las velocidades proporcionadas por el modelo **VEMOS** de SIRGAS , a menos que estas vuelvan a ser calculadas después del periodo de relajación del sismo .

Es de gran importancia:

Generación de un modelamiento de PSD para las estaciones del Ecuador, que sean propensas a eventos sísmicos de gran magnitud.

Garantizar la consistencia del Marco de Referencia Geodésico Nacional del país.

3. OBJETIVOS:

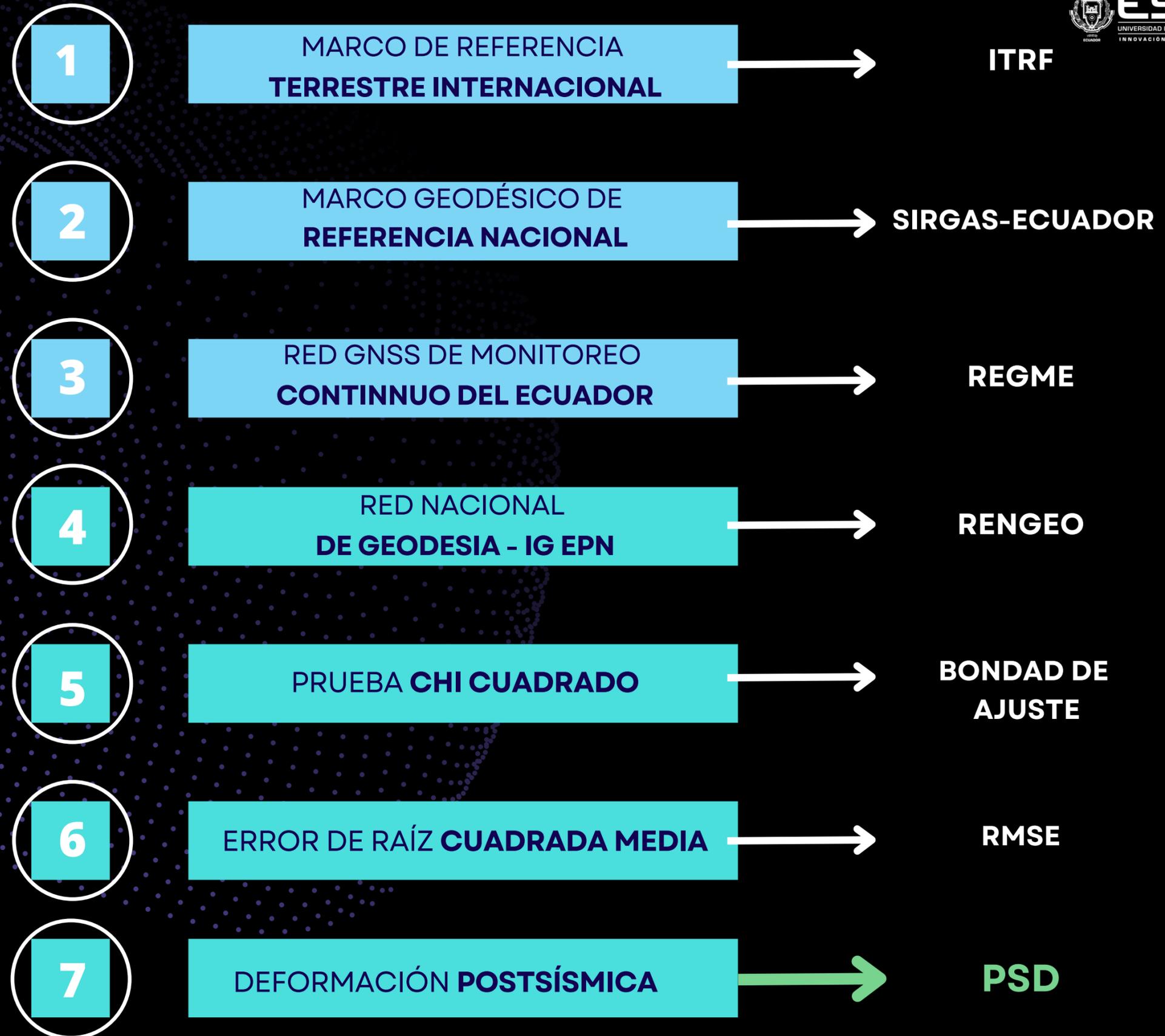
GENERAL:

Generar un campo de deformación postsísmico para las estaciones de la REGME y la RENGEO a través de la metodología del ITRF2014 y mínimos cuadrados para modelar las deformaciones de sismos que han ocurrido o puedan ocurrir en el Ecuador Continental.

ESPECÍFICOS:

- Desarrollar un algoritmo para la obtención del término postsísmico para cada estación del Ecuador a través del método de mínimos cuadrados.
- Seleccionar el mejor modelo de deformación postsísmica mediante pruebas de validación estadística.

4. CONCEPTOS Y GENERALIDADES



DEFORMACIÓN POSTSÍSMICA (PSD)

(Post-seismic Deformation)

A raíz de los sucesos sísmicos catastróficos ocurridos en Sumatra, Chile y Japón, entre los años 2004 a 2011, se evidenció a través de la aplicación del ITRF2008, que las estaciones de dichos lugares siguen **trayectorias no lineales**, es decir, su trayectoria traza una curva con irregularidades y deformaciones.

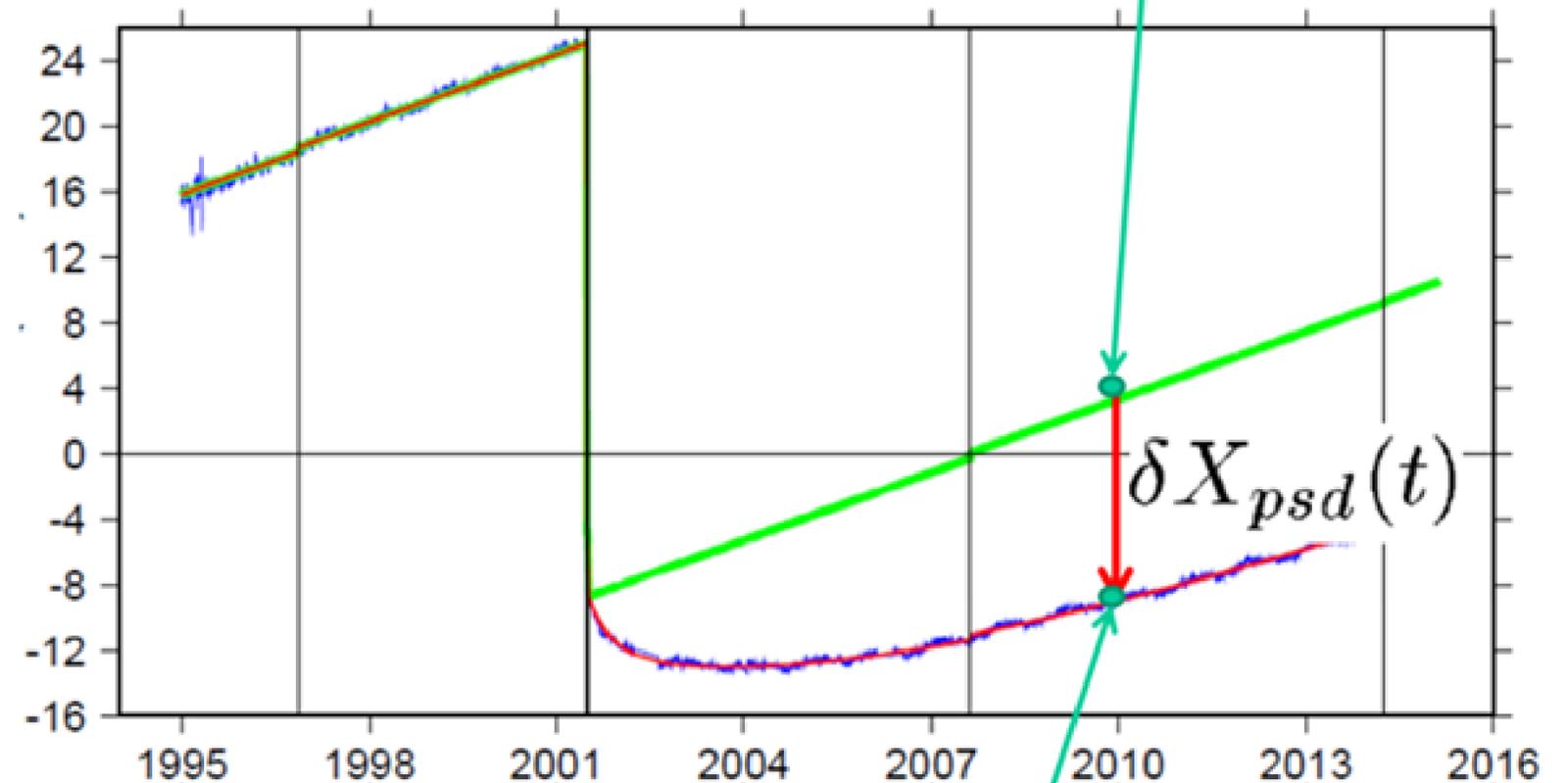
A partir de esto, se dedujo que:

- No se debía modelar la PSD mediante **funciones lineales**.
- Velocidades lineales de la serie temporal de la estación segmentada es imprecisa y no describe adecuadamente las trayectorias postsísmicas.

Metodología propuesta por el IGS - Altamimi et al. (2016)

Corrección PSD

Posición Corregida (ITRF2014)



Posición Observada

Modelos de deformación postsísmica

Después de un sismo, la posición de una estación durante la trayectoria postsísmica X_{PSD}, en una época t, podría escribirse como:

Posición regularizada (ITRF2014)

$$X_{PSD}(t) = X(t_0) + \dot{X}(t - t_0) + \delta X_{PSD}(t)$$

$$\delta L(t) = \sum_{i=1}^{n^l} A_i^l \log\left(1 + \frac{t - t_i^l}{T_i^l}\right) + \sum_{i=1}^{n^e} A_i^e \left(1 - e^{-\frac{t - t_i^e}{T_i^e}}\right)$$

Corrección del Marco Local (E, N, U)

COEFICIENTES DE LOS MODELOS PARAMÉTRICOS:

A_i^l :	Amplitud del término logarítmico;	T :	ad (MJD/365.25)
A_i^e :	Amplitud del término exponencial;	A :	m
T_i^l :	Tiempo de relajación del término logarítmico;		
T_i^e :	Tiempo de relajación del término exponencial;		
t_i^l :	Fecha del terremoto correspondiente al término logarítmico;		
t_i^e :	Fecha del terremoto correspondiente al término exponencial.		

Nota. La fecha del terremoto (t) en: MJD (YYYY-MM-DDTHH:mm:ss)

MODELOS PARAMÉTRICOS:

Modelo 1: Logarítmico (Log)

$$\delta L(t) = \sum_{i=1}^{n^l} A_i^l \log\left(1 + \frac{t - t_i^l}{T_i^l}\right)$$

Modelo 2: Exponencial (Exp)

$$\delta L(t) = \sum_{i=1}^{n^e} A_i^e \left(1 - e^{-\frac{t - t_i^e}{T_i^e}}\right)$$

Modelo 3: Log + Exp

$$\delta L(t) = \sum_{i=1}^{n^l} A_i^l \log\left(1 + \frac{t - t_i^l}{T_i^l}\right) + \sum_{i=1}^{n^e} A_i^e \left(1 - e^{-\frac{t - t_i^e}{T_i^e}}\right)$$

Modelo 4: Exp + Exp

$$\delta L(t) = \sum_{i=1}^{n^e} A_i^e \left(1 - e^{-\frac{t - t_i^e}{T_i^e}}\right) + \sum_{i=1}^{n^e} A_i^e \left(1 - e^{-\frac{t - t_i^e}{T_i^e}}\right)$$

CÁLCULO DE LAS VARIANZAS:

$$\text{var}(\delta L) = C \cdot \text{var}(\theta) \cdot C^T \quad \theta = [A_1^l, T_1^l, \dots, A_{n^l}^l, T_{n^l}^l, A_1^e, T_1^e, \dots, A_{n^e}^e, T_{n^e}^e]$$

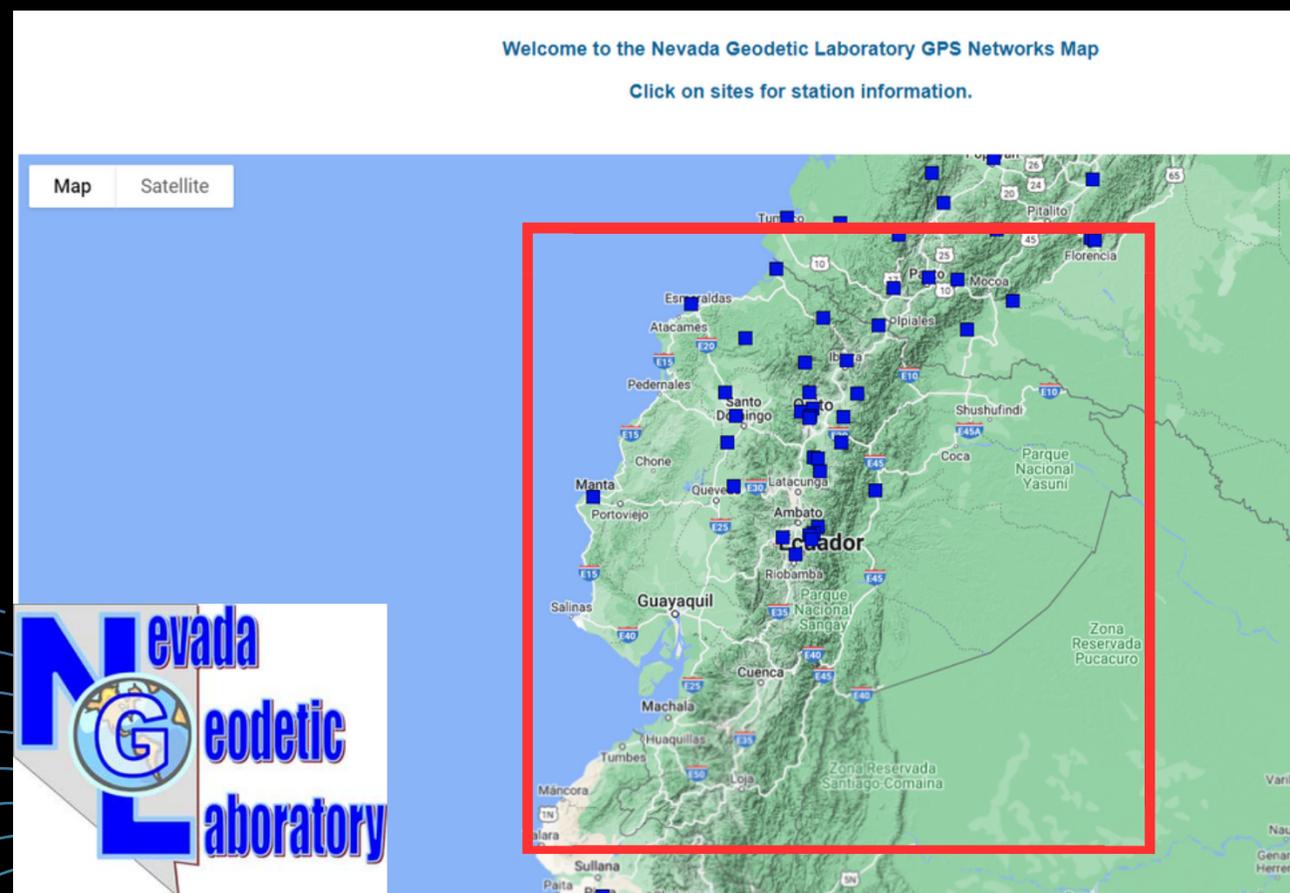
$$\text{var} \begin{bmatrix} \delta X \\ \delta Y \\ \delta Z \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} \text{var}(\delta E) & 0 & 0 \\ 0 & \text{var}(\delta N) & 0 \\ 0 & 0 & \text{var}(\delta U) \end{bmatrix} \cdot R^T$$

TRANSFORMACIÓN:

$$\begin{bmatrix} \delta X \\ \delta Y \\ \delta Z \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} \delta E \\ \delta N \\ \delta U \end{bmatrix}$$

5. METODOLOGÍA

Descarga de datos:

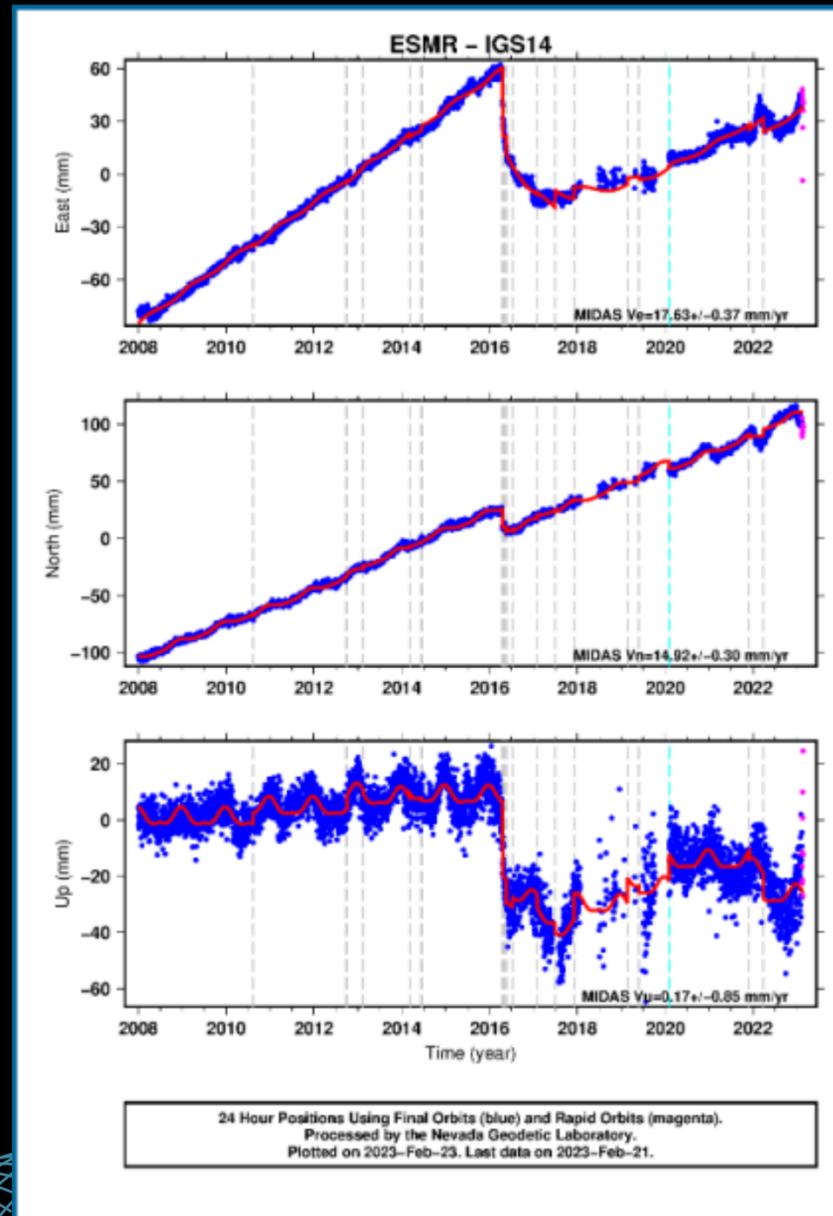


Resumen de productos y estrategia de análisis de datos GPS LGN/UNR

Cita para datos:	Blewitt et al. (2018)
Etiqueta actual:	GipsyX-1.0/IGS14/Repro3.0 de 2019-11-28
Software Utilizado	Desarrollado en JPL: GipsyX Versión 1.0
Método de Procesamiento	Posicionamiento de punto preciso (PPP) ←
	http://geodesy.unr.edu/gps_timeseries
Serie de Tiempo del Sitio NGL	txyz/IGS14/SSSS.txyz2 diario final (x, y, z) tenv3/IGS14/SSSS.tenv diario final (e, n, v)
SSSS = ID del Sitio	tenv3/plates/PP/SSSS.PP.tenv placa final (e, n, v)
PP = ID de Placa	kenv/SSSS/SSSS.YYYY.kenv.zip final de 5 minutos (e, n, v)
YYYY = año	qa/SSSS.qa.gz Serie temporal final de control de calidad
DDD = día del año	rapids/tenv3/FID/SSSS.FID.tenv3 diario rápido (e, n, v)
YYMMDD = fecha	rapids_5min/kenv/by_sta/SSSS.kenv.tar rápido 5 min (e, n, v) ultracombo/kenv/YYYY/DDD/YYMMDDSSSS_fix.kenv ultrarrápido 5 min (e, n, v)
Fecha de Preparación	2019-12-17 para los productos GipsyX/IGS14 de NGL
Fechas de Modificación	2019-12-17 creación inicial
Fecha Efectiva para Análisis de datos	2019-11-28 sitio web actualizado http://geodesy.unr.edu con productos w/NGL GipsyX/IGS14 usando productos JPL Repro3
Ajuste	Filtro Kalman estocástico/suavizado implementado como filtro de información de raíz cuadrada con suavizado
Estación	Estimaciones diarias PPP para todas las coordenadas de los sitios. Aplicadas la transformación diaria en IGS14
Enlace de metadatos completos	http://geodesy.unr.edu/gps/ngl.acn.txt

5. METODOLOGÍA

Análisis visual de las series de tiempo



ESTE ←

NORTE ←

ALTURA ←



Estación de prueba

La estación:

No. Est.	Cod_Est.	¿Sufrió deformación por el terremoto?	¿Existió después del terremoto?	Deformación en sus componentes			Observaciones
				E	N	U	
1	APEC	No	Si	No	No	No	
2	ASEC	Si	Si	Si	Si	Si	
3	BIEC	Si	Si	Si	Si	Si	
4	CHZO	Si	Si	Si	Si	Si	
5	CNEC	Si	Si	Si	Si	Si	
6	COEC	Si	Si	Si	Si	Si	
7	CONE	Si	Si	Si	Si	Si	
8	CSEC	Si	Si	Si	Si	Si	
9	CYRF	No	No	No	No	No	Datos desde JUL 2016
10	ESMR	Si	Si	Si	Si	Si	
11	GGPA	Si	Si	Si	Si	Si	
12	IBEC	Si	Si	Si	Si	Si	
13	LCEC	No	No	No	No	No	Datos desde JUL 2016
14	LIEC	No	No	No	No	No	
15	LMEC	No	No	No	No	No	
16	MZEC	Si	Si	Si	Si	Si	
17	PBLR	No	No	No	No	No	Datos desde JUL 2016
18	PLHA	No	No	No	No	No	
19	PPEC	No	No	No	No	No	
20	QUEM	Si	Si	Si	Si	Si	
21	QUI2	No	No	No	No	No	
22	QUI3	No	No	No	No	No	Error de datos
23	QUI4	Si	Si	Si	Si	Si	
24	RIOP	Si	Si	Si	Si	No	
25	S061	No	No	No	No	No	
26	SALF	Si	Si	Si	Si	Si	
27	SDEC	No	No	No	No	No	Datos desde JUL 2016
28	SHEC	Si	Si	Si	Si	Si	
29	SNLR	Si	Si	Si	Si	Si	
30	TEN1	Si	Si	Si	Si	Si	
31	VCES	No	No	No	No	No	Datos desde JUL 2016
32	VZCY	Si	Si	Si	Si	Si	

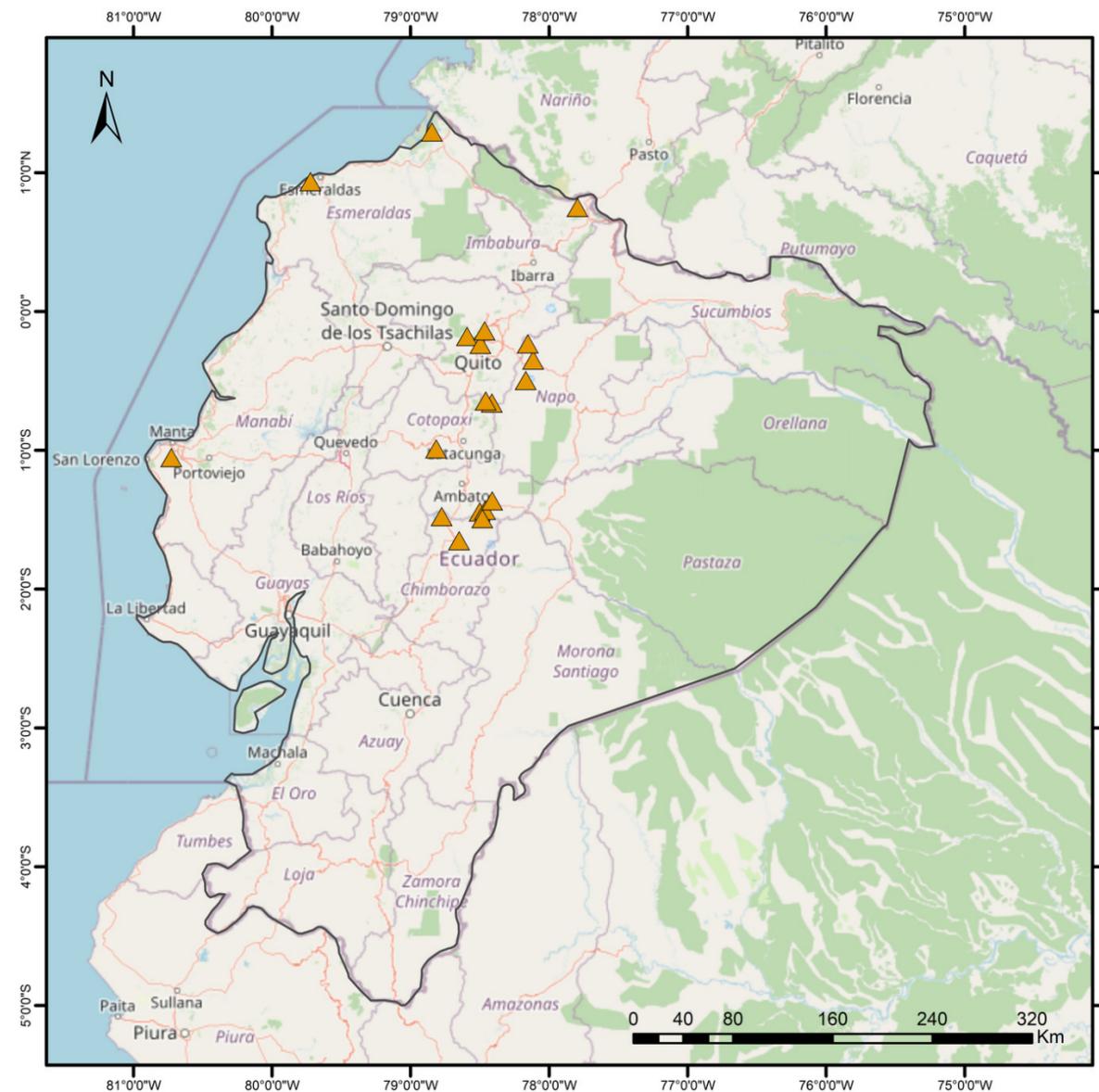
5. METODOLOGÍA

19 Estaciones seleccionadas



ESTACIONES GPS DEL ECUADOR SELECCIONADAS PARA EL MODELAMIENTO POSTSÍSMICO

ESCALA 1: 5.000.000



SIMBOLOGÍA

- ▲ Estaciones GPS
- Límite del Ecuador

REFERENCIAS GEODÉSICAS

Sist. Coordenadas geográficas: GCS_WGS_1984
 Dátum de Referencia: WGS84
 Zona 17S

 UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y CONSTRUCCIÓN INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE			
Contiene: ESTACIONES GPS DEL ECUADOR SELECCIONADAS PARA EL MODELAMIENTO POSTSÍSMICO			
Escala de trabajo:	1:4,929,968	Fecha de elaboración:	27/12/2022
Escala de impresión:	1:5'000.000	Fuentes:	Laboratorio Geodésico de Nevada Google Earth Pro
Elaborado por:		Revisado por:	
Maria Elizabeth Romero Cantos		Ingeniero César Leiva, Mgtr.	

5. METODOLOGÍA

Codificación, Verificación, Ejecución y Validación

Se compiló en un solo script :

- Optimización de los parámetros de **amplitud (A)** y **tiempo de relajación (T)**

Solver de mínimos cuadrados no lineales → **lsqcurvefit**

- Cálculo del RMSE:

Selección del mejor modelo (EXP, LOG, LOG+EXP, EXP+EXP)

- Cálculo de los términos postsísmicos para las componentes E, N, U

$(\delta_E, \delta_N, \delta_U)$



$(\delta_X, \delta_Y, \delta_Z)$



```
clc
clear
close all
format longG

%-----
%
%% PROGRAMA DE MODELAMIENTO DE DEFORMACIÓN POSTSÍSMICA - PSD PARA ESTACIONES GNSS
%-----
%
%% Realizado por: Elizabeth Romero - (Febrero, 2023)
%% ----- Variables Iniciales

MJDs = mjdliandate(2016,04,16,18,58,37); % Fecha del terremoto (MJD)
contador=1;

%% ----- Variables ingresadas por el usuario

[file,path] = uigetfile('*.txt');
dia=57795; % época a calcular
puntoInicial=[0.001 0.001 0.001 0.001];

%% ----- Inicio del proceso de calculo

doc=string(readcell(strcat(path,file)));
numeroEstaciones=length(doc);
for j=1:numeroEstaciones
    valObtenido=[];valObtenido2=[];varPsdo=[];valPolinomio=[];PSD_ENU=[];
    nameBase=strcat(path,doc(j),".xlsx");

%% ----- Carga de datos iniciales

datos=readmatrix(nameBase);
[m n]=size(datos);
lng=datos(1,18);
lat=datos(1,17);
MJD=datos(:,4);

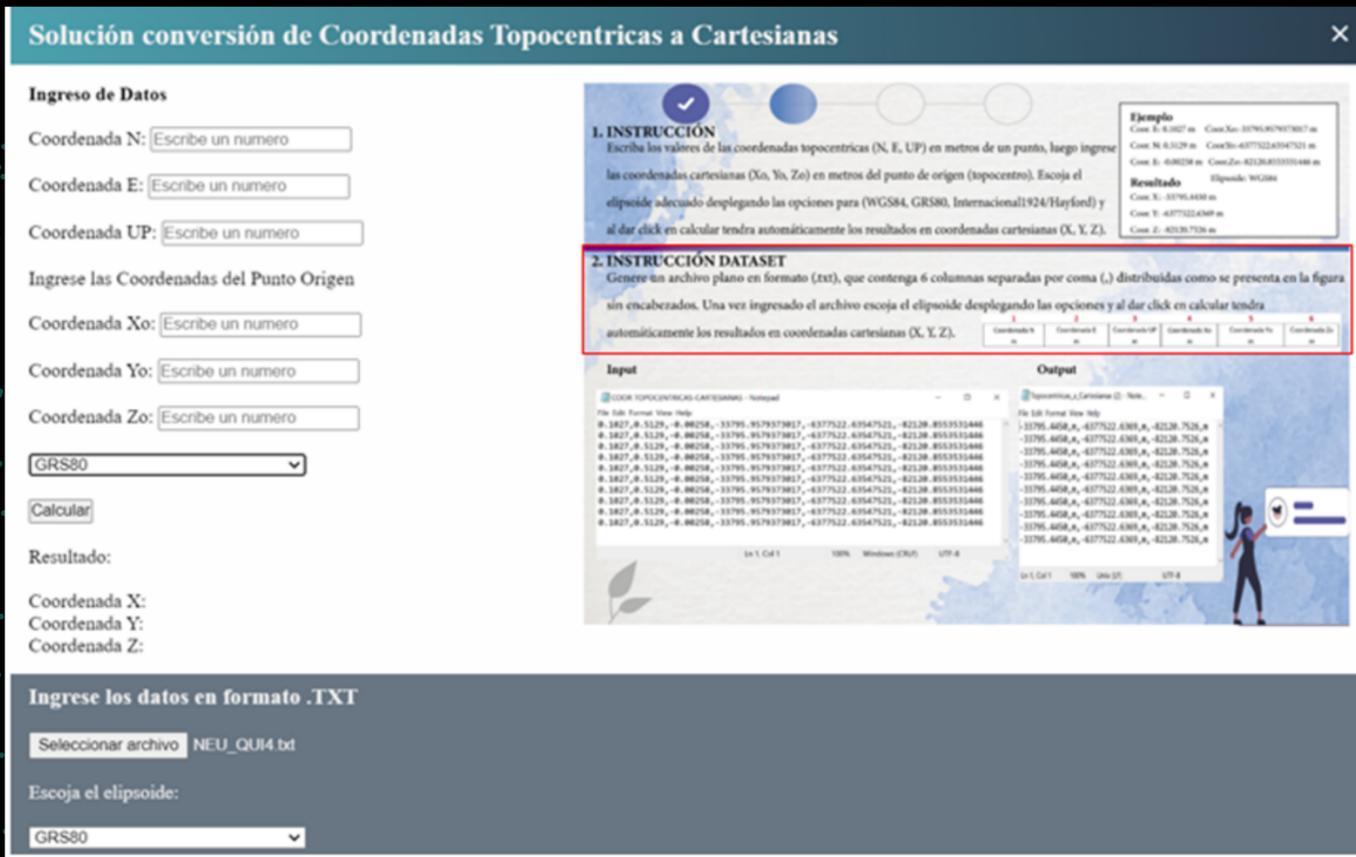
if ~(dia>=MJD(1) && dia<=MJD(end))
    msgbox('Valor fuera de rango, la precision
end
```



5. METODOLOGÍA

Cálculo de velocidades

TRANSFORMACIÓN DE ARCHIVOS DE COORDENADAS



SMART IT GEO – V1.0.0

DEDUCCIONES:

Posición regularizada:

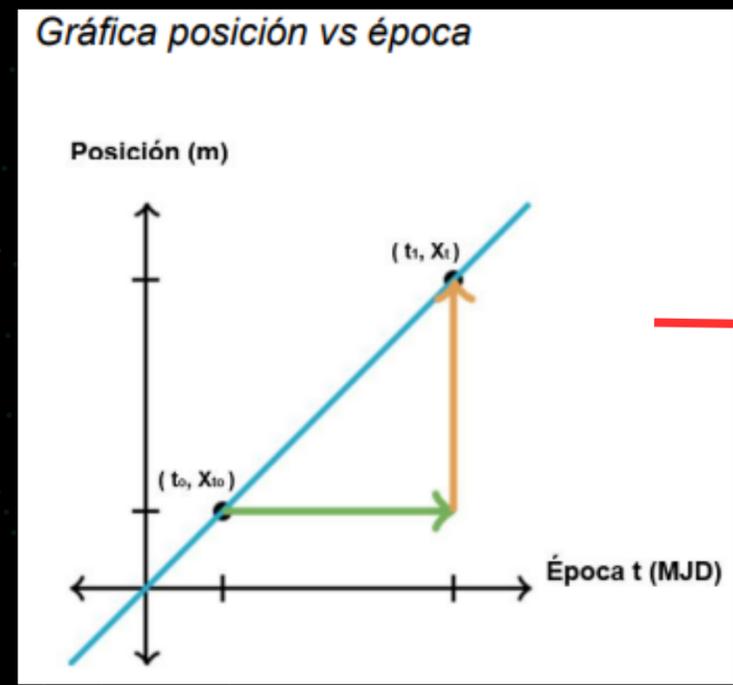
$$X(t) = X(t_0) + \dot{X}(t - t_0)$$

Velocidad lineal:

$$\dot{X} = \frac{X(t) - X(t_0)}{t - t_0}$$

Ec. 1

Partiendo de:



Teniendo los puntos:

P1 (t₀, X₀)
P2 (t, X)

Pendiente de una recta:

$$m = \frac{x_t - x_{t_0}}{t - t_0}$$

Ec. 2

IGUALANDO EC. 1 & 2:

La velocidad es igual a la pendiente de la recta

$$m = \dot{X} = \frac{X(t) - X(t_0)}{(t - t_0)}$$

5. METODOLOGÍA

PRUEBA DE BONDAD DE AJUSTE CHI-CUADRADO X²

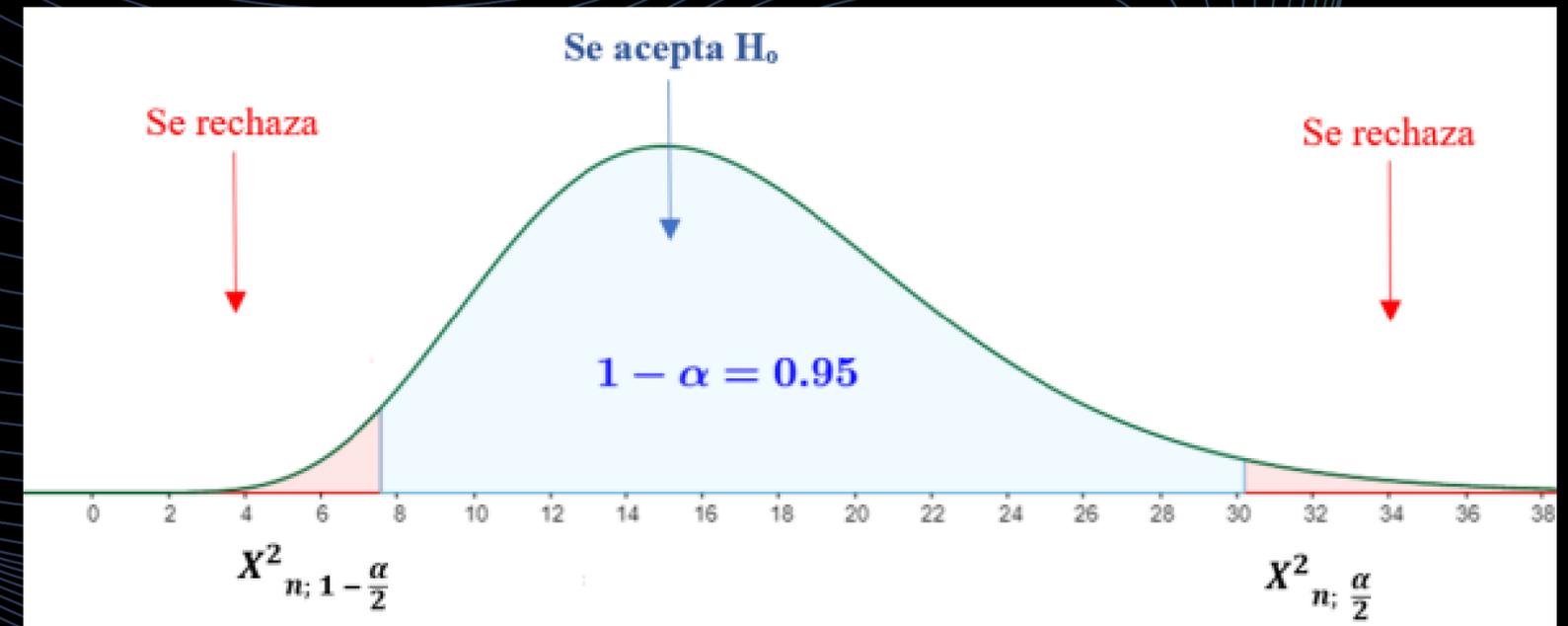
Para comprobar el ajuste de los parámetros optimizados se empleó la prueba de bondad estadística Chi-Cuadrado, a dos colas, a un nivel de confianza del 95%, y un nivel de significancia de $\alpha = 5$, para la comparación de las varianzas (a priori y a posteriori).

Teniendo que:

$$H_0: \hat{\sigma}_2^2 = \sigma_2^2$$

$$H_1: \hat{\sigma}_2^2 \neq \sigma_2^2$$

Por fines prácticos, esta prueba fue realizada únicamente para los resultados obtenidos para la estación de Riobamba (RIOP).



CÁLCULO DEL ESTADÍSTICO:

$$X^2 = \frac{\hat{\sigma}_o^2}{\sigma_o^2} * v$$

RANGO DE ACEPTACIÓN H_0 :

$$\alpha = \% \rightarrow X^2_{\frac{\alpha}{2}=\%} < X^2 < X^2_{\frac{\alpha}{2}=\%}$$

6. RESULTADOS

SELECCIÓN MEJOR MODELO DE OPTIMIZACIÓN:

A y T \rightarrow \leftarrow RMSE

TÉRMINOS DE CORRECCIÓN POSTSÍSMICOS: $(\delta_E, \delta_N, \delta_U)$

Fueron calculados para la época **2017.1068** correspondiente al 11 de febrero de 2017. Se obtuvieron valores al orden de los milímetros y centímetros.

VELOCIDADES:

Valores al orden de los milímetros por año para algunas estaciones y menores a este orden para otras.

RUEBA CHI CUADRADO:

Los estadísticos calculados X^2 para las pruebas de las componentes Este y Norte, dieron como resultado valores de $1.69E-02$ y $5.63E-03$, respectivamente, los cuales no estuvieron dentro de la zona de aceptación establecida por los estadísticos de distribución indicados en la tabla

Resultados del mejor modelo seleccionado por componente - RMSE

Componente	1.Modelo EXP	2.Modelo LOG	3.Modelo LOG+EXP	4.Modelo EXP+EXP
Norte	0	1	18	0
Este	1	4	12	2
Altura	4	7	3	1

Resultados del mejor modelo seleccionado por componente - RMSE

COD_EST	COMP_ESTE					COMP_NORTE					COMP_ALTURA		
	RMSE	MODELO	PARÁMETROS PSD	DESV_EST	UDS.	RMSE	MODELO	PARÁMETROS PSD	DESV_EST	UDS.	RMSE	MODELO	PARÁMETROS PSD
RIOP	0.00220102	EXP	A_EXP	-0.012389503	5.44572E-05	0.00151814	LOG+EXP	A_LOG	0.154047936	0.004111409	-	-	-
			T_EXP	0.079117213	6337529E-03			T_LOG	1.077505633	0.373134795			
								A_EXP	0.008675752	0.000139828			
								T_EXP	0.096776843	0.00686556			

Resultados del mejor modelo seleccionado por componente - RMSE

Comp.	Hipótesis	Varianzas	Nivel de sig. (α)	Nivel de conf. ($1 - \alpha$) %	Estad. X^2	Estadísticos de distribución a dos colas	Decisión:
ESTE	$H_0: \hat{\sigma}_2 = \sigma_2$ $H_1: \hat{\sigma}_2 \neq \sigma_2$	$\sigma_2: 1$ $\hat{\sigma}_2: 6.92268E-06$	5	95	1.69E-02	$X^2_{0.025}: 2305.9588$ $X^2_{0.975}: 2579.8296$	Se rechaza H_0
NORTE	$H_0: \hat{\sigma}_2 = \sigma_2$ $H_1: \hat{\sigma}_2 \neq \sigma_2$	$\sigma_2: 1$ $\hat{\sigma}_2: 2.30863E-06$	5	95	5.63E-03	$X^2_{0.025}: 2304.0149$ $X^2_{0.975}: 2577.7734$	Se rechaza H_0

6. RESULTADOS

AJUSTE MODELOS PSD

Inconsistencias:

Norte: ASEC, BIEC, CHZO, COEC, CONE, ESMR, QUI4, SHEC y SNLR

Altura: ASEC, CNEC, IBEC QUEM y VZCY

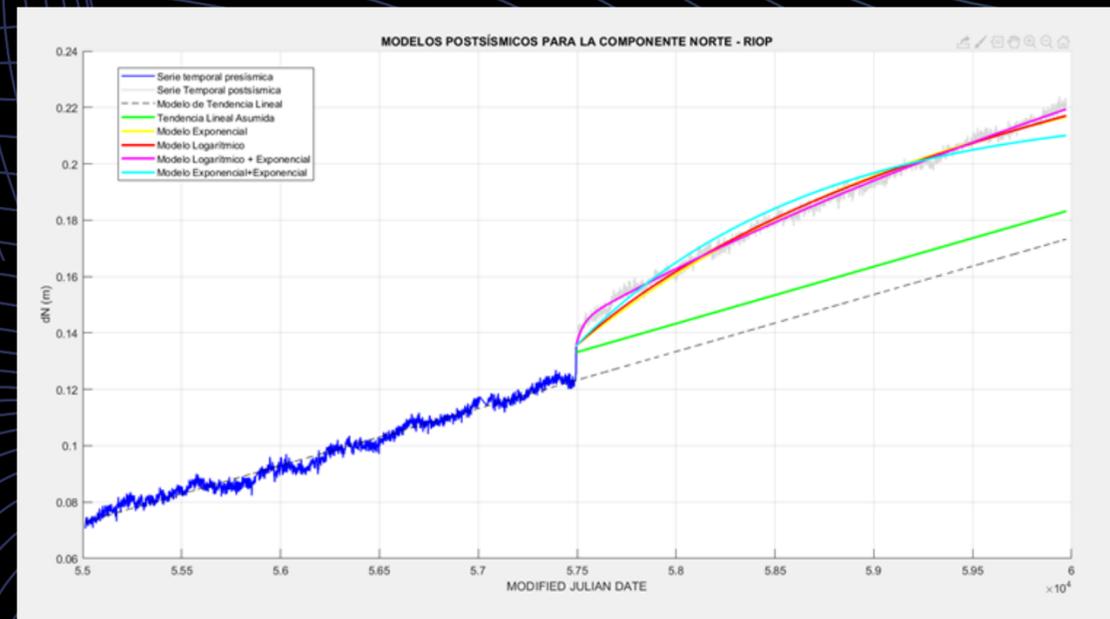
Según estudios anteriores, de Bevis y Brown (2014) y Altamimi et al. (2016):

Se descartaron los modelos para los que no convergía el tiempo de relajación de al menos una función logarítmica o exponencial, así como aquellos que conducían al menos a un parámetro estimado insignificante.

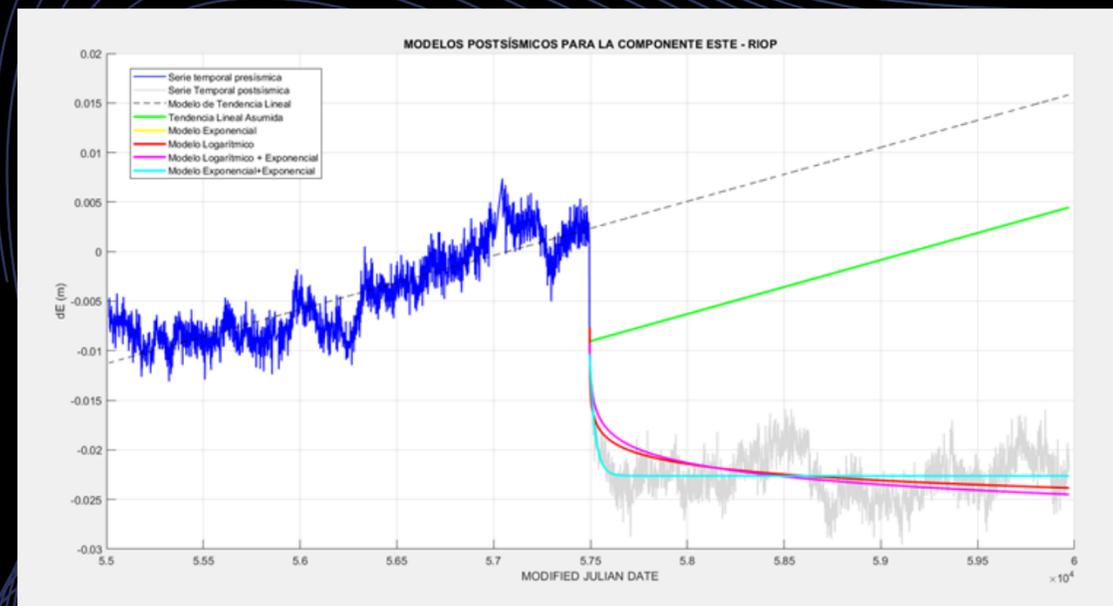
Incapacidad del ajuste:

Influencia de efectos geofísicos como la deformación poroelástica o la afectación directa de las propiedades de fricción de la placa involucrada en el sismo al desplazamiento de las estaciones.

AJUSTE ÓPTIMO

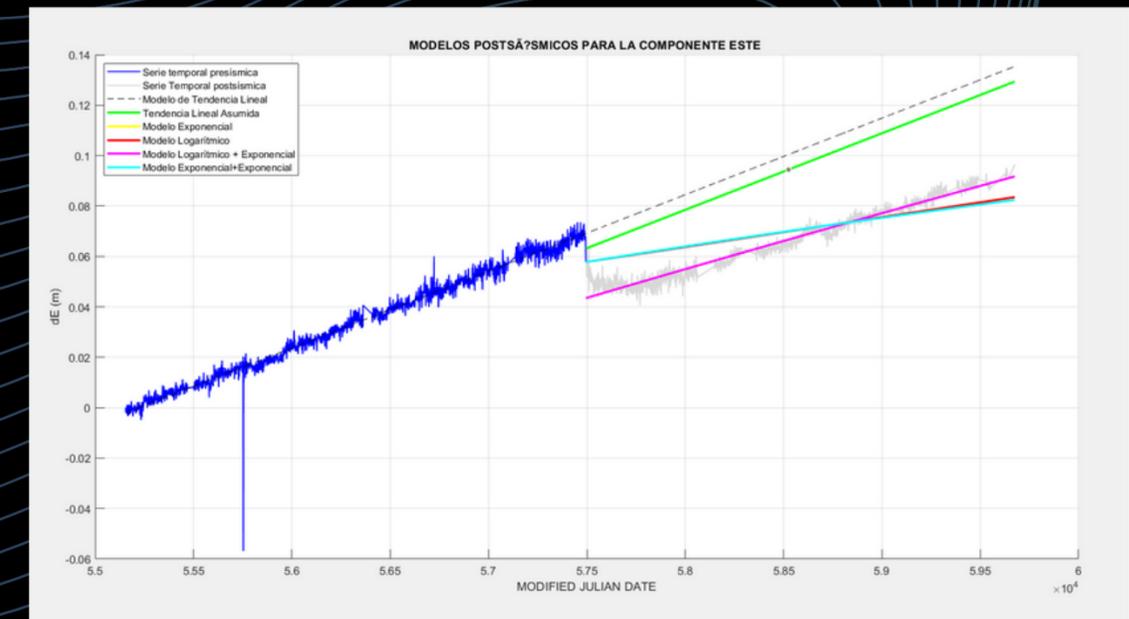


ESTE - RIOP

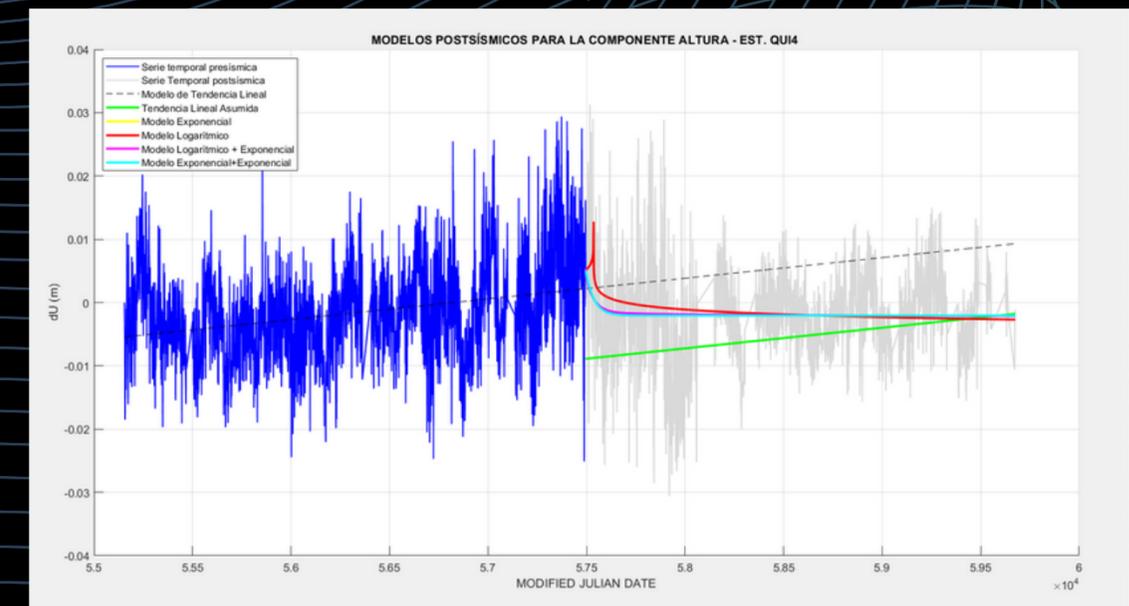


NORTE - RIOP

AJUSTE NO ÓPTIMO



ESTE - SNLR



ALTURA - SNLR

7. DISCUSIÓN

Comparación de los parámetros estimados con los publicados en el ITRF2020

COD.	MODELO	TIPO	COMP.	VALOR PUBLICADO IGS	DESV_EST IGS	VALOR ESTIMADO	DESV_EST ESTIMADA	UDS.
RIOP	EXP	AEXP_E	ESTE	-1.01534276178752E-02	4.22429e-04	-1.2389503E-02	5.44572E-05	m
RIOP	EXP	TEXP_E	ESTE	1.48185368895965E-01	1.07351e-02	7.9117213 E-02	6337529 E-03	m
RIOP	EXP	AEXP_N	NORTE	1.17128466392580E-02	2.58007e-03	1.15488574E-01	2.482045E-03	m
RIOP	EXP	TEXP_N	NORTE	1.90340458845199E+00	3.87970e-01	5.597218687	2.771559E-02	
RIOP	LOG+EXP	A_LOG	NORTE	-	-	0.154047936E-01	0.004111409	m
RIOP	LOG+EXP	T_LOG	NORTE	-	-	1.077505633	0.373134795	m
RIOP	LOG+EXP	A_EXP	NORTE	-	-	0.008675752	0.000139828	m
RIOP	LOG+EXP	T_EXP	NORTE	-	-	0.096776843	0.00686556	m

Dif. modelos exponenciales ESTE:

~**0.002** m para el parámetro de amplitud y ~**0.068** ad tiempo de relajación

Dif. modelos exponenciales NORTE:

~**0.104** m para la amplitud y ~**3.694** ad tiempo de relajación

7. DISCUSIÓN

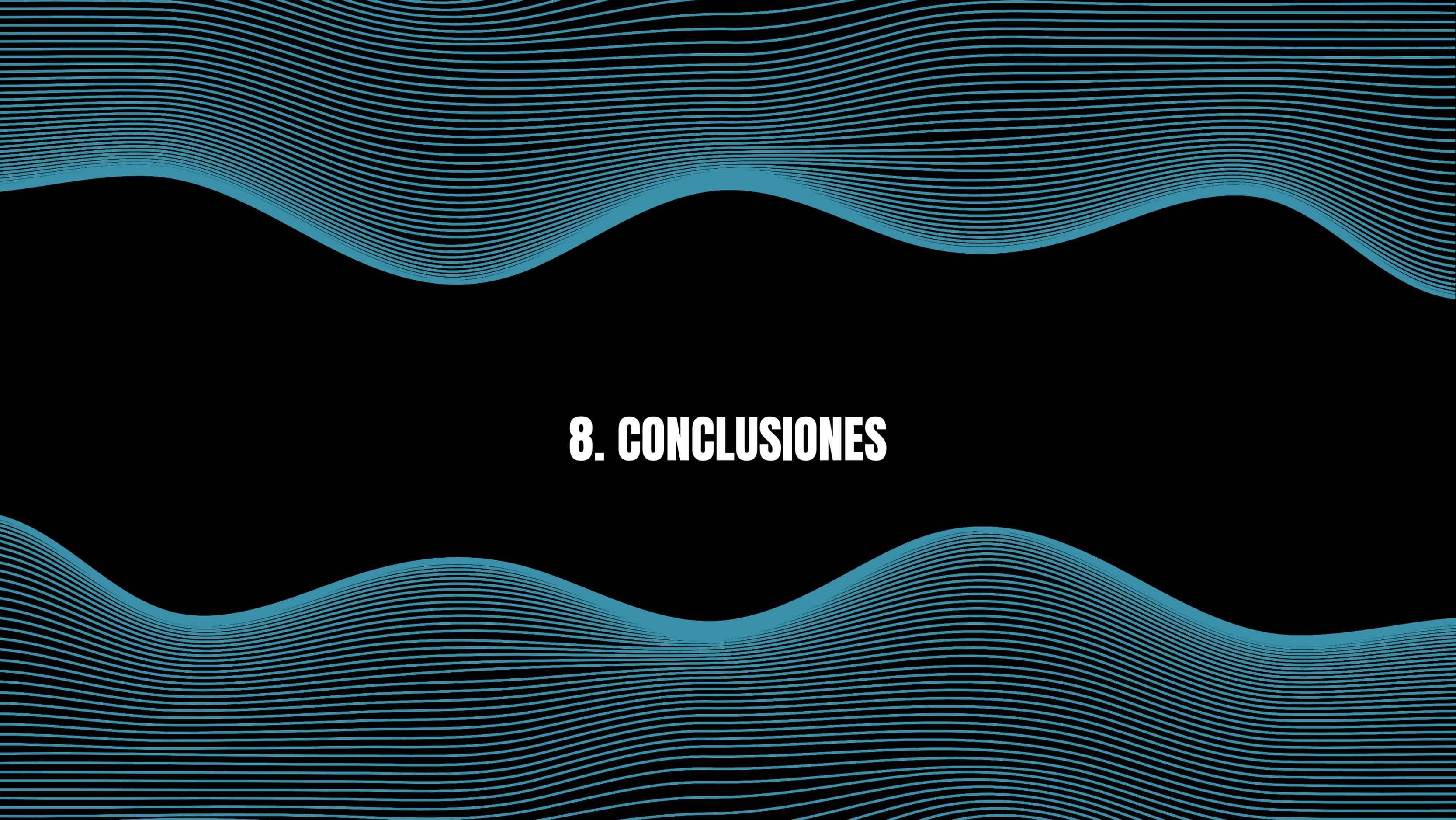
Coordenadas SIRGAS para la transformación de épocas

ID_EST	X (m)	Y (m)	Z (m)	Época	Semana	Fecha	
RIOP	1255144.94242	-6253609.43840	-182569.66485	t	2022.9918	2242	2022-12-28
RIOP	1255144.95017	-6253609.43969	-182569.72468	t ₀	2017.1068	1935	2017-02-08

Transformación de coordenadas con la aplicación de la corrección postsísmica

Transformación de la época 2022.9918 a 2017.1068

TÉRMINOS POSTSÍSMICOS	VELOCIDADES LINEALES	COORD_2017.1068 corregida	COORD_2017.1068 SIRGAS	DIF. XYZ	DIF. ENU
(m)	(m/año)	(m)	(m)	(m)	(m)
δ_x	-0.008211569	V_x -0.0000007	X 1255144.93644	X 1255144.95017	0.01373 E 0.0146
δ_y	-0.008276103	V_y 0.000002	Y -6253609.44339	Y -6253609.43969	0.00370 N -0.0020
δ_z	-0.021882694	V_z 0.00002	Z -182569.70434	Z -182569.72468	-0.02034 U 0.0130

The slide features a dark blue background with decorative wavy lines in a lighter blue color at the top and bottom. The text is centered in the middle of the slide.

8. CONCLUSIONES

8. CONCLUSIONES

- 1** Los modelos paramétricos ajustados con los datos reprocesados por el Laboratorio Geodésico de Nevada, permitieron obtener un ajuste a una escala centimétrica y milimétrica con respecto a la amplitud y a la centésima de año para el tiempo de relajación, siendo el modelo logarítmico exponencial, el modelo con el mejor ajuste bajo el criterio del menor RMSE obtenido. Sin embargo, según las inconsistencias presentadas en los resultados para algunas de las estaciones, se llega a la conclusión de que este modelo no tuvo un ajuste totalmente óptimo, esto se puede atribuir a los datos de entrada de las series temporales, debido a que el método (PPP) con el cual fueron reprocesadas da precisiones a niveles centimétricos y no milimétricos como sería lo deseable. Por otro lado, otra posible razón es la influencia de efectos geofísicos como la deformación poroelástica o las afectación por las propiedades de fricción de la placa involucrada en el sismo.
- 2** En cuanto a la comparación de los valores de los coeficientes estimados en la presente investigación y los publicados por el IGS como productos del ITRF2020, se obtuvieron diferencias a escalas milimétricas para la amplitud y a la centésima de año para el tiempo de relajación, en la componente Este. Por otro lado, la comparación en la componente Norte, indicó diferencias a escalas centimétricas y de años. Estas diferencias se las puede atribuir por un lado, a las series de tiempo que se tuvieron como datos de entrada que estuvieron procesadas con PPP, y por otro lado puede deberse a la diferencia de marcos en los cuales fueron estimados los parámetros comparados, ya que para esta investigación se estimaron con respecto al IGS14. Sin embargo, debido a que los modelos se ajustaron correctamente para la mayor parte de las estaciones, se concluye que de manera general, que la estimación de los parámetros fue válida.

8. CONCLUSIONES

- 3** Con relación a la prueba de transformación de coordenadas de una época actual a una época dentro de la trayectoria postsísmica, se puede concluir que la aplicación de los términos de corrección postsísmicos permiten estimar la posición de la estación en la época deseada con mayor precisión que el hecho de aplicar únicamente las velocidades lineales, ya que como se pudo evidenciar con los valores obtenidos, los términos de corrección postsísmicos se estimaron a escalas centimétricas en comparación a las velocidades que se encuentran a escalas menores al mm/año. Por tanto, se puede decir que la prueba de transformación realizada fue válida, con respecto a las soluciones SIRGAS utilizadas, dando como resultado diferencias a escalas centimétricas y milimétricas para las componentes E, N, U.
- 4** El enfoque de esta investigación se centró, principalmente, en la utilidad geodésica que tiene el modelamiento de trayectorias postsísmicas, debido a que el Ecuador al ser un país propenso a sufrir eventos sismo-tectónicos, cuenta con deformación postsísmica en varias de sus estaciones geodésicas que conforman la materialización de su Marco Geodésico de Referencia, principalmente de la REGME y de forma complementaria de la RENGEO. A este respecto, según los resultados obtenidos, se pudo evidenciar la importancia de la aplicación de la corrección postsísmica para las estaciones que se encuentran sujetas a deformación ocasionada por sismos de gran magnitud, como lo fue el sismo del 16 de abril de 2016. Por tanto, se sugiere la aplicación de las correcciones PSD determinadas con los modelos paramétrico bajo la metodología del IGS, para redefinir el marco de referencia nacional.

The image features a dark blue background with decorative wavy lines in a lighter blue color at the top and bottom. The lines are composed of many thin, parallel lines that create a sense of depth and movement. In the center, the text '9. RECOMENDACIONES' is displayed in a bold, white, sans-serif font.

9. RECOMENDACIONES

9. RECOMENDACIONES

- 1** Se recomienda trabajar con datos que se encuentren procesados con un método lo más preciso posible para que los parámetros de los modelos PSD puedan ajustarse de la manera óptima. Complementariamente, se debe realizar un análisis exploratorio de datos a las series temporales, para descartar errores groseros y sistemáticos en la optimización de los coeficientes de los modelos paramétricos y por tanto en la estimación de los términos de corrección postsísmicos.
- 2** Existen muchos otros métodos matemáticos y estadísticos con los cuales se podría realizar la optimización de los parámetros y la estimación de los términos de corrección postsísmicos, por lo que se recomienda realizar el ajuste con un método diferente al aplicado en esta investigación, como por ejemplo el método de Newton para la optimización de los parámetros y para la selección de los modelos se podría aplicar el teorema de probabilidades de Bayes utilizado por Altamimi et al. (2016).
- 3** Según autores de estudios previos, se pueden añadir a estos modelos de corrección de deformación postsísmica según sea necesario, uno o más términos logarítmicos u otros tipos de correcciones como la corrección de señales periódicas, para tener una mejor estimación de las posiciones de las estaciones dentro del periodo postsísmico. Por tanto, se recomienda la aplicación de estas correcciones para mejorar el modelamiento PSD, con el objetivo de que las posiciones corregidas a través de estos modelos conduzcan a marcos de referencia más consistentes.
- 4** El enfoque de esta investigación tuvo como datos de entrada series temporales GNSS. Sin embargo, como lo indica Altamimi et al. (2016), se puede modelar la deformación postsísmica con series de las demás técnicas geospaciales que existen (DORIS, VLBI, SLR, LLR). Por tanto, para los sitios propensos a eventos telúricos de gran impacto, que posean la disponibilidad de datos de las otras técnicas espaciales, se recomienda aplicar la metodología de modelamiento PSD para las 4 técnicas a manera de comprobación del ajuste de los modelos propuestos como parte de la metodología del IGS. De esta forma se reforzaría su vínculo y consistencia de los sitios que definen los marcos de referencia.



GRACIAS

por su atención

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN
INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

Generación de un campo de deformación postsísmica para las estaciones de la REGME y la RENGEO del Ecuador Continental

Autora:

María Elizabeth Romero Cantos

Director del proyecto

Ing. César Leiva, Mgtr

Director de la carrera

Ing. Alexander Robayo Nieto, Msc

Docente evaluador

Ing. Alfonso Tierra, PhD

Secretaria académica

Ab. Michelle Benavides Guzmán

Marzo, 2023