

Interpolación local TIN (ILT) para el cálculo de las componentes de velocidad horizontal, a partir de series temporales semanales de las estaciones SIRGAS-CON.

Hermógenes Suárez^{1,2}, Ileanis Arenas^{1,2}, Nilbeny Cano¹, Paola Marcano^{1,2}, Miguel Diaz¹, Alisleidy Martínez¹

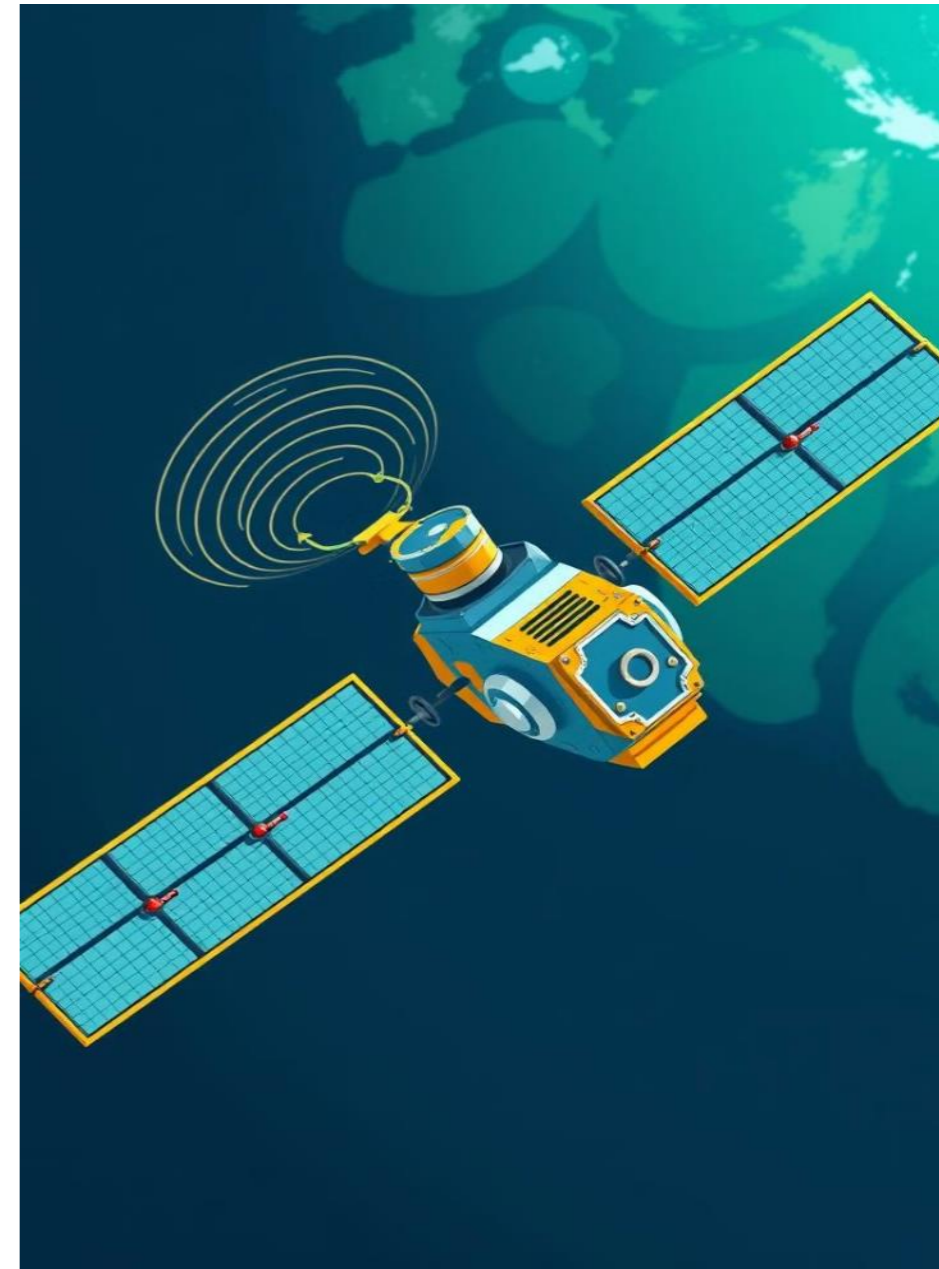
1. Laboratorio de Geodesia Física y Satelital "Dr. Melvin Hoyer". Universidad del Zulia.

2. Sociedad de Ingenieros Geodestas, Geomáticos y Agrimensores de Venezuela (SIGGMA)

INTRODUCCIÓN

El procesamiento preciso de datos GNSS requiere coordenadas actualizadas de las estaciones de referencia, tanto en época como en marco de referencia.

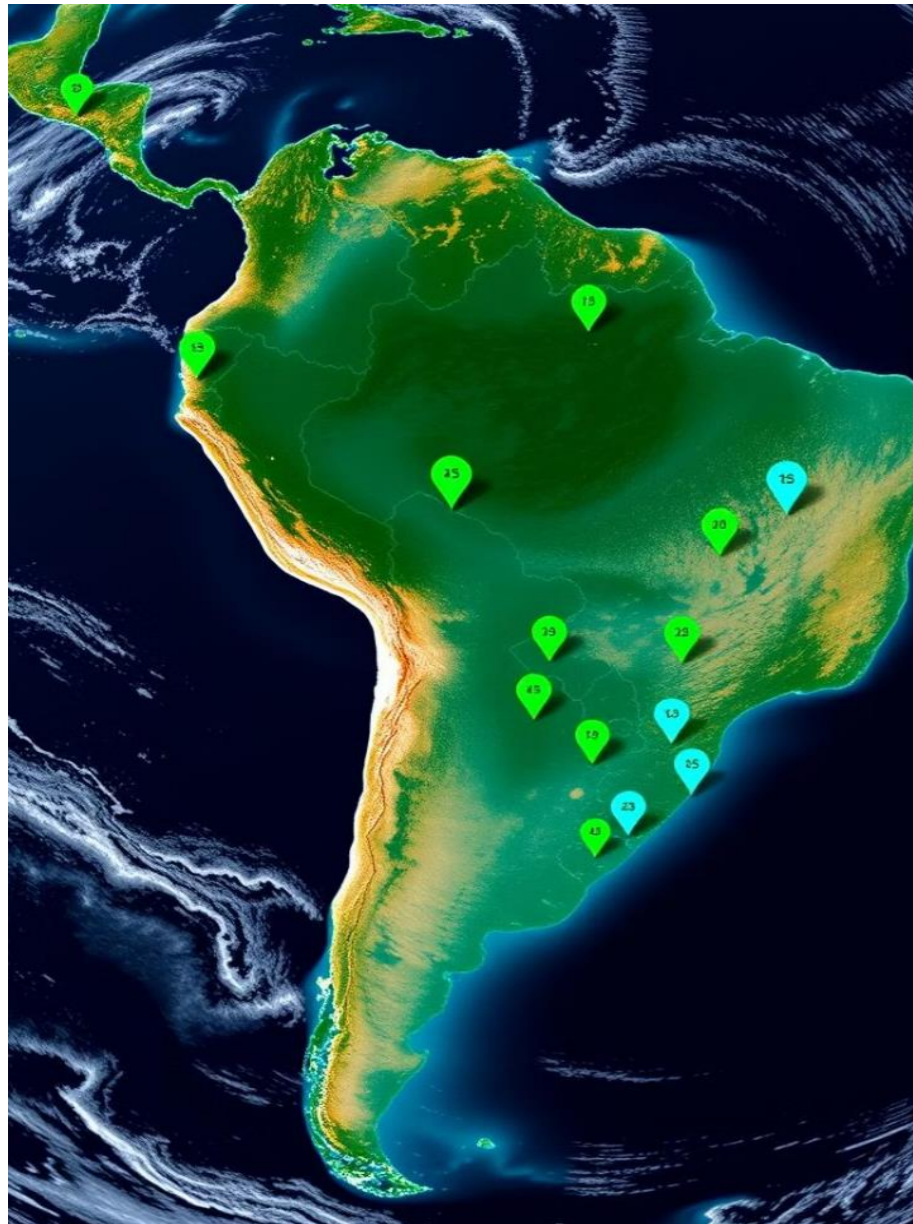
En algunos casos es necesario implementar un proceso más riguroso que incluya transformaciones entre marcos de referencia, actualización de coordenadas a diferentes épocas, así como la interpolación de velocidades a partir de modelos como NUVEL-1A (Argus, D. F. and Gordon R. G., 1991) o VEMOS (Drewes H. and Sánchez L., 2020).





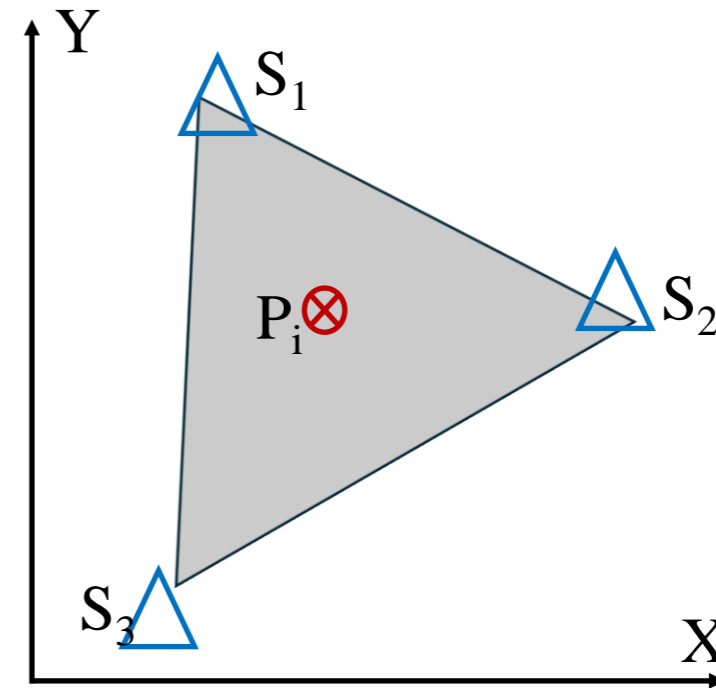
La interpolación de modelos de velocidades geodésicas presenta ventajas y limitaciones:

- 1 — Densidad: en zonas con pocas estaciones de referencia, la interpolación de velocidades puede carecer de la exactitud deseada.
- 2 — Dimensión: estos modelos se limitan a sus componentes horizontales de velocidad (este y norte), lo que restringe su aplicabilidad en estudios donde los cambios de altura son también críticos (ejemplo Bogotá).
- 3 — Vigencia: los modelos de velocidad pueden volverse obsoletos en áreas que experimenten deformaciones significativas o eventos sísmicos posteriores al periodo de observación (ejemplo Chile).



OBJETIVO

Explorar el uso del método de Interpolación Local TIN (ILT) para calcular velocidades horizontales en una estación de interés (P_i), utilizando como referencia tres estaciones cercanas SIRGAS-CON (S_1 , S_2 , S_3) y cuyos desplazamientos son bien conocidos.



DATOS Y HERRAMIENTAS

- 1 Selección de las estaciones SIRGAS-CON (S1, S2, S3) que formen un triángulo que maximice la relación área/perímetro $k = A/P \geq 1.1443$.
- 2 Archivos *.NEU con las soluciones semanales, de los cuales se extrajo la época, y sus componentes (ΔE , ΔN).
- 3 Archivo *.TXT del modelo de velocidades VEMOS2017.
- 4 Archivo *.TXT del modelo de velocidades VEMOS2022.

AMCO.NEU x

DGFI-TUM: Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut
Technische Universität München
SIRGAS Analysis Centre at DGFI-TUM
Contact: <https://www.sirgas.org/>, lm.sanchez@tum.de

Citation:
Sánchez L., Drewes H., Kehm A., Seitz M. (2022).
SIRGAS reference frame analysis at DGFI-TUM.
Journal of Geodetic Science, 12(1), 92-119, 10.1515/jogs-2022-0138

Station position time series retrieved from SIRGAS-Repro2 from January 2000 to December 2021 and from DGFI-TUM's operational SIRGAS combination for the following weeks. Positions differences are given in North, East and height with respect to the first epoch.

File created on 2024-05-19

Contents:
Column 1: epoch in year.decimals
Column 2: civil date
Column 3: GPS week
Column 4: geocentric reference frame
Column 5: station id
Column 6: station domes number
Column 7: difference in the North component (DN) in meters
Column 8: difference in the East component (DE) in meters
Column 9: difference in the height (DU) in meters
Column 10: formal error of the difference in the North component (sigma_DN) in meters
Column 11: formal error of the difference in the East component (sigma DE) in meters

2013.9644	2013-12-18	1771	IGb14	AMCO	41696M001	0.01519	-0.00595			
2013.9836	2013-12-25	1772	IGb14	AMCO	41696M001	0.01544	-0.00609			
2014.0027	2014-01-01	1773	IGb14	AMCO	41696M001	0.01588	-0.00578			
2014.0219	2014-01-08	1774	IGb14	AMCO	41696M001	0.01528	-0.00599			
2014.0411	2014-01-15	1775	IGb14	AMCO	41696M001	0.01506	-0.00653			
2017.0493	2017-01-18	1932	IGb14	AMCO	41696M001	0.05330	-0.01303			
2017.0685	2017-01-25	1933	IGb14	AMCO	41696M001	0.05381	-0.01266			
2017.0877	2017-02-01	1934	IGb14	AMCO	41696M001	0.05073	-0.01563			
2017.1068	2017-02-08	1935	IGb14	AMCO	41696M001	0.05076	-0.01330			
2017.1260	2017-02-15	1936	IGb14	AMCO	41696M001	0.05039	-0.01355			

DATOS Y HERRAMIENTAS

- 5 — Programa de interpolación de velocidades SGC_Vel-TIN_Interp.exe (Suárez H., 2024).
- 6 — Programa de interpolación de velocidades SGC_VEMOS2017_Interp.exe (Suárez H., 2023).
- 7 — Programa de interpolación de velocidades SGC_VEMOS2022_Interp.exe (Suárez H., 2023).

Descripcion: Interpolacion de Velocidades (n, e, h) en la estacion p, por triangulacion desde 3 estaciones circundantes.

```
In [1]: import math as m
import numpy as np
import pandas as pd

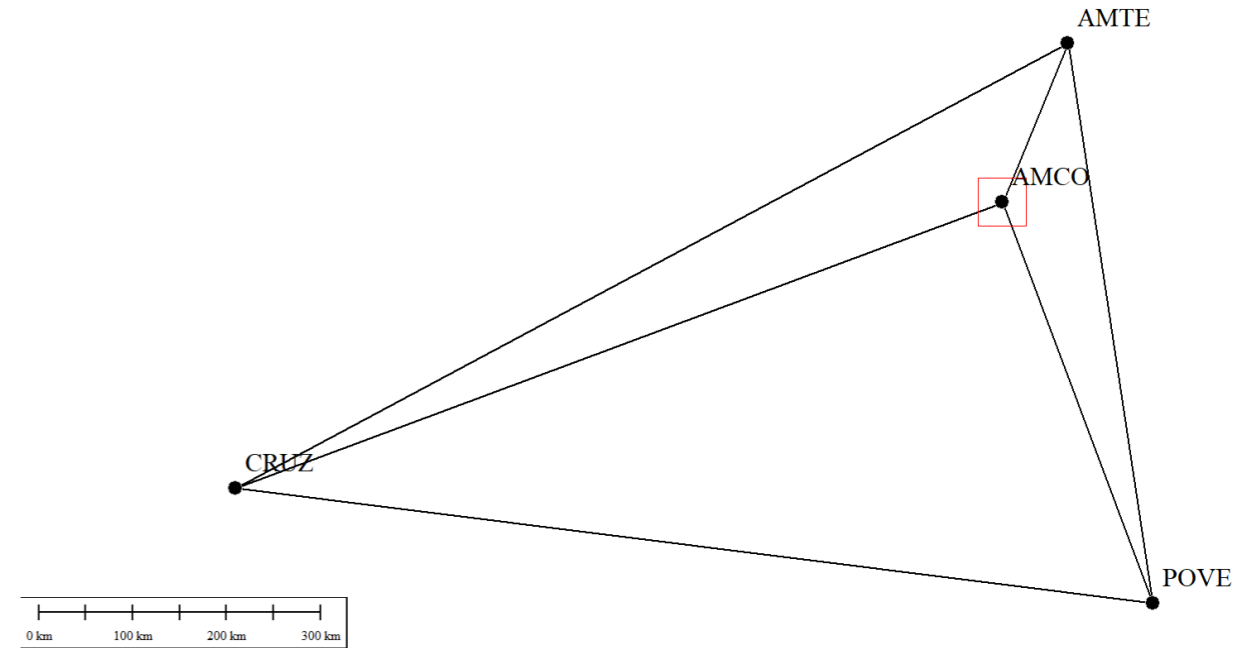
In [2]: #input_file = 'P1_OUT_TA2D_2014_2017V17.csv'
#output_file = 'P2_OUT_TA2D_2014_2017V17.csv'
#input_file = 'P1_OUT_TA2D_2014_2017V22.csv'
#output_file = 'P2_OUT_TA2D_2014_2017V22.csv'
#input_file = 'P1_OUT_TA2D_2017_2022V17.csv'
#output_file = 'P2_OUT_TA2D_2017_2022V17.csv'
#input_file = 'P1_OUT_TA2D_2017_2022V22.csv'
#output_file = 'P2_OUT_TA2D_2017_2022V22.csv'
#input_file = 'P1_OUT_TA2D_2022_2024V17.csv'
#output_file = 'P2_OUT_TA2D_2022_2024V17.csv'
input_file = 'P1_OUT_TA2D_2022_2024V22.csv'
output_file = 'P2_OUT_TA2D_2022_2024V22.csv'

data_csv = pd.read_csv(input_file)
data_csv.columns = ['pais',
                    'station_p', 'lat_p', 'lon_p', 'h_p', 'epoch1_p', 'epoch2_p',
                    'dn1_p', 'dn2_p', 'de1_p', 'de2_p', 'du1_p', 'du2_p',
                    'sdn1_p', 'sdn2_p', 'sde1_p', 'sde2_p', 'sdu1_p', 'sdu2_p',
                    'station_1', 'lat_1', 'lon_1', 'h_1', 'epoch1_1', 'epoch2_1',
                    'dn1_1', 'dn2_1', 'de1_1', 'de2_1', 'du1_1', 'du2_1',
                    'sdn1_1', 'sdn2_1', 'sde1_1', 'sde2_1', 'sdu1_1', 'sdu2_1',
                    'station_2', 'lat_2', 'lon_2', 'h_2', 'epoch1_2', 'epoch2_2',
                    'dn1_2', 'dn2_2', 'de1_2', 'de2_2', 'du1_2', 'du2_2',
                    'sdn1_2', 'sdn2_2', 'sde1_2', 'sde2_2', 'sdu1_2', 'sdu2_2',
```

METODOLOGÍA

El método ITL se basa en formar un triángulo por tres (3) estaciones SIRGAS-CON (S_r) circundantes al punto de interés (P_i), a las cuales se les conocen sus coordenadas (X_r, Y_r) y velocidades (V_{Er}, V_{Nr}) para un intervalo de tiempo definido (Δt).

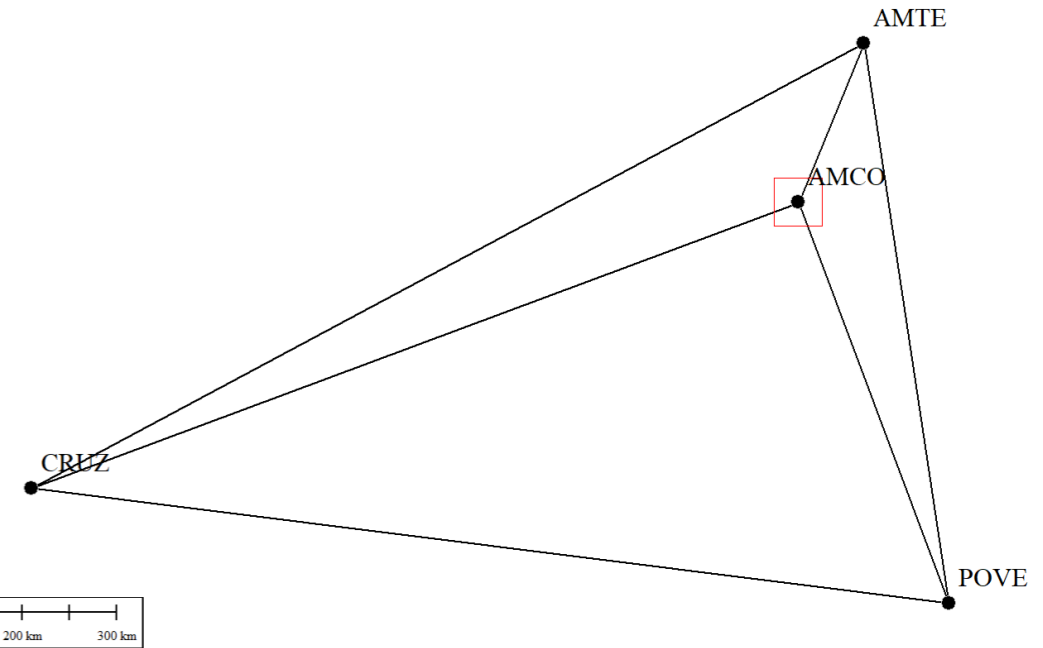
Luego a partir de las tres (3) estaciones SIRGAS-CON (S_r) se genera un modelo de regresión lineal de forma $V = aX + bY + C$, el cual permite interpolar la velocidad en cualquier punto (P_i) dentro del triángulo.



Configuración triangular de estaciones ($S_{1,2,3}$) y estación a interpolar (P_i).

METODOLOGÍA

- 1 Calcular las velocidades horizontales (V_{Er} , V_{Nr}) de las tres (3) estaciones de referencia SIRGAS-CON (S_r)
- 2 Interpolar las velocidades en el punto (P_i) de interés, aplicando la Interpolación Local TIN (ITL).
- 3 Comparar las velocidades interpoladas con las velocidades conocidas, y calcular sus residuales.
- 4 Repetir 3 usando los modelos VEMOS.



Configuración triangular de estaciones ($S_{1,2,3}$) y estación a interpolar (P_i).

1 Velocidades horizontales (V_{Er} , V_{Nr}) de las tres (3) estaciones de referencia SIRGAS-CON (S_r)

Las velocidades (V_{Er} , V_{Nr}) en un punto se calculan a partir del cambio en sus coordenadas (ΔE , ΔN) entre dos épocas de observación, es decir, se refiere al cambio discreto (medible y finito) para un intervalo de tiempo determinado.

Las ecuaciones para el cálculo de las velocidades son:

$$V_{Er} = (\Delta E_f - \Delta E_i) / (t_f - t_i)$$

$$V_{Nr} = (\Delta N_f - \Delta N_i) / (t_f - t_i)$$

2013.9644	2013-12-18	1771	IGb14	AMCO	41696M001	0.01519	-0.00595
2013.9836	2013-12-25	1772	IGb14	AMCO	41696M001	0.01544	-0.00609
2014.0027	2014-01-01	1773	IGb14	AMCO	41696M001	0.01588	-0.00578
2014.0219	2014-01-08	1774	IGb14	AMCO	41696M001	0.01528	-0.00599
2017.0493	2017-01-18	1932	IGb14	AMCO	41696M001	0.05330	-0.01303
2017.0685	2017-01-25	1933	IGb14	AMCO	41696M001	0.05381	-0.01266
2017.0877	2017-02-01	1934	IGb14	AMCO	41696M001	0.05073	-0.01563
2017.1068	2017-02-08	1935	IGb14	AMCO	41696M001	0.05076	-0.01330
2017.1260	2017-02-15	1936	IGb14	AMCO	41696M001	0.05039	-0.01355

$$V_{Er} = \frac{[(-0.01563) - (-0.00578)]}{2017.0877 - 2014.0027} = -0.00985 / 3.085 = -0.0032 \text{ m/a}$$

$$V_{Nr} = \frac{[(0.05073) - (0.01588)]}{2017.0877 - 2014.0027} = 0.03485 / 3.085 = 0.1129 \text{ m/a}$$

2 Interpolación de velocidades en el punto (Pi), aplicando el ITL

El método ITL se basa en un modelo de regresión lineal de forma $V = aX + bY + C$, el cual permite interpolar la velocidad en cualquier punto (Pi) dentro del triángulo, y cuyas ecuaciones de observación son:

$$a \cdot X + b \cdot Y + c = VE$$

$$d \cdot X + e \cdot Y + f = VN$$

Notación matricial del sistema de ecuaciones de observación $AX = L$, donde

$$\begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & 1 \\ X_2 & Y_2 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & X_2 & Y_2 & 0 \\ X_3 & Y_3 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & X_3 & Y_3 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} VE_1 \\ VN_1 \\ VE_2 \\ VN_2 \\ VE_3 \\ VN_3 \end{bmatrix}$$

Una vez determinados (a, b, c, d, e, f), se interpolan las velocidades sobre el punto de interés (Pi):

$$VE_i = a \cdot X_i + b \cdot Y_i + c$$

$$VN_i = d \cdot X_i + e \cdot Y_i + f$$

3

Comparar las velocidades interpoladas con las conocidas, calculando diferencias.

Para este estudio, se seleccionaron varios triángulos independientes, cada uno con su respectivo punto interior (P_i), y sus tres (3) estaciones circundantes, todas distribuidas en el continente sur americano. Se aplicó el método ILT para interpolar las velocidades en las estaciones (P_i), también pertenecientes a SIRGAS-CON, por lo cual, sus velocidades son bien conocidas, permitiendo calcular residuales de velocidad y su posterior análisis estadístico de los RMSE.

$$\delta VE_i = VE_{i(ILT)} + VE_{i(SIRGAS-CON)}$$

$$RMSE_{VE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\delta VE_i)^2}{n}}$$

$$\delta VN_i = VN_{i(ILT)} + VN_{i(SIRGAS-CON)}$$

$$RMSE_{VN} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\delta VN_i)^2}{n}}$$

FASE EXPERIMENTAL

dt	P _i	S _r	P _i	S _r	P _i	S _r	P _i	S _r	P _i	S _r
2014.0 - 2017.1		AMTE		MD01		MTCN		BELE		MABA
	<i>AMCO</i>	POVE	<i>BLPZ</i>	URUS	<i>GOGY</i>	MGMC	<i>IGM1</i>	PITN	<i>MABB</i>	CRAT
		CRUZ		AREQ		GOJA		MABA		TOGU
		MABA		MTCO		FALK		CEEU		RIOB
	<i>MABS</i>	CRAT	<i>MTSR</i>	CUIB	<i>RIO2</i>	AUTF	<i>RNMO</i>	RNNA	<i>ROGM</i>	ROJI
		TOGU		ROCD		PARC		CRAT		MD01
		PPTÉ		SCCH		NEIA		UYRI		MGBH
	<i>ROSA</i>	PRCV	<i>SCLA</i>	SCFL	<i>UFPR</i>	SCFL	<i>UYDU</i>	UYRO	<i>VICO</i>	RJCG
		MSDR		POAL		PRGU		UYMO		RIOD
		PEPE		GOUR		SALU		CATA		MTJI
2017.1- 2022.0	<i>BAIT</i>	SAVO	<i>BRAZ</i>	MGMC	<i>CESB</i>	CEFT	<i>CORD</i>	UNRO	<i>CUIB</i>	GOUR
		BABJ		GOGY		PEPE		SL01		CORU
		SALU		MGMC		CEEU		TOPL		PRMA
	<i>MABA</i>	TOPL	<i>MGBH</i>	VICO	<i>PEAF</i>	PBCG	<i>PICR</i>	PEPE	<i>PRGU</i>	UFPR
		AMUA		MGRP		PEPE		BABJ		SCCH
		SCCH		SPFR		UYPA		UYFS		UYCL
	<i>SMAR</i>	RSPE	<i>SPJA</i>	SPC1	<i>UYPT</i>	UYSG	<i>UYSJ</i>	UYMO	<i>UYTT</i>	UYLP
		RSAL		SPLI		UYFS		UYCO		UYDU



FASE EXPERIMENTAL: Velocidades interpoladas y residuales (2014.0 - 2017.1)

Pn	SIRGAS-CON		ITL		Res.		VEMOS2017		Res.		VEMOS2022		Res.	
	VNi	VEi	VNi	VEi	δ VNi	δ VEi	VNi	VEi	δ VNi	δ VEi	VNi	VEi	δ VNi	δ VEi
AMCO	11.31	-2.31	11.29	-3.18	-0.02	-0.87	11.86	-2.89	0.55	-0.58	13.30	-3.93	0.54	0.47
BLPZ	8.47	-2.2	8.23	-2.44	-0.24	-0.24	11.80	2.94	3.33	5.14	12.86	2.33	4.39	4.53
GOGY	11.88	-4.39	11.26	-4.83	-0.62	-0.44	12.59	-2.59	0.71	1.8	11.48	-2.62	-0.3	1.48
IGM1	11.78	-4.1	11.9	-3.43	0.12	0.67	13.10	-1.93	1.32	2.17	12.73	-3.68	0.85	0.71
MABB	12.76	-4.4	12.62	-4.4	-0.14	0	13.04	-2.87	0.28	1.53	12.15	-2.94	0.83	-0.08
MABS	12.07	-6.28	12.85	-3.27	0.78	3.01	12.55	-3.31	0.48	2.97	12.26	-3.39	0.95	-1.08
MTSR	12.71	-4.17	11.2	-2.91	-1.51	1.26	12.82	-2.75	0.11	1.42	11.56	-2.02	0.98	-0.18
RIO2	11.28	4.73	11.63	6.24	0.35	1.51	14.43	6.71	3.15	1.98	11.88	-3.16	0.3	1.22
RNMO	13.11	-5.72	11.47	-4.41	-1.64	1.31	14.10	-3.67	0.99	2.05	12.03	5.38	0.75	0.65
ROGM	10.58	-1.84	11.61	-2.17	1.03	-0.33	11.66	-1.27	1.08	0.57	13.40	-3.74	0.69	0.43
ROSA	11.58	-4.38	12.22	-3.41	0.64	0.97	12.45	-1.82	0.87	2.56	14.02	-4.55	0.91	1.17
SCLA	11.32	-2.86	11.9	-3.4	0.58	-0.54	13.62	-1.81	2.3	1.05	11.72	-2.68	2.07	-1.1
UFPR	13.21	-3.27	10.91	-3.38	-2.3	-0.11	13.37	-2.33	0.16	0.94	12.61	-3.36	-0.6	-0.09
UYDU	9.65	-1.58	11.45	-2.7	1.8	-1.12	13.07	-1.33	3.42	0.25	12.42	-4.77	1.91	-0.47
VICO	10.51	-4.3	10.68	-7.4	0.17	-3.1	12.65	-3.33	2.14	0.97	13.20	-4.30	1.13	1.98
RMSE:					±1.1	±1.4	RMSE:		±1.8	±2.1	RMSE:		±1.5	±1.5

FASE EXPERIMENTAL: Velocidades interpoladas y residuales (2017.1 – 2022.0)

Pn	SIRGAS-CON		ITL		Res.		VEMOS2017		Res.		VEMOS2022		Res.	
	VNi	VEi	VNi	VEi	δ VNi	δ VEi	VNi	VEi	δ VNi	δ VEi	VNi	VEi	δ VNi	δ VEi
BAIT	11.77	-4.66	12.71	-4.84	0.94	-0.18	12.89	-3.29	1.12	1.37	11.52	-2.83	0.42	-0.06
BRAZ	12.41	-4.79	12.42	-3.87	0.01	0.92	12.69	-2.65	0.28	2.14	11.98	-2.61	0.04	0.63
CESB	12.21	-5.55	10.61	-5.12	-1.6	0.43	14.02	-3.84	1.81	1.71	10.10	-3.03	0.08	-0.96
CORD	10.02	-2.07	9.85	-1.87	-0.17	0.2	11.71	-2.74	1.69	-0.67	12.59	-3.61	0.42	0.17
CUIB	10.58	-3.27	11.99	-4.11	1.41	-0.84	12.27	-2.5	1.69	0.77	11.96	-2.74	0.5	0.2
MABA	12.19	-6.08	11.11	-5.17	-1.08	0.91	13.12	-3.23	0.93	2.85	13.10	-4.06	0.49	1.26
MGBH	11.29	-3.01	12.73	-3.67	1.44	-0.66	12.87	-3.42	1.58	-0.41	11.59	-2.63	0.04	0.21
PEAF	12.87	-5.48	12.28	-5.22	-0.59	0.26	13.1	-3.8	0.23	1.68	13.04	-5.28	0.17	0.2
PICR	12.61	-5.32	12.25	-4.92	-0.36	0.4	12.94	-2.26	0.33	3.06	12.79	-3.80	0.38	0.99
PRGU	12.03	-3.21	12.19	-4.6	0.16	-1.39	14.09	-1.79	2.06	1.42	12.71	-4.16	0.94	0.5
SMAR	11.94	-3.24	11.93	-3.18	-0.01	0.06	13.55	-1.9	1.61	1.34	12.74	-2.83	0.71	0.38
SPJA	12.17	-3.78	12.44	-3.73	0.27	0.05	12.67	-2.44	0.5	1.34	13.01	-3.80	0.82	2.28
UYPT	11.1	-2.77	11.09	-2.75	-0.01	0.02	12.9	-1.42	1.8	1.35	12.69	-4.42	1.4	-1.41
UYSJ	11.55	-2.84	10.97	-2.74	-0.58	0.1	13.11	-1.62	1.56	1.22	12.70	-3.43	2.12	-0.16
UYTT	11.46	-2.94	11.43	-2.64	-0.03	0.3	13.15	-1.64	1.69	1.3	13.06	-4.56	0.85	0.99
					RMSE:	±0.8	±0.6	RMSE:	±1.4	±1.7	RMSE:	±0.8	±0.9	

RESULTADOS

Resultados 2014.0 - 2017.1

Método	RMSE VN (mm/a)	RMSE VE (mm/a)
ILT	±1.1	±1.4
VEMOS 2017	±1.8	±2.1
VEMOS 2022	±1.5	±1.5

Resultados 2017.1 - 2022.0

Método	RMSE VN (mm/a)	RMSE VE (mm/a)
ILT	±0.8	±0.6
VEMOS 2017	±1.4	±1.7
VEMOS 2022	± 0.8	± 0.9

ANÁLISIS DE RESULTADOS

- En general, el método ITL reportó los RMSE más bajos en comparación con VEMOS2017 y VEMOS2022.
- De las 30 comparaciones realizadas, el 60% de las estaciones evaluadas mostraron RMSE más bajos usando la interpolación ITL.
- El modelo VEMOS2022 mostró menores RMSE que el VEMOS2017 en todas las pruebas, incluso en el periodo 2014.0-2017.1.
- Todos los métodos presentan una mejora en sus resultados a partir de 2017.1, ya que las estaciones tienen menos discontinuidades o saltos.
- El VEMOS puede perder precisión en la medida que se aplica fuera del intervalo de tiempo para el cual fueron estimados originalmente, y es precisamente en estos casos donde el método ITL es más relevante.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- **Precisión**

ITL reproduce con exactitud las velocidades SIRGAS-CON, siempre que sea aplicado con rigor y superando las condiciones que lo limitan.

- **Flexibilidad Temporal**

El intervalo de tiempo se puede modificar (expandir, acortar o mover).

- **Flexibilidad Geométrica**

Se pueden agregar más estaciones, siempre que estas cumplan las condiciones mínimas requeridas por el método.

- **Futuras Investigaciones**

Se recomienda ampliar este estudio sobre la aplicabilidad del método en otros periodos.

- **Precauciones**

Se recomienda considerar las limitaciones en áreas costeras o con geometría deficiente y en placas tectónicas distintas.

REFERENCIAS

1. Li, Z., Zhu, C., Gold, C., Wu, H., & Fritsch, D.: "Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology". CRC Press, 2005.
2. Argus, D. F., R. G. Gordon.: "No-net-rotation model of current plate velocities incorporating plate motion model NUVEL-1". Geophys. Res. Lett., 18, (1991), 2038-2042.
3. Drewes H. and Sánchez L.: "Velocity model for SIRGAS 2017: VEMOS2017", doi: 10.1594/PANGAEA.912350, Technische Universitaet Muenchen, Deutsches Geodaetisches Forschungsinstitut (DGFI-TUM), IGS RNAAC SIRGAS. (2020).
4. Suárez H.: "SIGGMA GEODETIC CALCULATOR - SGC". Sociedad De Ingenieros Geodestas, Geomáticos y Agrimensores De Venezuela - SIGGMA. 2023. <https://siggma.xyz/sgc/>
5. Drewes H.: "Modelar el movimiento de la superficie terrestre. Velocidades continuas y coordenadas por etapas". Technische Universitat Munchen (TUM). International Association of Geodesy (IAG). Sistema de Referencia Geocentrico para las Americas (SIRGAS). Webinar SIRGAS, 28 de Agosto de 2020.
6. Ghilani, Charles D.: "Adjustment Computation - Spatial Data Analysis" (6th ed.). John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2018.

¡Gracias!
Thank you!
Obrigado!