

INFORME DE LA DETERMINACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE TRANSFORMACIÓN ENTRE SISTEMAS DE REFERENCIA PSAD56 Y DISTINTAS REALIZACIONES DEL ITRF

A. ANTECEDENTE.

Objetivo específico del Proyecto de Investigación de Desarrollo de una Metodología para la Transformación de Sistemas de Referencia (PIC-13-IGM-003), el mismo que hace referencia sobre la Determinación de Parámetros de Transformación entre PSAD56 e ITRF's.

B. INTRODUCCIÓN.

Actualmente el Sistema de Referencia Geodésico del Ecuador está referido a PSAD56 (Datum Provisional para Sudamérica 1956, por sus siglas en inglés), su elipsoide de referencia es el Internacional de Hayford y su punto origen o datum se encuentra materializado sobre la superficie terrestre en La Canoa - Venezuela¹. Por lo tanto, todo trabajo de cartografía, topografía, planimetría, entre otros, deben estar georeferenciados a este Sistema de Referencia, pero, los sistemas topocéntricos como PSAD56 solamente son de alcance nacional y/o regional por lo que su densificación solamente tiene cobertura en el país o países que lo adoptaron como oficial, lo cual se presenta como problemática en el momento de compatibilizar las geo-información de otro sistema de referencia, como por ejemplo en zonas de frontera o límites políticos. Además, al ser densificado por métodos topográficos clásicos (observaciones de ángulos y distancias), solamente proporciona coordenadas en el componente horizontal o posición, mientras que las mediciones de la componente vertical o altitud se realiza de forma independiente con métodos de nivelación geométrica desde un datum local (altura sobre el nivel medio del mar).

Por otro lado, el avance tecnológico en los sistemas de posicionamiento satelital a nivel mundial ha permitido que los métodos de levantamientos geodésicos sean más prácticos y de paso unificados en un solo marco de referencia geodésico. En este sentido es importante mencionar que el Instituto Geográfico Militar ha emprendido grandes esfuerzos para dotar al país de una gran infraestructura de estaciones de monitoreo continuo y de una densificación proporcionada

1 Reglamento a la Ley de Cartografía Nacional. Inciso a). del Artículo 18, Comandancia General del Ejército, 1992.

de coordenadas GPS en mojones que conforman la Red Nacional GPS del Ecuador, las mismas que permiten estar enlazados a los marcos de referencia mundiales.

Actualmente, el Ecuador cuenta con parámetros de transformación oficiales entre PSAD56 y WGS84 (compatible con SIRGAS95), los mismos que pueden ser utilizados para transformar cartografía de mediana y pequeña escala, es decir, escalas menores a 1:25000 (Leiva, 2003). Adicionalmente, se realizó el cálculo de los parámetros de transformación a las distintas realizaciones de los ITRF's (Santacruz, A., 2010) mediante el modelo de transformación de Helmert y el Modelo de Velocidades para Sudamérica (VEMOS, por sus siglas en inglés) alcanzando transformaciones compatibles con escalas menores a 1:15000.

Es importante señalar que los parámetros de transformación se aplica a coordenadas cartesianas (X,Y,Z) referidas al centro de masas de la Tierra, en el caso de las coordenadas obtenidas por posicionamiento satelital no representa ningún inconveniente por su naturaleza geocéntrica del GPS, mientras que las coordenadas calculadas para PSAD56 solamente consideran el componente horizontal, por lo tanto no se puede calcular la altura sobre el elipsoide de referencia, el mismo que es un dato importante para la conversión de coordenadas geodésicas a cartesianas a través de la siguiente ecuación.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N+h)\cos(\varphi)\cos(\lambda) \\ (N+h)\cos(\varphi)\sin(\lambda) \\ ((1-e^2)N+h)\sin(\varphi) \end{bmatrix} \quad (01)$$

Donde,

N= Primera vertical del punto

h= Altura elipsoidal

e^2 = Primera excentricidad

φ = latitud del punto

λ = longitud del punto

Para el presente proyecto se ha analizado la posibilidad de realizar la transformación con las coordenadas cartesianas o solamente geodésicas, basados en estudios anteriores de transformación entre un sistema topocéntrico y un geocéntrico, donde se sugiere que la

transformación se realice sin tomar en cuenta la altura elipsoidal (Vanicek P. & Steeves R., 1996) (Vanicek P., et al., 2002), debido a que la estimación de este dato mediante la ecuación (02) es determinada con una precisión 10 veces menor que la posición horizontal (Vanicek P & Steeves R., 1996).

$$h = H + n \quad (02)$$

Donde,

H= Altura ortométrica, (se asume que se aproxima a la altura nivelada Hn)

n= Altura geoidal

Tomando en cuenta las anteriores consideraciones, en el presente proyecto se desarrolló una metodología para transformar las coordenadas geodésicas de un sistema de referencia a otro aplicando parámetros libres del aprendizaje de una red neuronal artificial con una función radial básica (Radial Basis Function, como se la conoce comúnmente).

C. MARCO TEÓRICO

1. DATUM PROVISIONAL PARA SURAMÉRICA DE 1956 (PSAD 56)

Como se mencionó anteriormente, el sistema de referencia oficial para el Ecuador es PSAD56, el cual es un sistema topocéntrico materializado a partir de su datum en La Canoa – Venezuela, en el cual se realizaron mediciones astronómicas para determinar las coordenadas fijas del punto, en la siguiente tabla se observan los cálculos realizados para determinar el datum regional.

TABLA I. PARÁMETROS PRINCIPALES PARA LA DEFINICIÓN DEL DATUM LA CANOA - VENEZUELA

Parámetros	Valor
Latitud (° ' ")	8°34'17.170"N
Longitud (° ' ")	63°51'34.880"W
Elipsoide de referencia	Internacional
Época de realización	1956
Deflexión de la vertical	$\xi_0=6.37''$; $\eta_0= -0.15''$

La aplicación de este datum, fue materializada solamente en Sudamérica, por lo que su entorno

de validez quedaba restringida en esta zona, teniendo inconvenientes para enlazar la información de redes geodésicas vecinas.

2. INTERNATIONAL TERRESTRIAL REFERENCE SYSTEM (ITRS)

Un sistema de referencia (terrestre) es un conjunto de convenciones y normas que definen el origen del sistema, la orientación de los ejes cartesianos y la escala de medida incluyendo las debidas especificaciones de los fundamentos matemáticos y modelos físicos que deben ser considerados (Seeber, 2003).

3. INTERNATIONAL TERRESTRIAL REFERENCE FRAME (ITRF)

La forma de materializar los sistemas de referencia es a través de los marcos de referencia por medio de observaciones geodésicas sobre puntos fiduciales o materializados en la superficie terrestre con altas precisiones. Estas precisiones son calculadas por 4 principales técnicas geodésicas:

- GNSS (Global Navigation Satellite System)
- VLBI (Very Long Base-line Interferometry)
- SLR (Satellite Laser Ranging)
- DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite)

Debido al avance tecnológico de las técnicas de observación geodésicas globales, se actualizan las realizaciones y soluciones del ITRF, es por eso que a partir de 1988 se han actualizado en 11 ocasiones el Marco de Referencia Internacional por lo que es necesario conocer los parámetros de transformación entre los diferentes ITRF's para que la información sea consistente en un solo marco de referencia, el método de transformación utilizado es el de Helmert, estos parámetros se encuentran publicados en el siguiente enlace: http://itrf.ensg.ign.fr/trans_para.php .

4. WORLD GEODETIC SYSTEM 1984 (WGS84)

Este es un sistema geodésico geocéntrico de alcance mundial, desarrollado por el Departamento

de Defensa de Estados Unidos que se alinea con los criterios y convenciones establecidos por la IERS (Servicio Internacional de Rotación de la Tierra, por sus siglas en inglés). En este tipo de sistemas se pierde el concepto de un “datum” por su misma naturaleza geocéntrica, sus principales parámetros son:

TABLA II. PARÁMETROS PRINCIPALES DEL WGS84

Parámetro	Valor
Semieje mayor (a)	6378137 m
Achatamiento (f)	1/298,257223563
Velocidad Angular (ω)	7,292115 rad
Constante gravitacional (GM)	398600,8 km ³ s ⁻²

Cabe mencionar que a partir del año 2002, la realización de WGS84 (G1150) es compatible con la realización del ITRF con una diferencia de hasta 2 centímetros, por lo que se consideran iguales para fines prácticos (Merrigan et al., 2002) (Seeber, G., 2003), en la siguiente gráfica se observa la evolución de ambas soluciones.

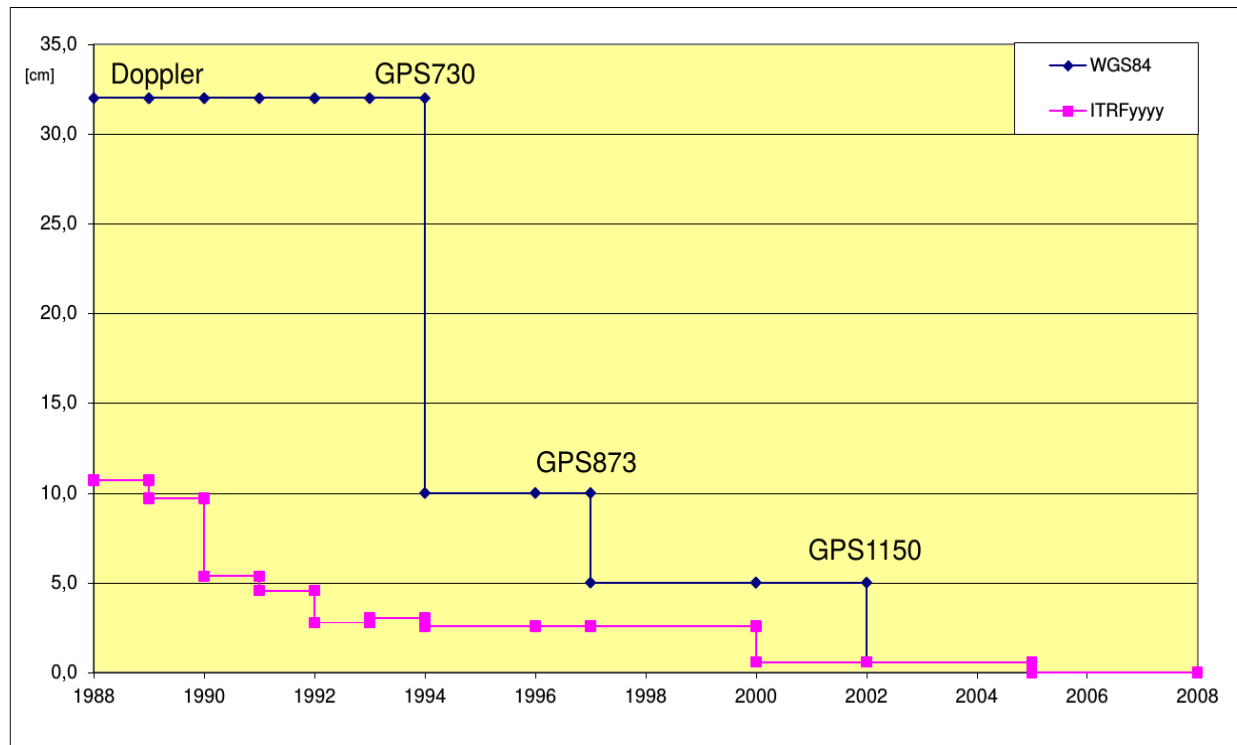


Figura 1. Comparación y evolución entre WGS84 e ITRF
Fuente: Drewes H., 2014

5. SISTEMA INTERNACIONAL DE REFERENCIA PARA LAS AMÉRICAS

SIRGAS es un sistema geocéntrico, ligado a las convenciones del IERS y su materialización densifica la materialización del ITRF que cuenta con la cooperación de todos los países de las Américas (ONU, 2001). SIRGAS se presenta como soporte para todos los trabajos georeferenciados de la región de alcance nacional y regional, debido a que los centros de procesamiento que los integra siguen los mismos estándares para la obtención de coordenadas precisas en cada una de las estaciones.

Como se mencionó anteriormente, SIRGAS es una densificación del ITRF por lo tanto se entiende que el elipsoide de referencia es el GRS80 con sus siguientes características.

TABLA III. PARÁMETROS PRINCIPALES DEL GRS80

Parámetro	Valor
Semieje mayor (a)	6378137 m
Achatamiento (f)	1/298,2572
Velocidad Angular (ω)	7,292115 rad
Constante gravitacional (GM)	398600,5 km ³ s ⁻²

La primera realización de SIRGAS, se hizo coincidir con la materialización del ITRF94 época 1995.4 con un total de 58 estaciones observadas en simultáneo con el apoyo de los países de Sudamérica, quedando establecido el sistema SIRGAS95. A partir de este, se realizaron nuevas observaciones en el año 2000 con 184 estaciones correspondientes al ITRF2000 y época 2000.4, la cual se la denominó SIRGAS00, y finalmente la última realización de SIRGAS es la red que opera de forma continua con 250 estaciones, la misma que se denomina SIRGAS-CON².

En este contexto se debe mencionar que la Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador (REGME) forma parte de SIRGAS-CON y genera soluciones semanales que son ajustadas en el centro de combinación de SIRGAS.

6. TRANSFORMACIÓN DE SISTEMAS DE REFERENCIA

Debido a la diversidad de los sistemas de referencia utilizados a nivel mundial, se han desarrollado varios métodos de transformación para compatibilizar la información con los

2 Página web Oficial de SIRGAS, www.sirgas.org, Fecha de ingreso, septiembre 2014

mejores niveles de precisión posibles, entre los más comunes y renombrados se encuentra el método de Bursa Wolf y Molodensky Badekas, el modelo de Bursa-Wolf no es recomendable para la transformación de un sistema topocéntrico a un sistema geocéntrico, mientras que el último tampoco es recomendable porque asume un criterio de paralelismo entre el sistema topocéntrico y geocéntrico, una explicación más detallada, además de la comparación de modelos transformación fue realizada por Thomson, 1976, se recomienda revisar y analizar este trabajo.

De la publicación anterior, se puede obtener las siguiente gráfica comparativa entre los modelos de transformación, antes mencionado.

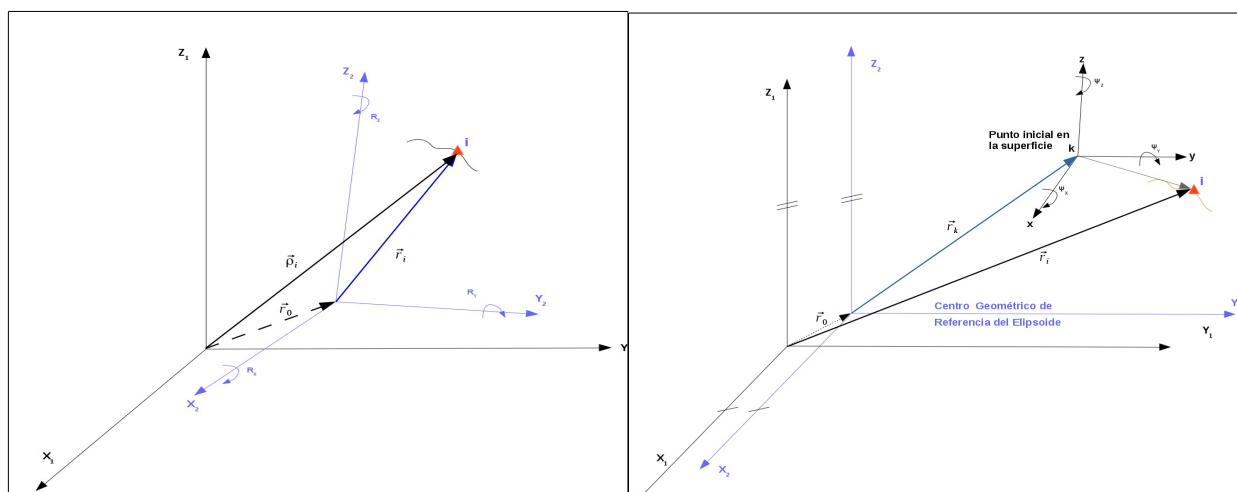


Fig 2a. Descripción geométrica del Modelo de Bursa-W. Fig 2b. Descripción geométrica del Modelo de Molodensky B.

Fuente: Combination of geodetic networks. Thomson, 1976.

Otra metodología que ha sido considerada para solventar esta problemática, se refiere a las transformaciones proyectivas, que se basan en la aproximación de una función polinómica ideal que, además de calcular los coeficientes para la transformación, también permite remediar los errores existentes en las redes geodésicas clásicas, por lo que esta metodología ha sido muy recomendada (Featherstone, W., 1997).

7. REDES NEURONALES ARTIFICIALES

Son unidades computacionales que procesan la información de forma paralela e interconectadas entre sí, similares a las redes neuronales biológicas. La neurona biológica recibe señales por

medio de la sinapsis que se origina en las dendritas o membrana celular las cuales son emisoras de la señal proveniente de otra neurona, si la señal recibida es lo suficientemente fuerte es capaz de activar la neurona y emitir un flujo de información a través del axón que enviará a otra neurona siguiendo el mismo proceso explicado.

La semejanza está determinada en las entradas (sinapsis) que son multiplicadas por pesos (fuerza de las señales sinápticas) y calculadas por una función de sumatoria que determina la activación de la neurona. Finalmente otra función matemática (señal que viaja por el axón) calcula la señal de salida de la neurona hacia otra neurona interconectada que recibirá la señal y de esta forma se da origen a una nueva sinapsis, en la siguiente figura se ilustra la semejanza entre una red neuronal biológica y artificial.

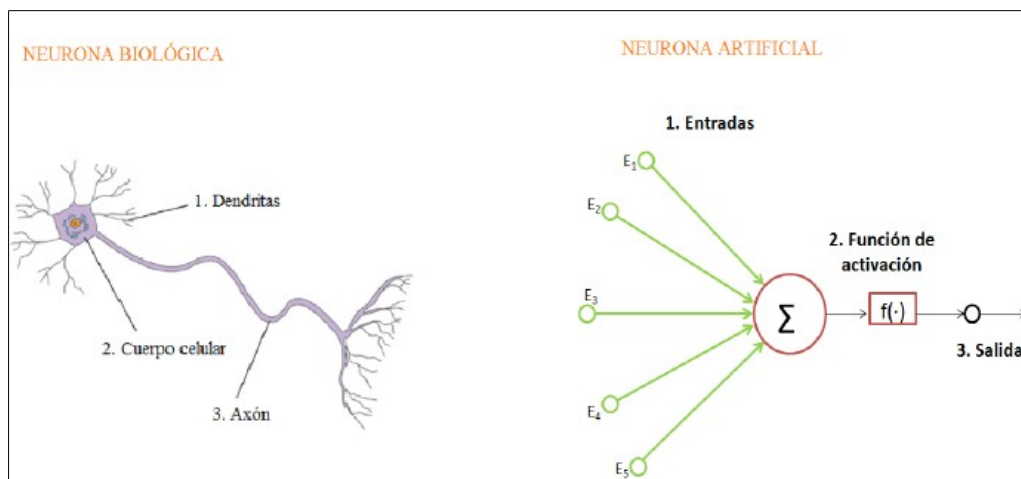


Fig 3. Semejanza entre una Red neuronal biológica (izq) y artificial (der)

7.1. APLICACIÓN DE RNA EN LA TRANSFORMACIÓN DE COORDENADAS

En la actualidad no se ha estandarizado esta metodología para la transformación entre sistemas de referencia, dentro de la comunidad geodésica son escasas las aplicaciones de las RNA, aunque se pueden citar algunos artículos científicos en este campo como:

- M. Yilmaz y M. Gullu, en junio de 2014, presentan una comparación entre modelos de RNA para estimar la velocidad de un punto de referencia geodésico, mostrando buenos resultados con el uso de una RNA multicapa.
- T. Kavzoglu y M. H. Saka, en el año 2005, presentan un modelo de ondulaciones

geoidales obteniendo errores hasta de 5,9 cm.

- H. Schuh, et al., en el año 2001, presentan la predicción de los parámetros de orientación terrestre con una RNA, en la cual los resultados de la predicción son iguales y mejores que los otros métodos establecidos.

En el tema de específico para la transformación entre sistemas de referencia, solamente se ha publicado un artículo, presentado para transformar precisamente entre PSAD56 y SIRGAS95, en donde se emplean coordenadas cartesianas para este estudio, alcanzando errores menores a 1,5 m como media, permitiendo de esta forma establecer una nueva alternativa para solventar este problema (Tierra A. et al., 2009). Además se presentó una sugerencia y alternativa al método de la transformación de Helmert (antes mencionado como Bursa-Wolf) debido a las precisiones alcanzadas pero sobre todo porque al emplear una RNA no es necesario conocer la función y radios de transformación, ni tampoco modelar las distorsiones de la red (Mrowczynska M., 2011). Otro enfoque que se le dado al uso de RNA, fue para transformar las cartografía histórica a los nuevos marcos de referencia, únicamente para estudios demográficos o sociales mas no para fines de precisión (M. Yilmaz y M. Gullu, 2011).

D. METODOLOGÍA

Para desarrollar el cálculo de la transformación entre sistemas de referencia, es necesario contar con una base de datos de puntos que tengan coordenadas tanto el sistema PSAD56 como en un ITRF. En base a los estudios anteriores para calcular los parámetros de transformación entre PSAD56 y WGS84 (SIRGAS) , se obtuvo el elenco de coordenadas de 79 puntos, los mismos que estaban referenciados a SIRGAS95, es decir, ITRF94, época de referencia 1995.4, por otro lado, se realizaron campañas de campo durante el año 2013 para extender la cobertura de la transformación en zonas que en proyectos anteriores no se lograron posicionar con GPS y para densificar los puntos comunes en zonas donde eran muy escasa la información, por lo que esta información reciente está referenciada al ITRF08, época de referencia 2013.x.

Se llevó el proceso de transformación entre ITRF's para tener toda la información estandarizada en un mismo marco de referencia y una misma época, según el proceso que se detalla en la siguiente figura.

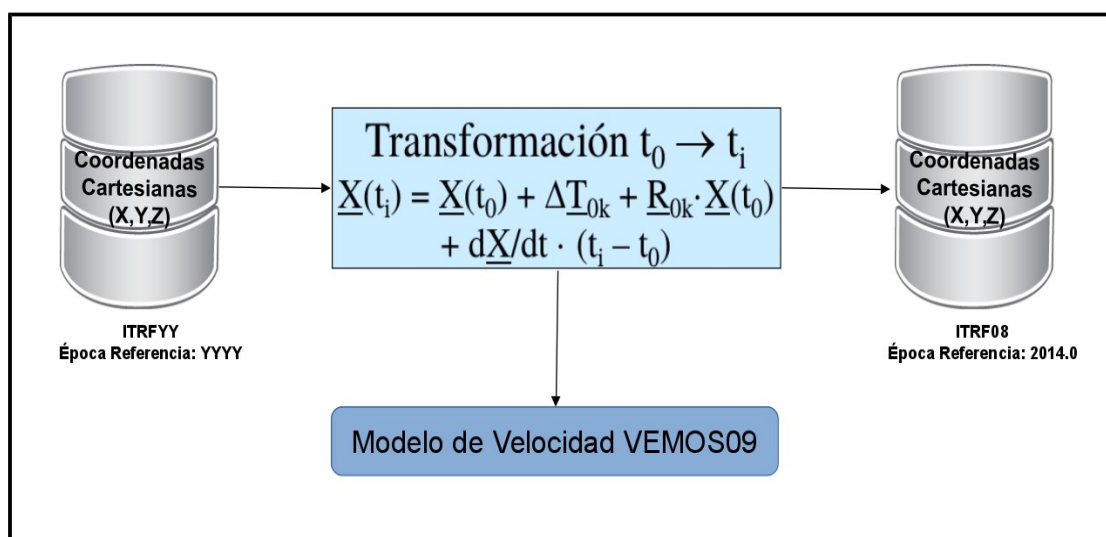


Fig. 4. Proceso de transformación desde ITRFYy a ITRF08

En total se cuenta con un elenco de 143 puntos de los cuales se transformaron los 79 puntos anteriores, pero, como se conoce el modelo de velocidad VEMOS09 está referido al ITRF05, época de referencia 2000.0, lo cual es una discrepancia con la información con la que se cuenta. Se realizó un análisis sobre tres puntos distribuidos en el Ecuador continental para determinar el valor de discrepancia entre las velocidades reales del punto y VEMOS09, alcanzando un error medio de 8mm por cada año, por lo cual se determinó que VEMOS09 es apto para ser considerado dentro del cálculo, tomando en cuenta que el objetivo del proyecto es encontrar una solución con errores menores a 3 metros. Además de esto se tomó en cuenta el error de 1mm/año que establece (Drewes H. y Heidbach O., 2012) para la propagación de errores.

El fundamento de la metodología es el entrenamiento de una red neuronal artificial para que permita la transformación entre PSAD56 e ITRF's, en este caso ITRF08 . Se determinó este ITRF porque el ajuste de las coordenadas de las estaciones de monitoreo continuo del Ecuador están referidas al ITRF08, por lo que se determinó la topología de una RNA con función radial básica que calcula los parámetros libres para la transformación entre estos dos ITRF's, por separado, la estructura se ilustra en la siguiente figura.

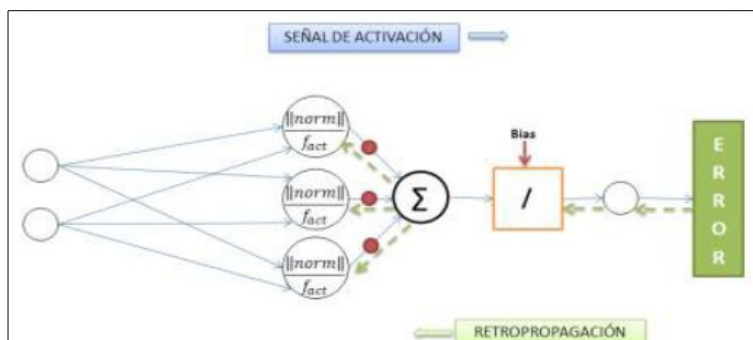


Fig. 5. Estructura fundamental de la RNA-RBF empleada

Se determinó además tres subconjuntos de datos de las coordenadas para el aprendizaje de la RNA-RBF:

- **Entrenamiento:** este conjunto de datos se emplea en el aprendizaje supervisado de la red, de tal manera que calcule los parámetros libres de la RNA, además del RMS de la misma. El criterio de selección de los puntos fue tratar de cubrir toda la superficie de la cobertura, además de seleccionar los mejores puntos en función de la diferencia entre PSAD56 e ITRF's
- **Generalización:** este conjunto de datos permite generalizar el aprendizaje de la red, evitando que memorice los patrones del conjunto del entrenamiento y permita adaptar los parámetros libres de la red a cualquier otro subconjunto de coordenadas, es decir, permite ajustar de mejor manera la curva de la función matemática de aprendizaje. De la misma forma, el criterio para seleccionar los puntos fue en función de las alturas niveladas, es decir, los de mayor y menor altura, esto con el propósito de seleccionar un patrón de error de la red clásica en función de la altura.
- **Test:** este conjunto de datos determina la calidad del aprendizaje de la red, no entra en el proceso del cálculo, solamente ayuda a validar los resultados del entrenamiento con los conjuntos de datos anteriores. Su selección se determinó de manera aleatoria, pero siempre intentando que esté distribuido de la mejor manera en el Ecuador.

Los puntos disponibles para el entrenamiento y test de la RNA, están distribuidos en el Ecuador continental, permitiendo cubrir la mayoría de las zonas urbanas y rurales para que pueden aplicar la transformación. En la siguiente figura se puede observar el polígono de cobertura.

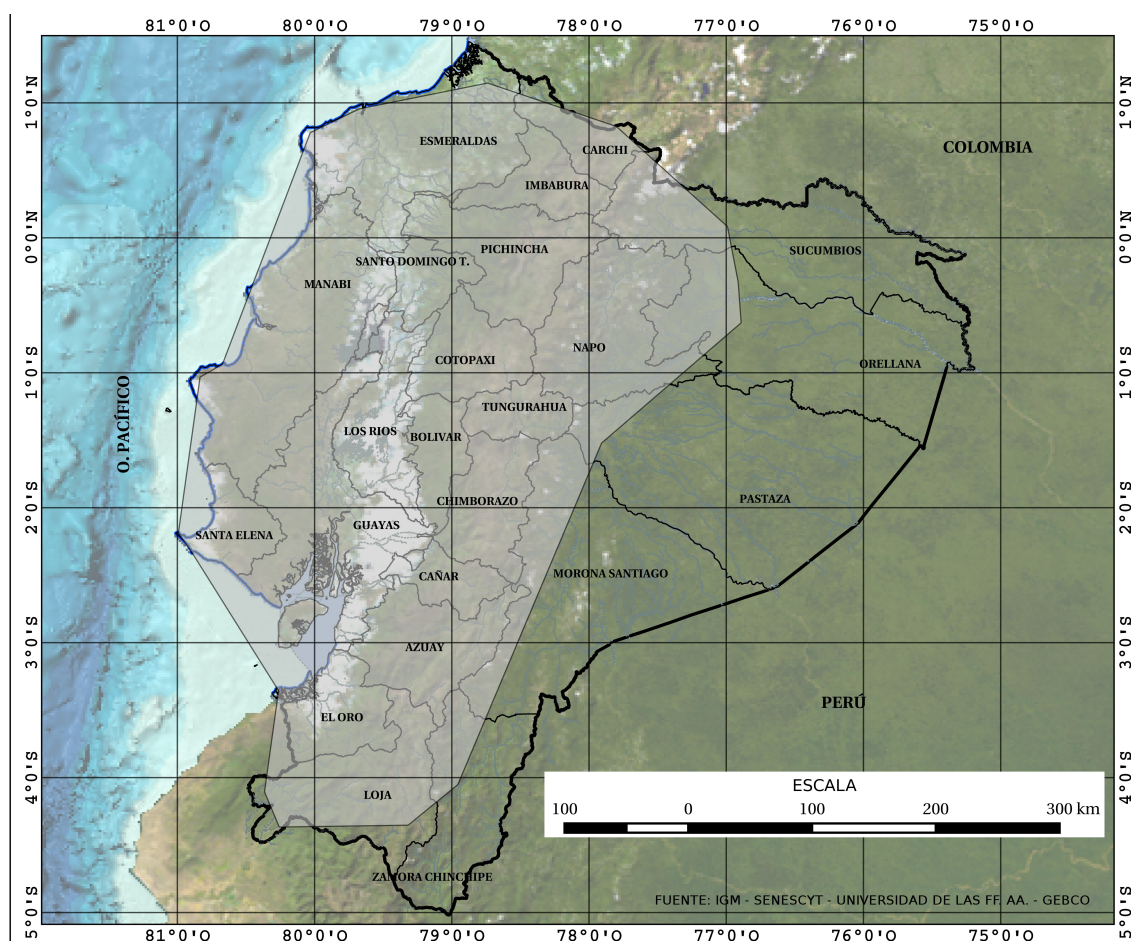


Fig. 6. Polígono de cobertura de la metodología desarrollada

De la figura anterior se puede evidenciar que solamente la región amazónica del Ecuador, se puede ver afectada su aplicabilidad en la metodología, pero, se debe considerar que los métodos de medición topográficos clásicos para densificar la red PSAD56, eran demasiado complejos para realizarlos en esta zona, porque se necesitaba tener visuales a largas distancias entre los vértices, por tal razón, se cuenta con muy poca información que pudiera ser posicionada con técnicas satelitales, de todas formas se realizó una discriminación exhaustiva de la información de esta zona, a fin de determinar la mayoría de los puntos que pudieran ser re-observados. Adicional a esto, se realizó una campaña de campo para el rastreo de puntos PSAD56 distribuidos en todo el país para obtener información que validen una vez mas el modelo del entrenamiento de la RNA, obteniendo los valores esperados con las precisiones alcanzadas anteriormente.

E. RESULTADOS

Para el entrenamiento de la RNA se utilizaron 72 puntos distribuidos en el territorio continental, para el conjunto de generalización se contó con un total de 23 puntos y finalmente con 18 puntos para el subconjunto de test. Como se mencionó antes, se determinó otro conjunto de puntos que cumplen con la función de comprobación de esta metodología, por lo que se contó con un total de 42 puntos, la mayoría de la red de tercer orden de la red PSAD56, los mismos que cumplieron con la finalidad de ser vértices de partida para los levantamientos topográficos locales.

La red neuronal de tipo RBF que se entrenó para fines de esta metodología, se diseñó en el software matemático MATLAB (propiedad de la ESPE), tuvo una estructura [2,22,2], es decir, dos neuronas de entradas (coordenadas), 22 neuronas ocultas que procesaron la información y 2 neuronas de salida (coordenadas calculadas), como se observa en la siguiente figura.

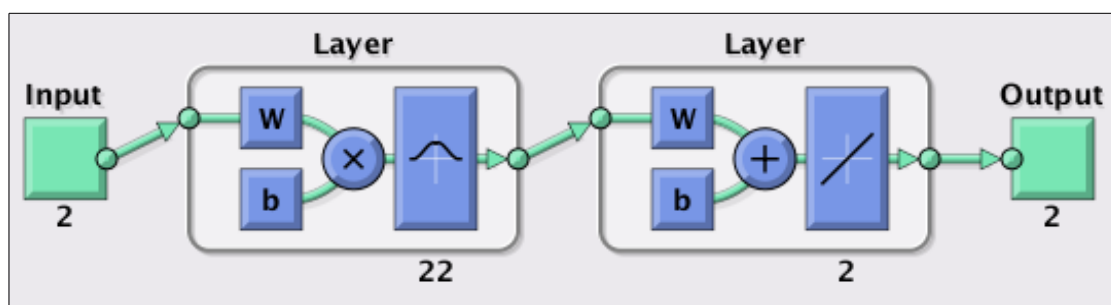


Fig. 7. Estructura de la RNA-RBF diseñada en el software MATLAB, para el presente proyecto.

Los parámetros se obtienen, también conocidos como parámetros libres de la RNA son los pesos sinápticos y umbrales, estos valores se presentan como constantes al finalizar el entrenamiento y permiten transformar cualquier coordenada PSAD56 a ITRF08, los parámetros libres de la RNA son los siguientes:

- Pesos sinápticos de la capa oculta (w): Matriz con las siguientes dimensiones [22 ,2].
- Umbral de la capa oculta
- Pesos sinápticos de la capa de salida (W): Matriz con las siguientes dimensiones [2, 22].
- Umbrales de la capa de salida

Además, los parámetros que se fijan para iniciar el entrenamiento de este tipo de RNA son los siguientes:

- Error meta (goal) = 0,0
- Distancia del punto al centro de la función (spread) = 13,5

Con los parámetros antes indicados se inició en el entrenamiento de la RNA-RBF para transformar las coordenadas desde PSAD56 al ITRF08 en el script diseñado para este proceso específicamente, es importante señalar que este proceso es iterativo y el profesor (quien entrena la red neuronal artificial) debe modificar los valores hasta que los resultados de salida de la RNA estén acordes a los objetivos esperados, los resultados se muestran en la siguiente tabla.

TABLA IV. DIFERENCIAS OBTENIDAS POSTERIOR A LA TRANSFORMACIÓN DE LAS COORDENADAS

PARÁMETRO	VALOR
ERROR MEDIO	0,55 m
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	0,35 m
ERROR MÍNIMO	0,03 m
ERROR MÁXIMO	1,72 m
ESCALA APROXIMADA	6000

F. CONCLUSIONES

1. Se realizó la transformación de coordenadas entre PSAD56 e ITRF08 mediante una red neuronal artificial de función radial básica utilizando solamente coordenadas geodésicas (latitud, longitud).
2. Esta metodología ha probado mejorar los resultados en las diferencias de posición con respecto a los métodos convencionales, por lo que representa una solución a esta problemática con una media de error de 0,60 m
3. Con los resultados obtenidos en este proceso, se recomienda utilizar estos parámetros para la automatización de la transformación en el desarrollo del software disponibles para los usuarios.

G. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Drewes, H., O. Heidbach (2012). The 2009 Horizontal Velocity Field for South America and the Caribbean. In: Kenyon S., M.C. Pacino, U. Marti (Eds.), "Geodesy for Planet Earth", IAG Symposia, 136: 657-664.
- Featherstone, Will. 1997. A Comparison of Existing Coordinate Transformation Models and Parameters in Australia. Cartography. 26 (1): pp. 13-26.
- Kavzoglu T., and Saka M. H., 2005. Modelling local GPS/levelling geoid undulations using artificial neural networks. Journal of Geodesy (2005) 78: 520–527.
- Leiva C., 2003. Determinación de Parámetros de Transformación entre los sistemas PSAD56 y WGS84 para el País. Tesis de Pregrado. Escuela Politécnica del Ejército.
- Merrigan, M., Swift, E., Wong, R., Saffel, J. (2002). A Refinement to the World Geodetic System 1984 Reference Frame. ION-GPS 2002, Portland, OR, Sept. 2002.
- Mrówczyńska, M., 2011. Neural networks and neuro fuzzy systems applied to the analysis of selected problems of geodesy. Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences, 18: 161–173.
- Organización de las Naciones Unidas, 2001. 7th United Nations Regional Cartographic Conference for the Americas, New York.
- Santacruz, A., 2010. Transformación entre el Sistema PSAD56 y los Marcos de Referencia ITRF utilizando los modelos de Helmert y de velocidades de placas tectónicas VEMOS, Tesis de Pregrado. Escuela Politécnica del Ejército.
- Seeber, G., (2003). Satellite Geodesy
- Thomson D.B., 1976. Combination of geodetic networks. Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, Fredericton.
- Tierra A., De Freitas S.R.C. and Guevara P. M., 2009. Using an artificial neural network to transformation of coordinates from PSAD56 to SIRGAS95. Geodetic Referencces Frames, Asociation of Geodesy Symposia 134.
- Vaníček P. and Steeves R.R., 1996. Transformation of coordinates between two horizontal geodetic datums. J. Geodesy, 70, 740–745.
- Vaníček P., Novák P., Craymer M.R. and Pagiatakis S., 2002. On the correct

determination of transformation parameters of a horizontal geodetic datum. *Geomatica*, 56, 329–340.

- Yilmaz M., and Gullu M., 2014. A comparative study for the estimation of geodetic point velocity by artificial neural networks. *J. Earth Syst. Sci.* 123, No. 4, June 2014, pp. 791–808.
- Yilmaz M., and Gullu M., 2011. Georeferencing of Historical Maps Using Back Propagation Artificial Neural Network. *Experimental Techniques* 36, 15–19, Society for Experimental Mechanics.
- Schuh H., et al., 2001. Prediction of Earth orientation parameters by artificial neural networks. *Journal of Geodesy* (2002) 76: 247–258.