



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA
Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
GÉOGRAFO Y DEL MEDIO AMBIENTE**

AUTOR: CAPT. DE E. ROMERO MICHILENA FREDDY OSWALDO

**TEMA: MODELO PRELIMINAR DE MOVIMIENTO DE VELOCIDADES DE
PLACAS TECTONICAS DE AL MENOS UNA ESTACIÓN DE MONITOREO
CONTINUO**

DIRECTOR: PHD. TIERRA ALFONSO

CODIRECTOR: ING. ROBAYO ALEXANDER

SANGOLQUÍ, OCTUBRE 2013

CERTIFICACIÓN

PHD. ALFONSO TIERRA

ING. ALEXANDER ROBAYO

CERTIFICAN:

Que el trabajo titulado “MODELO PRELIMINAR DE MOVIMIENTO DE VELOCIDADES DE PLACAS TECTONICAS DE AL MENOS UNA ESTACIÓN DE MONITOREO CONTINUO” realizado por el Sr. CAPT. de E. Romero Michilena Freddy Oswaldo ha sido guiado y supervisado periódicamente, cumple con las normas estatutarias de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, previo a la obtención del título de Ingeniero Geógrafo y del Medio Ambiente.

Sangolquí, Octubre de 2013

DR. ALFONSO TIERRA

DIRECTOR

ING. ALEXANDER ROBAYO

CODIRECTOR

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

YO, CAPT. DE E. FREDDY OSWALDO ROMERO MICHILENA

DELACRO QUE:

El trabajo titulado “MODELO PRELIMINAR DE MOVIMIENTO DE VELOCIDADES DE PLACAS TECTONICAS DE AL MENOS UNA ESTACIÓN DE MONITOREO CONTINUO” ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando los derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan en las referencias bibliográficas a lo largo y al final del documento. Consecuentemente el presente trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, Octubre de 2013

CAPT. FREDDY ROMERO

AUTORIZACIÓN

YO, CAPT. DE E. FREDDY OSWALDO ROMERO MICHILENA

Autorizo a la Universidad De Fuerzas Armadas ESPE la publicación en la biblioteca virtual de la institución del trabajo “MODELO PRELIMINAR DE MOVIMIENTO DE VELOCIDADES DE PLACAS TECTONICAS DE AL MENOS UNA ESTACIÓN DE MONITOREO CONTINUO”, cuyo contenido, ideas y criterios, son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, Octubre de 2013

CAPT. FREDDY ROMERO

DEDICATORIA

Dedico el presente proyecto de tesis a mi esposa Margarita Andrade, pilar fundamental en todos mis logros alcanzados.

A mis hijos Camila Alejandra y Mathías Daniel, el motor que mueve mi vida.

A mis padres que siempre han sido un ejemplo y apoyo en toda mi vida.

A mis hermanos Karina y Pato por todo su apoyo y conocimientos brindados

A mis queridos suegros Don Camilo y Doña Georgina, que siempre han estado preocupados por mi bienestar.

A toda mi familia y amigos que colaboraron de alguna u otra forma en mi logro alcanzado.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi institución el Glorioso Ejército Ecuatoriano por permitirme mejorar como persona y ser mejor militar.

A mi querida Escuela Politécnica del Ejército por abrirme sus puertas y dejarme ingresar en el fabuloso mundo del conocimiento.

A la Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente por entregarme todo los conocimientos prácticos teóricos y sobre todo de vida.

A todos los docentes con los que tuve el gusto de compartir buenos y malos momentos en las aulas.

Al Dr. Alfonso Tierra por ser un ejemplo de maestro y permitirme desarrollar mi tesis bajo su Dirección.

Al Ing. Alexander Robayo con quien compartir gratos momentos dentro y fuera de aulas por colaborar como codirector de mi proyecto de tesis

A todos mis compañeros de aula: Lucho, Sebas, Carlos, Andrés, Belén los cuales los llevo en un lugar muy especial de mi ser, gracias por permitirme demostrar que los militares somos capaces y sobre todo gracias por brindarme su amistad

Finalmente gracias a Dios por darme la sabiduría, la paciencia y sobre todo la capacidad de poder culminar con éxito este reto que me propuse.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Certificación.....	i
Declaración de Responsabilidad	ii
Autorización	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimiento.....	v
Índice de contenidos.....	iv
Índice de tablas.....	x
Índice de figuras.....	xii
Índice de anexos.....	xiii
Resumen.....	xiv
Abstract.....	xv
Glosario de términos.....	xvi

CAPÍTULO I

1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Definición del problema.....	4

1.3 Descripción del área de estudio.....	5
1.4 Justificación e importancia del problema a resolver.....	6
1.5 Objetivos.....	7
1.5.1 Objetivo general.....	7
1.5.2 Objetivos específicos.....	8

CAPÍTULO II

2.1 Estaciones de monitoreo continuo.....	9
2.1.1 Definición.....	9
2.1.2 Componentes de una red de estaciones GPS permanente.....	9
2.1.3 Instalación de una estación GPS permanente.....	11
2.1.4 Objetivos de la estación GPS permanente.....	13
2.1.5 Red GNSS de monitoreo continuo del ecuador (REGME)..	14
2.2 Tectónica de placas.....	15
2.2.1 Historia de la tectónica de placas.....	15
2.2.2 Medición del movimiento de las placas.....	20
2.3 Series temporales.....	24

2.3.1 Componentes de una serie de tiempo.....	24
2.4 Método de mínimos cuadrados.....	28
2.5 Modelos ARIMA.....	31
2.5.1 Expresión general de un modelo ARIMA.....	32
2.5.2 Algunas propiedades de un modelo ARIMA óptimo.....	33
2.5.3 Pasos en la construcción de los modelos ARIMA.....	37

CAPÍTULO III

3.1 Preprocesamiento de los datos.....	40
3.2 Modelamiento por mínimos cuadrados.....	42
3.3 Modelamiento ARIMA.....	45

CAPÍTULO IV

4.1 Modelos de mínimos cuadrados.....	50
4.2 Modelos ARIMA.....	52
4.3 Prueba Chi-cuadrado.....	54
4.4 Utilidad de los modelos.....	59
4.5 Mapa de velocidades del ecuador continental.....	63

CONCLUSIONES 64

RECOMENDACIONES 65

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS 66

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Aplicación y Método GPS
Tabla 2	Principales Modelos de Movimiento de Placas
Tabla 3	Coordenadas UTM estación Esmeraldas
Tabla 4	Media, Desviación estándar, varianza de los datos de la estación Esmeraldas
Tabla 5	Parámetros de modelo lineal estación Esmeraldas
Tabla 6	Parámetros de modelo lineal estación Riobamba
Tabla 7	Parámetros de modelo lineal estación Loja
Tabla 8	Modelamiento ARIMA para coordenada Este
Tabla 9	Modelo ARIMA aceptados
Tabla 10	Pronósticos para 10 semanas de los modelos aceptados estación Esmeraldas
Tabla 11	Pronósticos para 10 semanas de los modelos aceptados estación Riobamba
Tabla 12	Pronósticos para 10 semanas de los modelos aceptados estación Loja
Tabla 13	Cálculo de Chi-cuadrado de las diferentes estaciones

- Tabla 14 Residuos de los pronósticos con datos observados Estación
Riobamba
- Tabla 15 Residuos de los pronósticos con datos observados Estación
Esmeraldas
- Tabla 16 Residuos de los pronósticos con datos observados Estación
Loja
- Tabla 17 Velocidad de desplazamiento de las estaciones del Ecuador

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura No. 1	Red GNSS de Monitoreo continuo del Ecuador (OCT-2012)
Figura No. 2	Deriva Continental
Figura No. 3	Nombres y Distribución de las placas
Figura No.4	Serie de tiempo con tendencia creciente
Figura No. 5	Serie de tiempo con estacionalidad y ciclicidad
Figura No. 6	Serie de tiempo aleatoria
Figura No. 7	Esquema simplificado metodología Box-Jenkins
Figura No. 8	(a) Gráficas de la serie de tiempo, (b) Autocorrelación total y (c) Autocorrelación parcial de la coordenada este
Figura No. 9	Mapa de Modelo de Velocidades de las Estaciones GPS Permanente del Ecuador

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO 1 Monografías de las estaciones GPS de monitoreo continuo pertenecientes a la REGME; estación de Esmeraldas, Loja y Riobamba
- ANEXO 2 Gráficas de series de tiempo, autocorrelación total y autocorrelación parcial de las estaciones permanentes GPS del Ecuador
- ANEXO 3 Modelos ARIMA
- ANEXO 4 Datos observados, calculados y residuales de las estaciones GPS de monitoreo continuo pertenecientes a la REGME

RESUMEN

En la actualidad existe la necesidad de reducir errores y mejorar las precisiones en los trabajos de tanto de Topografía como de Geodesia, existen organismos internacionales y nacionales que se encargan de desarrollar tecnologías acordes a la época orientadas todas estas e tener una mejor apreciación de la realidad de nuestro planeta, un planeta activo y cambiante constantemente. La tecnología GPS ha permitido dar un salto enorme en lo que concierne a redes geodésicas nacionales y regionales, obteniendo gran cantidad de información, la que de no ser manejada eficientemente sería únicamente eso, información. El presente proyecto de tesis recopiló la información de estaciones GNSS del país pertenecientes a la REGME, y se realizó modelos para determinar cómo y hacia donde se mueven las placas del país. Esta información es importante ya que existen modelos globales y regionales, pero se generó un modelo de velocidades nacional que pretende ser útil en las diferentes transformaciones de datos que se requiera.

ABSTRACT

There is now the need to reduce errors and improve precision in the work of both of Surveying and Geodesy, there are international and national agencies are responsible for developing technologies appropriate to the time-oriented all these and have a better appreciation of reality of our planet, a planet active and constantly changing. GPS technology has enabled a quantum leap with respect to national and regional geodetic networks, obtaining large amount of information, which if not handled efficiently would be only that, information. This thesis project information collected GNSS stations belonging to the REGME country, and was made models to determine how and where plates move the country. This information is important as there are global and regional models, but generated a national velocity model should be useful in the various data transformations required.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

IGM	Instituto Geográfico Militar
SIRGAS	Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas
GNSS	Sistema Mundial de Navegación por Satélite
IUGG	Unión Internacional de Geodesia y Geofísica
CEPGE	Centro de Procesamiento de datos GNSS del Ecuador
REGME	Red GNSS de monitoreo continuo del Ecuador
ITRF	Marco de Referencia Terrestre Internacional
GRS80	Geodetic Reference System de 1980
MORVEL	Mid-ocean ridge velocities
VEMOS	Modelo de Velocidades para América del Sur y El Caribe
PSAD 56	Preliminary South American Datum 1956
WGS84	World Geodesic System de 1984
UTM	Universal Trasversal of Mercator
NAVSTAR	Navigation System Time And Ranging
GLONASS	Russia's Global Navigation Satellite System

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1 ANTECEDENTES

Las técnicas de posicionamiento GNSS (Global Navigation Satellite System) han revolucionado dentro de la historia de metodologías de mediciones y obtención de datos espaciales. Durante los últimos años se han desarrollado estas técnicas con el avance de la tecnología satelital y de las comunicaciones, que ahora no solamente se utilizan para obtener posicionamiento, sino también para diferentes aplicaciones antes no imaginadas. Vale la pena recordar cuando se realizaban apenas mediciones a partir de cinta o levantamientos topográficos con taquímetros y regletas, que actualmente han sido cambiadas por equipos de recepción GNSS.

Una de las aplicaciones posibles para estos datos GNSS es la geodinámica de las placas tectónicas del planeta

La Tierra no es un cuerpo muerto como Marte, su núcleo central muy caliente y actuando como verdadero motor de los cambios geológicos que afectan a su superficie.

La erosión borra las huellas de pasados acontecimientos, pero los volcanes y los terremotos continúan demostrando su actividad. Éstos además, proporcionan pistas sobre la estructura interna de la Tierra: al situar sobre un mapa se verá que su distribución no es aleatoria, al contrario, la mayoría se encuentra siguiendo líneas de actividad bien definidas, zonas donde el material del manto terrestre sale a la superficie o donde grandes bloques de la corteza se desplazan produciendo movimientos sísmicos.

Aunque inicialmente controvertida, en los años sesenta surgió la teoría que sugiere que estas líneas de actividad son en realidad los márgenes de placas que se mueven sobre la superficie terrestre. La ciencia ha demostrado que dicha superficie está compuesta por diversas placas de unos 80 kilómetros de espesor, las cuales se desplazan lentamente sobre una masa más fluida.

No está claro cuál es el motivo del movimiento de las placas, pero se sustenta debido a un fenómeno de convección. La materia del manto terrestre, más caliente, cuanto más cerca estuviera del núcleo, más ascendería empujando las placas, para volver a descender al enfriarse. Algo similar pasa con el aire de la atmósfera.

Otra teoría alternativa sugiere que el fondo marino más antiguo, más frío y pesado, sería atraído por la gravedad con mayor fuerza que los fondos más jóvenes, provocando desplazamientos.

En todo caso, las placas cambian de posición, chocando entre ellas, y deslizándose unas debajo de otras. En estos puntos la actividad geológica es más intensa, provocando la aparición de montañas o de profundas cimas.

Los continentes y el fondo de los océanos descansan sobre las placas, de esta manera, el desplazamiento modifica su aspecto.

Teniendo en cuenta esta necesidad de conocer como se mueven las diferentes placas, los científicos del mundo han elaborado varios modelos de movimiento siendo el mas reciente el modelo llamado MORVEL 2010 (mid-ocean ridge velocities) para desarrollar este modelo los científicos modelaron datos de 25 años, este ofrece una descripción precisa de los movimientos relativos de 25 placas tectónicas que representan el 97 por ciento de la superficie de la Tierra (Geophysical Journal International, Geologically, 2010)

El Modelo de Velocidades para América del Sur y El Caribe (VEMOS 2009) ha sido calculado a partir de las coordenadas SIRGAS95 y SIRGAS2000, de las velocidades de las estaciones SIRGAS-CON determinadas por el IGS-RNAAC-SIR y de diferentes proyectos geodinámicos desarrollados en la región.

1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Existen Sistemas de Referencia que tienen el origen desplazado del centro de masas de la Tierra, estos se encuentran referidos a datums locales para buscar un mejor acoplamiento del elipsoide de referencia a una zona determinada, el Ecuador sin quedar lejos de estas exigencias del momento, realizó toda su cartografía en el Sistema PSAD 56.

Actualmente los sistemas de referencia geocéntricos están asociados a sistemas globales o modernos, el Ecuador vio necesidad de transformar su cartografía antigua referida a PSAD 56 a los nuevos sistemas de referencia (WGS84, o los llamados ITRFs).

Para realizar esta transformación se realizaron varias investigaciones en las que se determinó parámetros de transformación entre sistemas, sin embargo en ninguna de estas investigaciones se calculó la velocidad de movimiento, se limitaron a utilizar la velocidad generada en modelos regionales (VEMOS 2009) para dicha transformación.

Además de ser necesario estos vectores de velocidad para la transformación entre sistemas, también se requiere de los mismos para el traslado de las coordenadas fiduciales desde la época de referencia a la época de observación. Es decir, las coordenadas asociadas a SIRGAS95 deben trasladarse desde 1995.4 al día en que se hace el levantamiento GNSS, por ejemplo 2013.0.

Las velocidades V_x , V_y , V_z de las estaciones de referencia deben obtenerse preferiblemente del análisis de posicionamientos GNSS repetitivos que cubran un intervalo mínimo de tiempo de dos años (VEMOS 2009)

1.3 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Ecuador es un país situado en la parte noroeste de América del Sur. Ecuador limita al norte con Colombia, al sur y al este con Perú y al oeste con el océano Pacífico. El país tiene una extensión de 283 561 km² y una población de más de 15 millones de personas. Ecuador es surcado de norte a sur por una sección volcánica de la cordillera de los Andes conformada por alrededor de 70 volcanes, siendo el más alto el Chimborazo, con 6.310 msnm. Al oeste de los Andes se presentan el Golfo de Guayaquil y una llanura boscosa; y al este, la Amazonia. Es el país con la más alta concentración de ríos por kilómetro cuadrado en el mundo. En el territorio ecuatoriano, que incluye las islas Galápagos 972 km al oeste de la costa, se encuentra la biodiversidad más densa del planeta. Ecuador consta como el principal exportador de banano a nivel mundial y uno de los principales exportadores de flores, camarones y cacao. Políticamente, el Ecuador es un Estado constitucional republicano y descentralizado, dividido político-administrativamente en 24 provincias las cuales se dividen en cantones, los mismos que se dividen en parroquias urbanas y rurales.

Para la presente investigación se utilizarán los puntos de la red GNSS de monitoreo continuo del Ecuador (REGME). La REGME (IGM), se encuentra constituida por 31 estaciones (hasta Oct-2013) distribuidas en todo el

territorio continental y 2 estaciones en Galápagos, cubriendo el 95% de la superficie nacional, las cuales captan datos GNSS las 24 horas del día, los 365 días del año, proporcionando información necesaria para realizar el procesamiento diferencial de información GPS, sin necesidad de salir al campo para la colocación de bases GPS, que muchas veces generan problemas de logística y accesibilidad a los puntos; así como aumento del presupuesto.

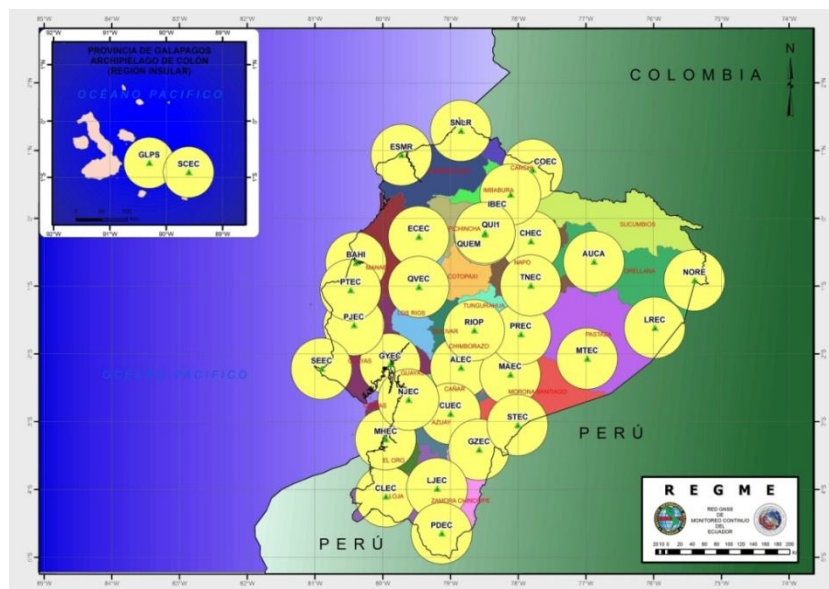


Figura No. 1 Red GNSS de Monitoreo continuo del Ecuador (Oct-2013)

Fuente: IGM, Disponible en: <http://www.geoportaligm.gob.ec>.

1.4 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL PROBLEMA A RESOLVER

El Ecuador ha resuelto en parte el problema de transformar su cartografía local referida al sistema PSAD 56, lo ha hecho calculando los

parámetros de transformación, sin embargo no se ha calculado los vectores de velocidad

En el Ecuador hay varias estaciones de monitoreo continuo de la red GNSS, las cuales han sido distribuidas en diferentes puntos del país. Los datos generados en estas estaciones desde su instalación pueden ser utilizados para la generación de un modelo de movimiento de placas tectónicas

La presente investigación tiene como objeto el modelar el comportamiento de los datos generados por la REGME, para obtener los valores de movimiento necesarios para realizar la transformación de la cartografía local, ya que actualmente se utilizan los vectores de velocidad del modelo VEMOS 2009

Estos vectores no solo se utilizarán para la transformación entre sistemas de referencia, sino que pueden ser utilizados en el posicionamiento GPS, para el traslado de las coordenadas fiduciales a la época de observación

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 OBJETIVO GENERAL

Generar un modelo preliminar de movimiento de velocidades de placas tectónicas de al menos una estación de monitoreo continuo

1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Pre procesar los datos de las Estaciones de Monitoreo Continuo obtenidos de la página oficial de SIRGAS, para obtener coordenadas UTM entendibles para el usuario común, mediante el empleo del software Excel

Aplicar modelos matemáticos y estadísticos a los datos de las estaciones de monitoreo continuo para obtener el mejor modelo de velocidades, mediante el empleo de herramientas tecnológicas actuales

Generar un mapa de velocidades de las estaciones GPS permanentes utilizadas en esta investigación, para tener una idea clara de cómo y hacia donde se mueven estas, utilizando las técnicas cartográficas aprendidas a lo largo de la formación académica

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ESTACIONES DE MONITOREO CONTINUO

2.1.1 DEFINICIÓN

Una estación de monitoreo continuo GPS es un antena más receptor GPS que funciona de manera permanente, se encuentra ubicado en un punto previamente seleccionado sobre la superficie terrestre (VILLELLA, 2006).

2.1.2 COMPONENTES DE UNA RED DE ESTACIONES GPS PERMANENTE

Para que los datos obtenidos por estaciones de monitoreo continuo sean utilizables se deben asociar en una red de estaciones GPS, para Brunini, CimbaroGalbán y Zakrajsek (2004), estas redes se encuentran conformadas por tres componentes fundamentales;

La primera la constituyen las estaciones GPS permanentes funcionando en forma autónoma, esta constituye la componente principal de la red, pues cumple con la misión de recolectar las observaciones GPS de las que se nutre toda la red. Los elementos básicos necesarios para instalar una estación permanente son los siguientes:

- Un receptor y una antena GPS geodésicos;
- Una PC para almacenar y administrar la información;
- Programas de automatización;
- Conexión a Internet;
- Fuente ininterrumpida de energía (UPS).

La segunda componente la constituye un centro de coordinación y almacenamiento de datos, a este centro se encuentran conectadas todas las estaciones GPS permanentes. Su finalidad es la coordinar el funcionamiento de la red y almacenar las mediciones realizadas por todas las estaciones en un único servidor, donde se pone a disposición de los usuarios, constituyéndose en el primer producto tangible de la red. Este centro es también la boca de acceso a toda la información concerniente a la red y a todos los servicios que esta brinda a sus usuarios.

La tercera componente tiene la misión de procesar las observaciones de la red en uno o varios centros de cálculo, para obtener coordenadas de las estaciones, correcciones ionosféricas para receptores GPS de simple

frecuencia y otros productos útiles para la comunidad profesional o científica.

Toda la información y productos generados por la red, son puestos a disposición de la comunidad a través de un servicio en línea es decir a través del Internet (p.1)

2.1.3 INSTALACIÓN DE UNA ESTACIÓN GPS PERMANENTE

La instalación de una estación permanente es libre, para hacerlo no se requiere de ningún permiso, ni es necesario su registro; sin embargo para que sus datos sean confiables es recomendable que pertenezca a una red en la que si se exigen ciertas reglas básicas para su instalación y funcionamiento entre las que se destaca las siguientes:

- Contar con receptor y antena de doble frecuencia
- Posibilidad de rastrear al menos 8 satélites sobre los 10° de elevación
- Disponer , también, que el receptor reciba los códigos C/A y P
- Antena estable
- Distribución libre de los datos, preferentemente en forma diaria
- Acceso a los datos a través de Internet
- Intervalo de registro 30 segundos o menor
- Mantenimiento adecuado de todas las instalaciones

Si bien lo ideal es cumplir con todas estas condiciones, existen dos aspectos de gran importancia práctica que siempre obligan a buscar una solución de compromiso:

- La operación rutinaria de la estación simplifica si el receptor esta instalado en el mismo lugar donde trabaja el personal que la atiende, de manera que estos no están obligados a trasladarse para realizar los controles de rutina
- Si la estación se halla lejos de los centros que concentran la actividad económica de la región su impacto socioeconómico es mucho menor.

Para elegir un sitio adecuado para instalar una estación permanente deben observarse algunos requisitos, entre los más importantes se tiene:

- El horizonte entorno a la antena debe estar despejado para permitir la recepción de satélites con ángulo de elevación mayor a 3°
- En las cercanías de la antena no debe encontrarse objetos que puedan interferir con las señales GPS o la existencia de multi trayectorias
- El terreno debe ser geológicamente estable
- La antena debe estar montada sobre una estructura rígida y perdurable

- El sitio debe estar libre de interferencias electromagnéticas que puedan perturbar o impedir la recepción de las señales de los satélites
- Debe contarse con la infraestructura indispensable para asegurar el funcionamiento de la estación (energía eléctrica, con Internet, seguridad, accesibilidad fácil para el personal, etc.)

2.1.4 OBJETIVOS DE LA ESTACIÓN GPS PERMANENTE

Una estación permanente puede ser instalada por cualquier organismo público o privado, pero es verdaderamente importante que todas las que se instalen se integren en la red nacional de estaciones GPS permanentes. Esta red permite satisfacer objetivos muy importantes, entre los que pueden distinguirse:

- Reducir costos en equipamiento que deben realizar los profesionales para trabajar con GPS.
- Mejorar el rendimiento de los trabajos de campo, pues muchas tareas podrán llevarse a cabo con un solo receptor de simple frecuencia.
- Mejorarla georreferenciación de los catastros provinciales y municipales
- Perfeccionar el marco de referencia nacional y contribuir con el marco de referencia mundial ITRF
- Determinar los movimientos de la corteza terrestre

- Realizar estudios climatológicos
- Investigarla variabilidad ionosférica, etc.

2.1.5 RED GNSS DE MONITOREO CONTINUO DEL ECUADOR (REGME)

Actualmente, la REGME materializa el sistema SIRGAS – ECUADOR en el país. Es un conjunto de estaciones (receptores GNSS doble frecuencia con sus respectivas antenas geodésicas del tipo choke ring) de recepción continua, enlazadas a SIRGAS, que captan datos GPS y GLONASS los 365 días del año las 24 horas del día proporcionando al usuario información satelital necesaria para realizar el procesamiento diferencial satelital, considerando la variación de las coordenadas en el transcurso del tiempo. Se encuentra constituida por 31 estaciones distribuidas en todo el territorio continental y 2 estaciones en Galápagos, cubriendo el 95% de la superficie nacional como se muestra en la fig. 1 (Red GNSS de Monitoreo continuo del Ecuador).

Esta red se constituye en el marco geodésico de referencia nacional y proporciona a los usuarios de información georeferenciada, una referencia de alta precisión compatible con los sistemas satelitales de navegación global para la realización de trabajos geodésicos, topográficos, obras de ingeniería, mapeo, geofísica, demarcación, prospección minera y petrolera, entre otros.

La REGME cuenta con el apoyo de las siguientes instituciones nacionales e internacionales:

- CLIRSEN, Centro de Levantamientos Integrados de Recursos Naturales por Sensores Remotos.
- Colegio Militar No. 7, Grad. Miguel Iturralde.
- DGFI, Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut (Alemania)
- ETAPA, Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca.
- GAPMS, Gobierno Autónomo Provincial de Morona Santiago
- GMCM, Gobierno Municipal del Cantón Macas
- GPI, Gobierno Provincial de Imbabura .
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (Brasil)
- IGEPN, Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional
- ILUSTRE MUNICIPALIDAD DE CUENCA
- NGA, National Geospatial Intelligence Agency
- SIRGAS, Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas
- UTEQ, Universidad Técnica Estatal de Quevedo
- UTPL, Universidad Técnica Particular de Loja

2.2 TECTÓNICA DE PLACAS

2.2.1 HISTORIA DE LA TECTÓNICA DE PLACAS

Durante miles de millones de años se ha dado un lento pero continuo desplazamiento de las placas que forman la corteza del planeta Tierra, esto originó la llamada "tectónica de placas". La tectónica de placas es el nombre

de un modelo de la superficie de la Tierra esta teoría considera que la corteza y el manto superior (litósfera) están formados por una serie de placas que continuamente cambian su posición relativa, unas respecto a otras produciendo elevaciones, fallas, volcanes, mares y terremotos.

En 1620, el filósofo inglés Francis Bacon se fijó en la similitud que presentan las formas de la costa occidental de África y la costa oriental de Sudamérica, aunque no sugirió que los dos continentes hubiesen estado unidos antes. La propuesta de que los continentes podrían moverse la hizo por primera vez en 1858 Antonio Snider, un estadounidense que vivía en París. En 1915 el meteorólogo alemán Alfred Wegener publicó el libro "El origen de los continentes y océanos", donde desarrollaba esta teoría, por lo que se le suele considerar como autor de la teoría de la "deriva continental" como se muestra en la fig. 2

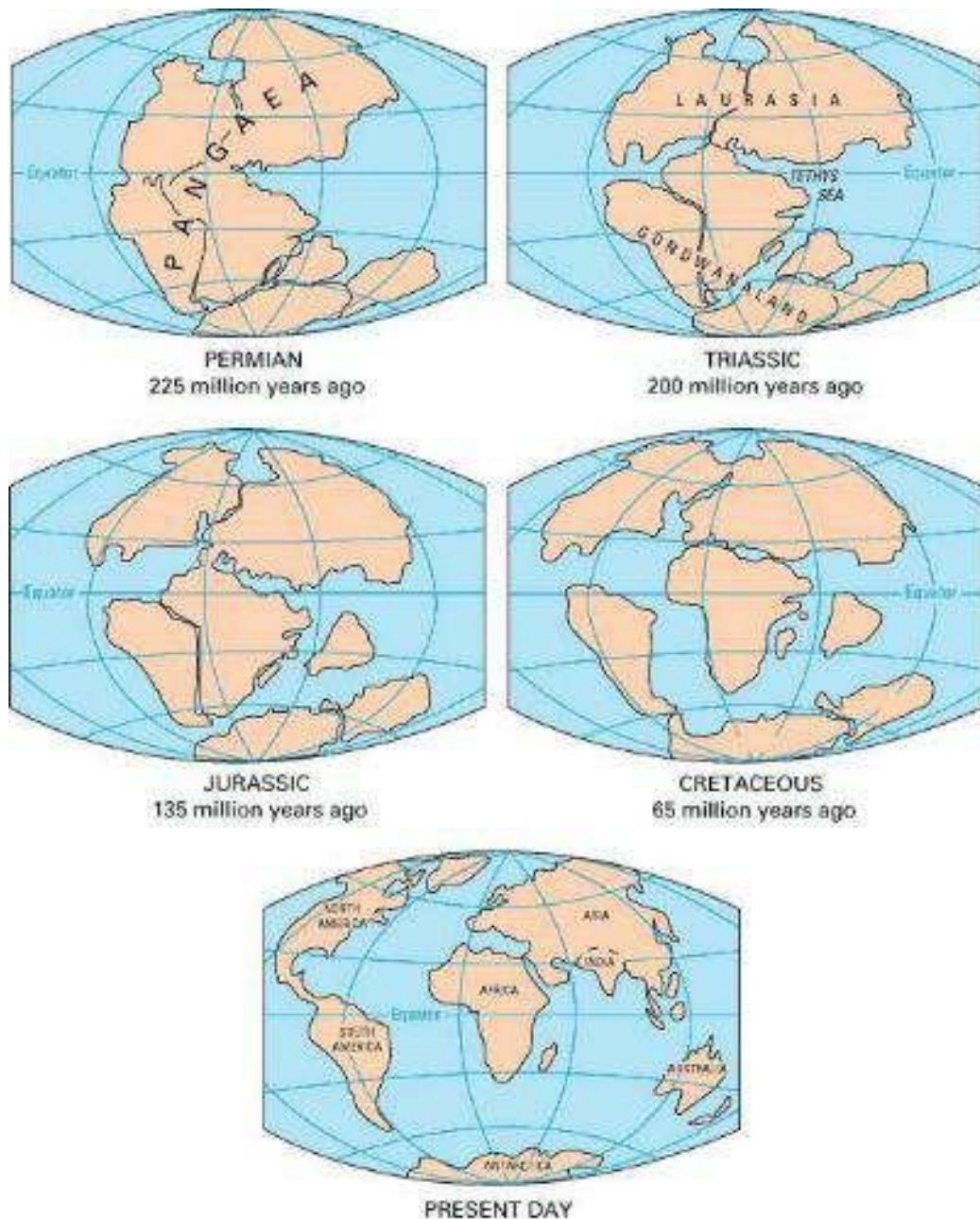


Figura No. 2 Deriva Continental

Fuente: <http://www.portalplanetasedna.com.ar>

La tectónica de placas considera que la litósfera está dividida en varios grandes segmentos relativamente estables de roca rígida, denominados placas, como se muestra en la fig. 3, las mismas que se extienden por el

globo como caparazones curvos sobre una esfera. Existen siete grandes placas como la Placa del Pacífico y varias más chicas como la Placa de Cocos frente al Caribe.

Por ser las placas parte de la litósfera, se extienden a profundidades de 100 a 200 km. Cada placa se desliza horizontalmente relativa a la vecina sobre la roca más blanda inmediatamente por debajo. Más del setenta por ciento del área de las placas cubre los grandes océanos como el Pacífico, el Atlántico y el Océano Índico.

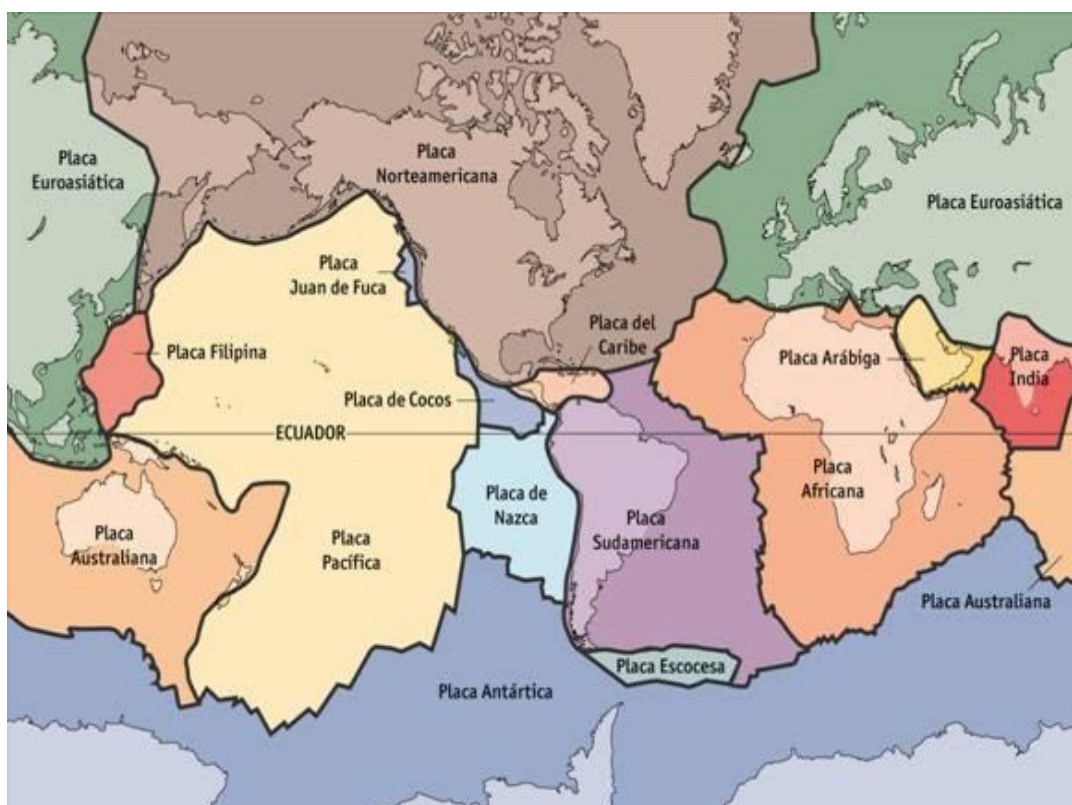


Figura No. 3 Nombres y Distribución de las placas

Fuente: <http://www.profesorenlinea.cl>

Las placas descansan sobre una capa de roca caliente y flexible, llamada astenósfera, que fluye lentamente a modo de alquitrán caliente.

Los geólogos todavía no han determinado con exactitud cómo interactúan estas dos capas, pero las teorías más vanguardistas afirman que el movimiento del material espeso y fundido de la astenósfera fuerza a las placas superiores a moverse, hundirse o levantarse.

“El concepto básico de la teoría de la tectónica de placas es simple y muy similar a lo que ocurre en la atmósfera y con el agua de los océanos: El aire caliente asciende por encima del aire frío y las corrientes de agua caliente flotan por encima de las de agua fría. El mismo principio se aplica a las rocas calientes que están bajo la superficie terrestre: el material fundido de la astenósfera, o magma, sube hacia arriba, mientras que la materia fría y endurecida se hunde cada vez más hacia al fondo, dentro del manto. La roca que se hunde finalmente alcanza las elevadas temperaturas de la astenósfera inferior, se calienta y comienza a ascender otra vez”.(Tectónica de placas disponible en: <http://www.astromia.com/tierraluna/tectonica.htm>)

Este movimiento continuo y, en cierta forma circular, se denomina convección. En los bordes de la placa divergente y en las zonas calientes de la litosfera sólida, el material fundido fluye hacia la superficie, formando una nueva corteza.

2.2.2 MEDICIÓN DEL MOVIMIENTO DE LAS PLACAS

Hace 225 millones de años, aún existía un único continente denominado Pangea. Hoy en día, Pangea se ha fragmentado, el agua ha invadido las zonas bajas y la apariencia de la Tierra ha variado sustancialmente. Por supuesto, seguirá cambiando con el paso del tiempo.

Sin embargo, no ha sido fácil demostrar, que efectivamente las placas se están moviendo hoy en día, ya que el desplazamiento es muy lento y su medición muy complicada; hemos tenido que esperar a la llegada de la era espacial para poder constatar que efectivamente aún existe una tectónica de placas es decir que estas se mueven.

Las velocidades calculadas para este fenómeno no suelen superar unos pocos centímetros al año, así que el grado de precisión en la medición de las distancias entre placas debe ser muy elevado. El uso de satélites es uno de los sistemas más precisos empleados en la actualidad, en sus dos modalidades, óptica y electrónica.

Los satélites geodésicos como el ANNA-1B (Primer satélite geodésico puesto en órbita en 1962), sirven como puntos de referencia de dos o más lugares situados sobre la superficie terrestre. Basta con utilizar una cámara en dirección al satélite para obtener una imagen sincronizada de su paso sobre el bien conocido cielo estelar. La comparación de diversas imágenes procedentes de varios lugares de observación permite realizar cálculos de triangulación bastante aproximados.

Mayor precisión se obtiene utilizando señales de radio (teniendo en cuenta el efecto Doppler) o, sobre todo, rayos láser, que son enviados hacia el satélite para ser reflejados y retornar al punto de origen. El láser es apuntado hacia el vehículo y activado según un protocolo de tiempo predeterminado. Cuando se detecta el retorno del pulso mediante un dispositivo fotoeléctrico, es posible medir la distancia exacta entre el satélite y el punto de observación.

Este tipo de medidas se hace en condiciones de luminosidad ambiental adecuadas. Dos mediciones simultáneas desde dos puntos distintos permite determinar las coordenadas de uno de ellos respecto al otro y por tanto la distancia entre ambos.

Otro método muy utilizado en la actualidad es el sistema GPS

La mejora al nivel de centímetro o a una precisión mejor es obtenida usando los retardos de la fase de los portadores de la microonda. El uso de señales diferenciadas reduce errores de reloj. Combinar ambas frecuencias transmitidas quita los retardos causados por el paso de las señales del GPS a través de la ionosfera. Los retardos troposféricos se pueden estimar para reducir errores de la posición y, además, para proporcionar datos atmosféricos valiosos. El elemento final para los levantamientos de alta precisión es proporcionado por un continuo funcionamiento de las estaciones permanentes GPS y de los centros de datos a los que estas estaciones pertenecen. Con estas respectivas correcciones la precisión a la que llegan puede ser de 5 a 10 mm.

La distribución mundial de las estaciones permanentes es crucial para los estudios locales del GPS y proporciona valiosos datos para los estudios globales. Un rango de instrumentos y de las técnicas del GPS está disponible para tratar una variedad amplia de aplicaciones de la investigación.

Tabla 1 Aplicación y Método GPS

Fuente: José Francisco Espinoza Matos, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima-Perú

Precisión	Método	Ciencia	Escala Típica
2-5 mm	Geodesia Alta Precisión (Doble frecuencia)	Tectónica de placas, Deformación de límite de placas, rebote glacial, Deformación intersísmica y postsísmica, volcanes	10 - 1000's km
2-5 mm	Geodesia Alta Precisión (frecuencia única)	Volcanes, zonas de falla, <i>tide gauges</i> , edificios y estructuras	<10 km
1-10 cm	Cinemática en tiempo real, rápida estática	<i>Faultscarp</i> de bastante alta precisión y mapeo de intersección, <i>uplifted terracemapping</i> , topografía de alta precisión, volcanes, edificios y estructuras.	<10 km

Con los datos proporcionados por las estaciones GPS permanentes y aplicando varias metodologías han sido desarrollados varios modelos que explican el movimiento de las placas tectónicas

Los modelos más reconocidos desarrollados en base a esta temática son los siguientes:

Tabla 2 Principales Modelos de Movimiento de Placas

Fuente: UNAVCO

MODELO	AUTOR
MORVEL (2010)	<i>DeMets, Gordon, y Arugs [2010]</i>
APKIM2005	<i>Drewes [2009]: soluciones ITRF2005 sitio DGFI o IGN</i>
GSRM v1.2 (2004)	<i>Kreemer, Holt, y Haines [2003] + actualizaciones</i>
CGPS (2004)	<i>Prawirodirdjo y Bock [2004] + actualizaciones mensuales</i>
REVEL 2000	<i>Sella, Dixon, y Mao [2002]</i>
ITRF2000 (AS&B [2002])	<i>Altamimi, Sillard, y Boucher [2002]</i>
HS3-NUVEL 1^a	<i>Gripp y Gordon [2002]</i>
APKIM2000	<i>Drewes [1998], Drewes y Angermann [2001]</i>
ITRF2000 (D&A [2001])	<i>Drewes y Angermann [2001]</i>
HS2-NUVEL 1^a	<i>Gripp y Gordon [1990], DeMets, Gordon, Argus, y Stein [1994]</i>
NUVEL 1^a	<i>DeMets, Gordon, Argus, y Stein [1994]</i>
NUVEL 1	<i>Argus y Gordon [1991]</i>
VEMOS 2009	<i>Drewes and Heidbach 2009</i>

2.3 SERIES TEMPORALES

Una serie temporal es un conjunto de observaciones ordenadas en el tiempo (TERRÁDEZ, 2004), que pueden representar la evolución de una determinada variable a lo largo de periodos iguales de tiempo (horas, días, semanas, meses, trimestres, años, etc) ; estas variables pueden ser de carácter físico, económico, ambiental, entre otras, y en nuestro caso en particular las variables a estudiar son las coordenadas de determinadas estaciones permanentes GPS de la REGME.

El objetivo del análisis de una serie temporal es el conocimiento de su patrón de comportamiento, para así prever su evolución futura, suponiendo que las condiciones no variarán.

Las observaciones de una serie de tiempo serán denotadas por:

$$Y(t_1), Y(t_2), \dots, Y(t_n) \quad (1)$$

Donde: Y es la variable a estudiar que varia en un periodo de tiempo t_i

2.3.1 COMPONENTES DE UNA SERIE DE TIEMPO

El análisis clásico de las series de tiempo se basa en la suposición de que los valores que toma la variable de observación es la consecuencia de tres componentes, cuya actuación conjunta da como resultado los valores medidos, estos componentes son (REDUAZ 2012):

- Tendencia
- Estacionalidad
- Ciclisidad
- Aleatoriedad

La tendencia de una serie de tiempo es el componente de largo plazo que representa el crecimiento o disminución en la serie sobre un periodo amplio (figura 4), es decir que no cambiará en el futuro lejano mientras no hayan cambios significativos o radicales en el entorno en el que se encuentra inmersa y que determina el comportamiento de la serie de tiempo en estudio, cambios que podrían ser originados como por ejemplo, por descubrimientos científicos, avances tecnológicos, fenómenos naturales, cambios culturales, geopolíticos, demográficos, religiosos, etc.

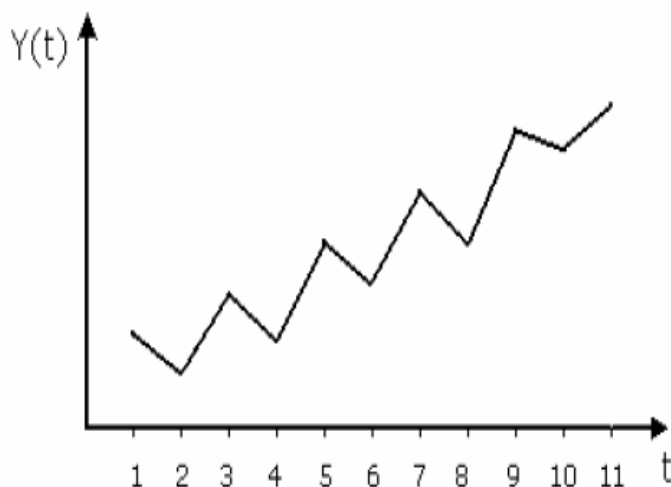


Figura No. 4 Serie de tiempo con tendencia creciente

Fuente: Jorge Galbiati Riesco

El componente estacional es un patrón de cambio que se repite a sí mismo en un periodo similar de tiempo. El patrón de cambio por lo general es un aumento o una disminución cuantitativa en los valores observados de una serie de tiempo específica.

El componente cíclico es la fluctuación en forma de onda alrededor de la tendencia (figura 5); estas ondas señalan las expansiones (ascensos) y las contracciones (descensos) de los movimientos de una serie alrededor del valor nominal; en cada ciclo dan las cúspides (valores más altos) y una sima (valor más bajo). La duración del ciclo se mide por el número de unidades de período que transcurren de una cúspide previa a la siguiente. Las fuerzas que son responsables de las fluctuaciones cíclicas son numerosas y complejas, pero son fundamentalmente factores económicos: por ejemplo: niveles de inversión, producción, consumo y gastos del sector público, que

originan los intervalos de prosperidad, retroceso, depresión y recuperación de la economía..

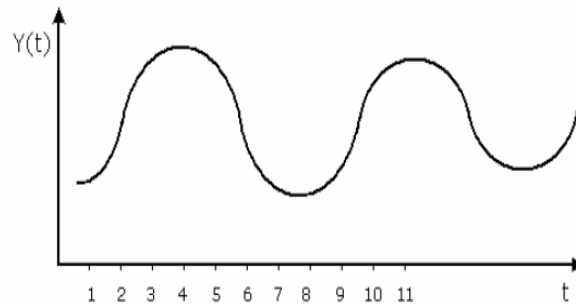


Figura No. 5 Serie de tiempo con estacionalidad y ciclisidad

Fuente: Jorge Galbiati Riesco

Esta componente no responde a ningún patrón de comportamiento, sino que es el resultado de factores fortuitos o aleatorios que inciden de forma aislada en una serie de tiempo como se muestra en la figura 6

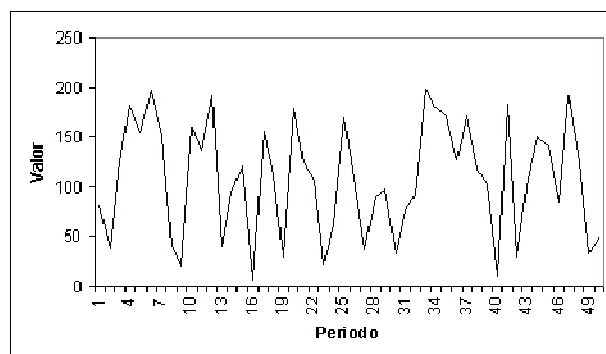


Figura No. 6 Serie de tiempo aleatoria

Fuente: Jonh E. Hanke

2.4 MÉTODO DE MÍNIMOS CUADRADOS

Se trabaja con sistemas de ecuaciones lineales homogéneas (GEMAEL, 1994)

$${}_n A_{u \ u} X_1 = {}_n L_1 \quad (2)$$

Donde:

A → Matriz de coeficientes

X → Matriz de incógnitas

L → Matriz de términos independientes

Se requiere:

$$n \geq u$$

Las ecuaciones deben ser linealmente independientes

$$\begin{aligned} A \cdot X &= L \\ \underbrace{A^{-1} \cdot A}_I \cdot X &= A^{-1} \cdot L \\ X &= A^{-1} \cdot L \end{aligned} \quad (3)$$

La matriz A debe ser una matriz cuadrada, es decir n=u

En el caso de que n>u

$$\begin{aligned}
 A^T \cdot A \cdot X &= A^T \cdot L \\
 \underbrace{(A^T \cdot A)^{-1} (A^T \cdot A)}_I \cdot X &= (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot L \quad (4) \\
 X &= (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot L
 \end{aligned}$$

Cada ecuación tiene una inconsistencia, es decir por ejemplo
 $10m \neq 10,05m$

Para esto se debe aumentar un vector de residuos o residuales (V)

$$\begin{aligned}
 10m &= 10,05 - 0,05 \\
 \Rightarrow V &= [V_1, V_2, V_3, \dots, V_n]^T \quad (5) \\
 \Rightarrow A \cdot X &= L + V
 \end{aligned}$$

Como ahora se tiene mayor número de incógnitas que ecuaciones se utiliza el método de mínimos cuadrados que nos permite minimizar los errores

$$\begin{aligned}
 V^T \cdot V &= \text{Mínimo} \\
 V &= A \cdot X - L \\
 (A \cdot X - L)^T (A \cdot X - L) &= \text{Mínimo} = \phi \quad (6)
 \end{aligned}$$

Por ser mínimo $\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0$

DERIVADAS BILINEALES DE MATRICES

$$\frac{\partial(x^T \cdot A \cdot y)}{\partial y} = A^T \cdot x$$

$$\frac{\partial(x^T \cdot A \cdot y)}{\partial x} = A \cdot y \quad (7)$$

DERIVADAS CUADRÁTICAS DE MATRICES

$$x^T \cdot A \cdot x \frac{\partial x^T \cdot A \cdot x}{\partial x} = A^T \cdot x + A \cdot x \quad (8)$$

DERIVADA DE UN PRODUCTO

$$A_{n \times n} Y_{n \times 1}$$

$$\frac{\partial A \cdot y}{\partial y} = \frac{\partial A \cdot y}{\partial y_1} + \frac{\partial A \cdot y}{\partial y_2} + \dots = A$$

$$Y_{1 \times n} B_{n \times n} \quad (9)$$

$$\frac{\partial(y^T \cdot B)}{\partial y} = \frac{\partial(y^T \cdot B)}{\partial y_1} + \frac{\partial(y^T \cdot B)}{\partial y_2} + \dots = B$$

$$\Rightarrow \frac{\partial \phi}{\partial x} = 2A^T \cdot A \cdot X - A^T \cdot L - A^T \cdot L = 0$$

$$= 2A^T \cdot A \cdot X - 2A^T \cdot L = 0$$

$$A^T \cdot A \cdot X = A^T \cdot L \quad (10)$$

$$\Rightarrow X = (A^T \cdot A)^{-1} A^T \cdot L$$

Para la presente investigación se considera que todas las observaciones tienen el mismo peso, es decir que ninguna es más importante que otra por

lo que se utiliza la matriz identidad para pesos, es decir que lo antes expuesto no cambia.

2.5 MODELOS ARIMA

En 1970, Box y Jenkins desarrollaron un cuerpo metodológico destinado a identificar, estimar y diagnosticar modelos dinámicos de series temporales en los que la variable tiempo juega un papel fundamental, los modelos ARIMA (MODELO AUTOREGRESIVO INTEGRADO A MEDIAS MÓVILES). La metodología ARIMA es sólo una pequeña parte de los que se conoce normalmente como “Econometría de Series Temporales” pero, sin duda alguna, una de las más utilizadas y germen de otros muchos desarrollos posteriores.

La principal ventaja de esta metodología es que proporciona predicciones óptimas en el plazo inmediato y en el corto plazo. Esto se debe a que la metodología Box-Jenkins nos permite elegir entre un amplio rango de distintos modelos según represente mejor el comportamiento de los datos. El sentido de predicciones óptimas significa que ningún modelo univariante puede ofrecer mejores predicciones que un modelo ARIMA. Esto no se cumple si se amplía el modelo ARIMA con regresión múltiple o se utiliza una metodología multivariante.

La principal desventaja de estos modelos es que la determinación del modelo que mejor se adecua a la serie de datos no es trivial y, por tanto, se requiere que la persona que realice predicciones tenga amplios

conocimientos sobre esta metodología. Esto ha inhibido el uso de esta metodología para realizar predicciones en el mundo de la empresa, ya que el aumento de precisión de las mismas no compensaba el coste de implantación. No obstante, es posible manejar algoritmos automáticos, que permiten que la persona que utilice estas técnicas no tenga que tener conocimientos extensos sobre esta materia. Así se lograrán mejores modelos y, por tanto, mejores predicciones, sin necesidad de ese aumento del coste de implantación.

2.5.1 EXPRESIÓN GENERAL DE UN MODELO ARIMA

Los modelos ARIMA se construyen a partir de los modelos ARMA, pero considerando que la serie en estudio para que sea estacionaria en media tendrá que diferenciarse una serie de veces.

Un modelo ARIMA (p,d,q) es un modelo ARMA(p,q) sobre la serie diferenciada d veces. Es decir, su expresión algebraica será:

$$Y_t^{(d)} = \phi_0 + \underbrace{\phi_1 \cdot Y_{t-1}^{(d)} + \dots + \phi_p \cdot Y_{t-p}^{(d)}}_{\text{Comp. Autorregresiva}} + \underbrace{\theta_1 \cdot \varepsilon_{t-1}^{(d)} + \theta_q \cdot \varepsilon_{t-q}^{(d)}}_{\text{Comp. de Media Movil}} + \varepsilon_t^{(d)} \quad (11)$$

Donde:

Y_t = variable respuesta;

$Y_{t-1}; Y_{t-p}$ = variable respuesta en los retrasos t-1; t-p

Φ_0, Φ_1, Φ_p = coeficientes calculados

$\varepsilon_{t-1}; \varepsilon_{t-q}$ = errores en períodos anteriores al tiempo t

ε_t = término de error en tiempo t

(d) = diferenciales de orden d

2.5.2 ALGUNAS PROPIEDADES DE UN MODELO ARIMA ÓPTIMO

A continuación se verán las características generales (MATE, 1994) que ha de tener un buen modelo ARIMA. Estas características servirán para posteriormente poder identificar, estimar y verificar el comportamiento de un modelo ARIMA que ha sido optimizado.

PARSIMONIA (PARQUEDAD)

Box y Jenkins ponen énfasis en que la clave de un buen modelo ARIMA es que cumpla el principio de parsimonia, que significa sencillez. Así, un modelo se dice que es parsimonioso si se ajusta a la serie de forma adecuada sin usar coeficientes innecesarios. Por ejemplo, si un modelo AR(1) y un modelo AR(2) se comportan de forma prácticamente idéntica, elegiremos el modelo AR(1) ya que así tendremos que estimar un coeficiente menos.

El principio de parsimonia es importante porque, en la práctica, un modelo parsimonioso suele generar mejores predicciones. La idea de la parsimonia da una fuerte orientación práctica a la hora de modelar e identificar una modelo ARIMA. Así, no se tiene que buscar el proceso ARIMA que realmente genera la serie temporal, sino que se conforma con encontrar

un modelo que se aproxime correctamente, tanto práctica como estadísticamente, al comportamiento de la serie temporal que se estudia.

Una idea importante es que el principio de parsimonia no tiene que ser sobrevalorado. También tenemos que tener en cuenta el resto de propiedades de un buen modelo ARIMA y valorarlas equitativa y proporcionalmente.

ESTACIONARIEDAD

Otra condición de gran importancia para lograr un buen modelo ARIMA es que la serie sea estacionaria.

Asumir que una serie sea estacionaria permite desarrollar un marco de trabajo bastante simple y usar herramientas estadísticas de muestreo de gran potencia. Así, si la media de un proceso es constante, podremos usar N observaciones para estimarla, mientras que sería mucho más complicado si la media no fuese estacionaria.

Las técnicas más comunes para conocer si una serie temporal es estacionaria son los contrastes de existencia de raíces unidad.

Si una serie no es estacionaria se puede modificar dicha serie para convertirla en estacionaria. Dado que las modificaciones son conocidas, podemos posteriormente invertirlas para obtener las predicciones en la misma métrica que la serie original.

Existen distintas técnicas para estabilizar la media y la varianza, como ya se ha comentado.

BUENOS COEFICIENTES ESTIMADOS

Que un modelo tenga unos buenos coeficientes estimados, está relacionado con dos vertientes distintas:

La primera es que los coeficientes, tanto los de la componente autorregresiva (ϕ 's) como los de la componente de media móvil (θ 's) sean significativamente distintos de cero. Esto se realiza mediante contrastes de hipótesis.

La segunda es que las estimaciones de los coeficientes ϕ 's y θ 's no deben estar altamente correladas entre sí. Si están muy correladas, tienden a ser inestables, incluso siendo estadísticamente significativos.

LOS RESIDUOS SON RUIDO BLANCO

Esta proposición es muy importante a la hora de verificar un modelo ARIMA, una vez se han realizado las etapas de identificación y ajuste.

La hipótesis crítica es la de incorrelación. Para comprobar esta hipótesis se utilizan distintos métodos de inferencia estadística (típicamente contrastes t y chi-cuadrado) aplicados a cada coeficiente de la función de autocorrelación y a la función de autocorrelación completa.

DEBE AJUSTARSE BIEN A LOS DATOS

Que un modelo se ajuste todo lo bien posible a los datos de los que es generado, es una hipótesis asumible y lógica. Esta bondad del ajuste se mide en términos de error. Distintas medidas de error son computables en la etapa de ajuste y se han analizado previamente.

Los márgenes asumibles del valor de estos errores de ajuste depende, ciertamente, de la naturaleza de la serie, por lo que no hay un criterio unívoco de comprobación de la adecuación del ajuste.

DEBE DAR BUENAS PREDICCIONES

Aunque el modelo haya sido ajustado y prediga el pasado de una forma suficientemente correcta, lo que realmente se requiere de cualquier modelo de predicción es que realice predicciones satisfactorias.

La evaluación de un modelo según este criterio se debe realizar mediante el uso durante un periodo de prueba o de verificación.

2.5.3 PASOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE LOS MODELOS ARIMA

Box y Jenkins proponen un procedimiento práctico en tres etapas (QUESADA) para hallar el modelo ARIMA óptimo. Su esquema simplificado se muestra en la figura 7 se analiza de manera más pormenorizada cada etapa.

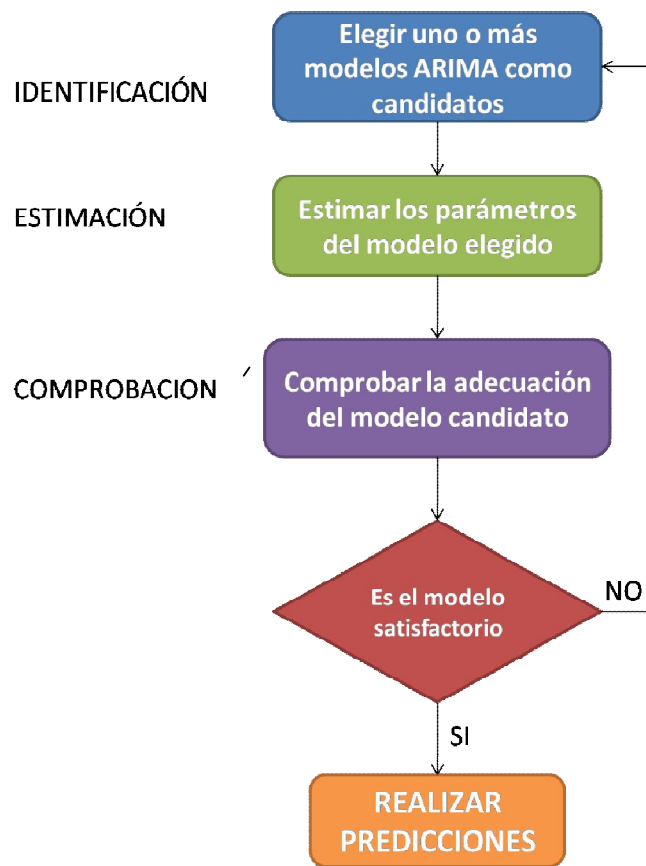


Figura No. 7 Esquema simplificado metodología Box-Jenkins

Fuente: Universidad Pontificia Comillas Madrid

IDENTIFICACIÓN

En esta etapa se analiza mediante distintas técnicas cual es el modelo ARIMA que, a priori, mejor se puede ajustar a la serie. Según la metodología clásica, las herramientas que permiten identificar el patrón que sigue la serie son las funciones de autocorrelación.

La idea básica para utilizar estas funciones de autocorrelación es la siguiente: cada modelo ARIMA tiene asociadas unas funciones de autocorrelación teóricas. En esta etapa se compara las funciones de autocorrelación estimadas con las teóricas y se elige como modelo tentativo aquel al que más se aproximen ambas. Luego se debe realizar el resto de las etapas para comprobar que realmente es el adecuado.

ESTIMACIÓN

En esta etapa se obtiene las estimaciones de los parámetros del modelo ARIMA, una vez fijados en la etapa de identificación los órdenes autorregresivo y de media móvil. Esta estimación se realiza mediante minimización cuadrática del error de ajuste. Esta etapa proporciona señales de aviso sobre si el modelo es adecuado o no. En particular, si los coeficientes no cumplen ciertas inecuaciones derivadas de la invertibilidad y la estacionariedad, el modelo ajustado debe ser rechazado.

COMPROBACIÓN

Box y Jenkins proponen algunas comprobaciones de hipótesis que deben ser realizadas para comprobar que el modelo estimado es estadísticamente adecuado. Algunas de las comprobaciones que se deben realizar son que los residuos cumplen las hipótesis de ruido blanco o que no existen coeficientes no significativos.

Una vez comprobado que el modelo es correcto, se puede realizar predicciones usando el mismo.

Para solventar el problema de la identificación mediante comparación de funciones de autocorrelación, hay desarrollos de algoritmos que unen la etapa de identificación y estimación. Así se logra poder orientar el desarrollo del algoritmo a medidas de error y comprobación de hipótesis del modelo. Mediante estos algoritmos se puede ajustar de una manera correcta modelos ARIMA con órdenes altos.

CAPÍTULO III

MODELAMIENTO

3.1 PREPROCESAMIENTO DE LOS DATOS

Para iniciar con el modelamiento de los datos se deber realizar varios procesos previos que se cita a continuación:

- Descargar de la página oficial de SIRGAS los datos de las estaciones de monitoreo continuo GPS del Ecuador, es necesario tener en cuenta que estos datos vienen dados en coordenadas cartesianas, divididos por semana GPS y vienen los datos de todas las estaciones SIRGAS, es decir que de cada archivo se debe seleccionar los datos de las estaciones del Ecuador.
- Analizar la continuidad de los datos de las estaciones del Ecuador, se considera que un buen modelo debe tener datos continuos de al menos 2 años, es decir aproximadamente 100 observaciones o más, teniendo en cuenta este

condicionamiento se ha seleccionado a 3 estaciones para el modelamiento, Esmeraldas, Riobamba y Loja (Las monografías de las estaciones se encuentran en el Anexo1)

- Los datos vienen dados en coordenadas cartesianas por lo que se requiere realizar una transformación a coordenadas que sean más entendibles para el futuro usuario, para este caso particular se decidió transformar a coordenadas UTM y la altura considerada es la elipsoidal.

Se procede a hacer un análisis estadístico básico; se obtiene la media y la desviación estándar, con el fin de analizar la “validez de los datos”

Una regla empírica indica lo siguiente; en una distribución de frecuencias simétrica, con forma de campana, aproximadamente el 95% de las observaciones se encontrarán entre más dos y menos dos desviaciones estándar desde la media, a partir del valor medio.

- Se analiza individualmente los requerimientos de cada uno de los modelamientos matemáticos uno vez determinados los mismos se procede a los diferentes modelamientos.

Tabla 3 Coordenadas UTM estación Esmeraldas

SEM	ESTE	NORTE	h	SEM	ESTE	NORTE	h	SEM	ESTE	NORTE	h
1543	0,5237	0,4214	0,6565	1575	0,5316	0,4217	0,6425	1607	0,5409	0,4218	0,6503
1544	0,5204	0,4215	0,6511	1576	0,5302	0,4217	0,6454	1608	0,5393	0,4217	0,6536
1545	0,5249	0,4214	0,6609	1577	0,5313	0,4216	0,6398	1609	0,5389	0,4218	0,6527
1546	0,5208	0,4215	0,6568	1578	0,5346	0,4217	0,64	1610	0,5385	0,4218	0,6532
1547	0,5221	0,4215	0,6582	1579	0,5301	0,4217	0,6399	1611	0,5381	0,4218	0,6536

1548	0,5209	0,4215	0,6577	1580	0,5342	0,4216	0,6443	1612	0,5416	0,4218	0,6605
1549	0,5214	0,4215	0,6568	1581	0,5332	0,4216	0,6364	1613	0,5425	0,4218	0,6566
1550	0,5231	0,4215	0,6545	1582	0,5332	0,4216	0,6366	1614	0,544	0,4218	0,6544
1551	0,5237	0,4215	0,6563	1583	0,5347	0,4217	0,6376	1615	0,5445	0,4218	0,655
1552	0,523	0,4215	0,656	1584	0,5341	0,4216	0,6452	1616	0,5451	0,4218	0,6577
1553	0,5226	0,4215	0,6588	1585	0,5338	0,4216	0,6389	1617	0,5444	0,4219	0,6538
1554	0,524	0,4215	0,6595	1586	0,5352	0,4216	0,6418	1618	0,5446	0,4219	0,6591
1555	0,5246	0,4215	0,6544	1587	0,5374	0,4216	0,6437	1619	0,5455	0,4219	0,6622
1556	0,5245	0,4215	0,657	1588	0,5376	0,4216	0,6464	1620	0,5468	0,4218	0,6577
1557	0,5237	0,4215	0,6565	1589	0,5362	0,4217	0,6477	1621	0,5474	0,4218	0,658
1558	0,5226	0,4215	0,6578	1590	0,5366	0,4217	0,6499	1622	0,5453	0,4219	0,6551
1559	0,5238	0,4215	0,6541	1591	0,5365	0,4217	0,6472	1623	0,5465	0,4219	0,6556
1560	0,5207	0,4215	0,6544	1592	0,5361	0,4217	0,6478	1624	0,548	0,4219	0,6522
1561	0,5253	0,4216	0,6557	1593	0,5393	0,4217	0,6459	1625	0,548	0,4219	0,6479
1562	0,5276	0,4216	0,6514	1594	0,5386	0,4217	0,6463	1626	0,5468	0,4219	0,6434
1563	0,5253	0,4216	0,6513	1595	0,5379	0,4217	0,6489	1627	0,5484	0,4219	0,6519
1564	0,525	0,4216	0,6539	1596	0,538	0,4217	0,6463	1628	0,5493	0,4219	0,6484
1565	0,5278	0,4217	0,6521	1597	0,5393	0,4217	0,6512	1629	0,5505	0,4219	0,6486
1566	0,53	0,4216	0,6543	1598	0,539	0,4217	0,6485	1630	0,5505	0,4219	0,6445
1567	0,5304	0,4216	0,6534	1599	0,5396	0,4217	0,6512	1631	0,5501	0,4219	0,6421
1568	0,5313	0,4216	0,6515	1600	0,54	0,4217	0,6508	1632	0,5517	0,422	0,6306
1569	0,53	0,4217	0,6516	1601	0,5395	0,4218	0,6488	1633	0,5513	0,422	0,6343
1570	0,5326	0,4216	0,6526	1602	0,5398	0,4217	0,6505	1634	0,5525	0,422	0,6342
1571	0,5308	0,4216	0,6482	1603	0,5456	0,4219	0,6559	1635	0,5531	0,422	0,6368
1572	0,5304	0,4216	0,65	1604	0,5406	0,4217	0,6515	1636	0,5534	0,422	0,637
1573	0,5308	0,4217	0,6482	1605	0,5401	0,4218	0,6522	1637	0,5523	0,422	0,6407
1574	0,5322	0,4216	0,647	1606	0,54	0,4217	0,6485	1638	0,5529	0,422	0,6381

3.2 MODELAMIENTO POR MÍNIMOS CUADRADOS

Como se indicó en el punto anterior se realizó el análisis respectivo de los datos, y se determinó que no es necesario la continuidad de los mismos por lo que se procede a descartar de este análisis los datos que no cumplen la regla empírica de más menos dos desviaciones estándar de la media.

Además por facilidad del modelamiento se procede a tomar la parte decimal de las coordenadas, es decir se resta un mismo valor entero a las coordenadas.

Para el presente modelamiento se debe considerar que para cada una de las coordenadas (Este, Norte y altura elipsoidal), se va a realizar un modelo totalmente independiente. A continuación se realiza el modelamiento de la estación de Esmeraldas (Tabla 3.1)

Se realiza el análisis preliminar de los datos para determinar si son óptimos para el modelamiento

Tabla 4 Media, Desviación estándar, varianza de los datos de la estación

Esmeraldas

	ESTE	NORTE	h
MEDIA	0,5468	0,4219	0,6467
DESVIACION ESTÁNDAR	0,0157	0,0003	0,0072

Analizando la regla empírica ya mencionada los datos que no cumplen esta condición son las siguientes:

- Para las coordenadas Este y Norte todas las observaciones cumplen la regla
- Para la Altura Elipsoidal no cumplen con la regla las semanas 1619 y 1632

Aplicando lo establecido en el capítulo anterior (2.4.1 CASO DE UNA RECTA) se procede a calcular los parámetros a, y b para cada coordenada teniendo como resultado:

Tabla 5 Parámetros de modelo lineal estación Esmeraldas

COORDENADA	A	b	r	r²
ESTE	0,345 X 10 ⁻³	-0,013	0,995	0,990
NORTE	0,006 X 10 ⁻³	0,412	0,991	0,982
He	-0,102 X 10 ⁻³	0,811	-0,659	0,434

El proceso se repite para las otras estaciones obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 6 Parámetros de modelo lineal estación Riobamba

COORDENADA	A	b	r	r²
ESTE	0,027 X 10 ⁻³	0,510	0,640	0,410
NORTE	0,003 X 10 ⁻³	0,428	0,981	0,963
He	-0,162 X 10 ⁻³	0,322	-0,808	0,652

Tabla 7 Parámetros de modelo lineal estación Loja

COORDENADA	A	b	r	r²
ESTE	0,331 X 10 ⁻³	4,502 X 10 ⁻³	0,995	0,990
NORTE	0,003 X 10 ⁻³	0,708	0,975	0,950
He	-0,044 X 10 ⁻³	0,900	-0,314	0,099

3.3 MODELAMIENTO ARIMA

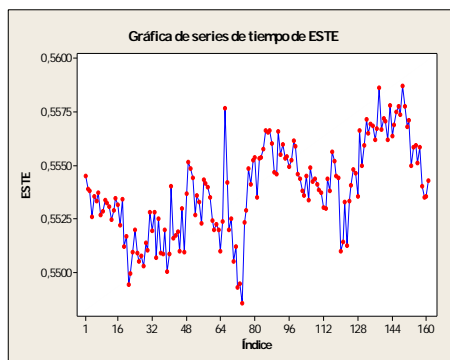
Vasado en la metodología ARIMA se procede a analizar los datos, considerando que es necesario que todos los datos sean continuos. Para este trabajo, en caso de no existir algún valor, este se debía calcular sacando el promedio entre la observación anterior y posterior, para así tener la continuidad de los datos.

A continuación se va a realizar el proceso con las coordenadas de la estación de Esmeraldas.

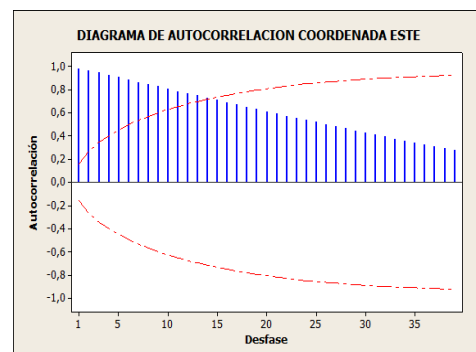
Analizando la continuidad de los datos se visualiza que la semana 1662 no posee información, por lo que se procede a realizar un promedio entre la semana 1661 y 1663.

Se analiza por separado cada coordenada, en este caso la coordenada ESTE

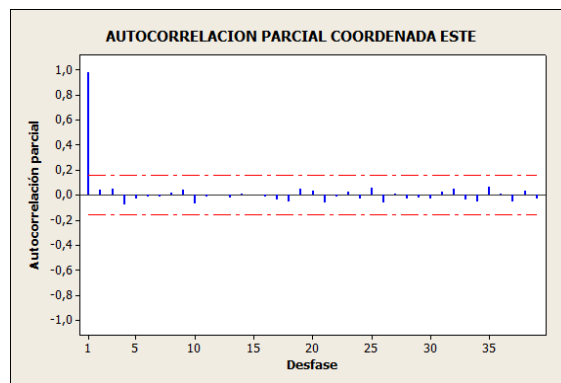
Posteriormente se realiza el análisis de las gráficas de las coordenadas



(a)



(b)



(c)

Figura No. 8 (a) Gráficas de la serie de tiempo, (b) Autocorrelación total y (c) Autocorrelación parcial de la coordenada este

Realizando un análisis de la gráfica a de la fig. 8 de la serie se deduce que la serie no es estacionaria, y que presenta una tendencia creciente. (Las gráficas de todas las estaciones se encuentran en el ANEXO 2)

Analizando las gráficas a y b de la fig. 8 autocorrelación y autocorrelación parcial se deduce que nuestro modelo se puede ajustar a los siguientes modelos ARIMA (0,1,1); (1,1,0); (2,1,0); (2,0,0); ya que presenta un desfase significativo en el primer desfase y un desfase menor en el segundo desfase en el software Minitab procedemos a correr los modelos y a analizar los resultados para ver cual modelos es el óptimo, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 8 Modelamiento ARIMA para coordenada Este

Modelo ARIMA: ESTE (0,1,1)

Estimados en cada iteración

Iteración	SSE	Parámetros
0	1,91113	0,100
1	0,01709	0,010
2	0,00155	0,003
3	0,00043	0,001
4	0,00032	0,000
5	0,00031	0,000
6	0,00031	0,000
7	0,00031	0,000
8	0,00031	0,000

El cambio relativo en cada estimado es menor que 0,0010

Estimados finales de los parámetros

Tipo	Coef	Coef. de EE	T	P
MA 1	0,5119	0,0693	7,38	0,000
Constante	0,00032474	0,00005578	5,82	0,000

Diferenciación: 1 Diferencia regular

Número de observaciones: Serie original 156, después de diferenciar 155

Residuos: SC = 0,000308625 (se excluyeron pronósticos retrospectivos)

MC = 0,000002017 GL = 153

Estadística chi-cuadrada modificada de Box-Pierce (Ljung-Box)

Desfase	12	24	36	48
Chi-cuadrada	7,7	22,9	36,0	52,5
GL	10	22	34	46
Valor P	0,657	0,408	0,374	0,238

Modelo ARIMA: ESTE (0,0,1)

Estimados en cada iteración

Iteración	SSE	Parámetros
0	1,97013	0,647
1	1,09173	-0,633
2	0,70103	0,626
3	0,48528	0,620
4	0,35210	0,616
5	0,26321	0,613

6	0,19786	-0,800	0,609
7	0,12873	-0,950	0,600
8	0,01139	-0,960	0,550
9	0,01103	-0,959	0,547
10	0,01103	-0,958	0,547

El cambio relativo en cada estimado es menor que 0,0010

Estimados finales de los parámetros

Tipo		Coef	Coef. de EE	T	P
MA	1	-0,9582	0,0195	-49,18	0,000
Constante		0,546814	0,001283	426,17	0,000
Media		0,546814	0,001283		

Número de observaciones: 156

Residuos: SC = 0,0109985 (se excluyeron pronósticos retrospectivos)

MC = 0,0000714 GL = 154

Estadística chi-cuadrada modificada de Box-Pierce (Ljung-Box)

Desfase	12	24	36	48
Chi-cuadrada	1248,3	1976,1	2326,7	2441,1
GL	10	22	34	46
Valor P	0,000	0,000	0,000	0,000

Modelo ARIMA: ESTE (1,1,0)

Estimados en cada iteración

Iteración	SSE	Parámetros
0	1,25778	0,100 0,090
1	0,00932	0,133 0,008
2	0,00267	-0,017 0,004
3	0,00089	-0,167 0,002
4	0,00036	-0,317 0,001
5	0,00032	-0,400 0,000
6	0,00032	-0,407 0,000
7	0,00032	-0,408 0,000
8	0,00032	-0,408 0,000

El cambio relativo en cada estimado es menor que 0,0010

Estimados finales de los parámetros

Tipo		Coef	Coef. de EE	T	P
AR	1	-0,4079	0,0736	-5,54	0,000
Constante		0,0004537	0,0001167	3,89	0,000

Diferenciación: 1 Diferencia regular

Número de observaciones: Serie original 156, después de
diferenciar 155

Residuos: SC = 0,000322705 (se excluyeron pronósticos
retrospectivos)

MC = 0,000002109 GL = 153

Estadística chi-cuadrada modificada de Box-Pierce (Ljung-Box)

Desfase	12	24	36	48
Chi-cuadrada	10,8	27,8	44,2	61,8
GL	10	22	34	46
Valor P	0,375	0,183	0,113	0,060

El resultado de los modelamientos en Minitab de todas las estaciones se encuentran en el ANEXO 3

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

El siguiente análisis pretende determinar si los modelos calculados son óptimos para poder generar los pronósticos adecuados.

4.1 MODELOS DE MÍNIMOS CUADRADOS

Para los modelos lineales de mínimos cuadrados se realiza el siguiente análisis:

Se analizamos las tablas 5, Parámetros de modelo lineal estación Esmeraldas; 6, Parámetros de modelo lineal estación Riobamba y 7 Parámetros de modelo lineal estación Loja del capítulo anterior; en estas se muestra los coeficientes calculados para cada estación y coordenada, (a, b, r y r^2) de estos el valor para el análisis que se utiliza es el valor del coeficiente de correlación lineal r , este indica el grado de dependencia entre las dos variables (coordenada y tiempo).

Si $r = -1$ todos los puntos se encuentran sobre la recta existiendo una correlación que es perfecta e inversa.

Si $r = 0$ no existe ninguna relación entre las variables.

Si $r = 1$ todos los puntos se encuentran sobre la recta existiendo una correlación que es perfecta y directa.

ESTACIÓN ESMERALDAS

Para la coordenada Este el valor de $r=0,995$ y para la coordenada norte $r=0,991$, esto indica que la relación lineal existente entre el tiempo y las coordenadas es alta y directamente proporcional, es decir que las coordenadas aumentan conforme el tiempo aumenta; para la altura elipsoidal $r=-0,659$, indica que la relación es baja e inversamente proporcional, es decir que la altura disminuye con el tiempo, sin embargo no es determinante para saber si existe o no relación entre el tiempo y la altura elipsoidal es decir que puede existir una relación distinta a la planteada en esa investigación

ESTACIÓN RIOBAMBA

Para la coordenada Este el valor de $r=0,640$ y para la coordenada norte $r=0,981$, esto indica que la relación lineal existente entre el tiempo y las coordenadas es alta para la coordenada Norte y baja para la coordenada Este y es directamente proporcional, es decir que las coordenadas aumentan conforme el tiempo aumenta; para la altura elipsoidal $r=-0,808$, indica que la relación es alta e inversamente proporcional, es decir que la altura disminuye con el tiempo, sin embargo no es determinante para saber

si existe o no relación entre el tiempo y la altura elipsoidal es decir que puede existir una relación distinta a la planteada en esa investigación

ESTACIÓN LOJA

Para la coordenada Este el valor de $r=0,995$ y para la coordenada norte $r=0,975$, esto indica que la relación lineal existente entre el tiempo y las coordenadas es alta y es directamente proporcional, es decir que las coordenadas aumentan conforme el tiempo aumenta; para la altura elipsoidal $r=-0,314$, indica que la relación es baja e inversamente proporcional, es decir que la altura disminuye con el tiempo, sin embargo no es determinante para saber si existe o no relación entre el tiempo y la altura elipsoidal es decir que puede existir una relación distinta a la planteada en esa investigación

4.2 MODELOS ARIMA

Para los modelos ARIMA se ejemplariza el análisis de los datos arrojados en el capítulo anterior, para la coordenada Este de la estación de Esmeraldas

Analizando los valores de los errores para los modelos se tiene:

- ARIMA (0,0,1) $s^2 = 0,0000714$
- ARIMA (1,1,0) $s^2 = 0,000002109$
- ARIMA (0,1,1) $s^2 = 0,000002017$

Se hace un análisis de los resultados arrojados por Minitab:

El error (MC) es menor en el modelo ARIMA (0,1,1) sin embargo es muy similar al error del modelo ARIMA (1,1,0), basados en este parámetro los dos modelos pueden aplicarse; aplicando el principio de parsimonia (sencillez), los dos modelos presentan 2 términos, es decir que por este principio los dos modelos pueden aplicarse de igual manera, un último análisis de los resultados de chi-cuadrado vemos que los valores del modelo ARIMA (0,1,1) son menores, basados en este parámetro podemos decidir que el modelo ARIMA (0,1,1) es el que mejor resultado ofrece. Aplicando esta metodología se obtiene los siguientes modelos para las respectivas coordenadas de cada estación, los modelos se presentan en el ANEXO 2; se debe tener en cuenta que estos modelos se generan siempre con un 95% de confianza, esto ya viene dado por el fabricante del software (Minitab)

Tabla 9 Modelos ARIMA aceptados

ESTACIÓN	COORDENADA	ARIMA	COEFICIENTES	ERROR s^2
RIOBAMBA	ESTE	(2,0,0)	$\Phi_0=0,0728298$ $\Phi_1=0,5893$ $\Phi_2=0,2793$	0,000001427
	NORTE	(2,0,0)	$\Phi_0=-3,61391E-03$ $\Phi_1=0,7026$ $\Phi_2=0,3057$	0,0000000004584
	H	(1,1,0)	$\Phi_0=-0,0001093$ $\Phi_1=-0,2452$	0,00000797
	ESTE	(0,1,1)	$\mu=0,00032474$ $w_1=0,5119$	0,000002017
	NORTE	(1,0,0)	$\Phi_0=-3,07241E-03$ $\Phi_1=1,0073$	0,000000000847
	H	(2,0,0)	$\Phi_0=0,0153617$ $\Phi_1=0,5753$ $\Phi_2=0,4012$	0,00000928

LOJA	ESTE	(2,0,0)	$\Phi_0=0,166600$	0,000005400
			$\Phi_1=0,4403$	
			$\Phi_2=0,2510$	
	NORTE	(2,0,0)	$\Phi_0=-7,02412E-03$	0,000000000600
			$\Phi_1=0,5642$	
			$\Phi_2=0,4457$	
	h	(0,1,1)	$\mu=-0,0001056$	0,00002888
			$w_1=0,6239$	

4.3 PRUEBA CHI-CUADRADO

Mediante los modelos aceptados se calcula los pronósticos para 10 semanas, posteriormente se evalúa los modelos con observaciones de esas semanas

Tabla 10 Pronósticos para 10 semanas de los modelos aceptados estación Esmeraldas

SEMANA	MÍNIMOS CUADRADOS			ARIMA	
	ESTE	NORTE	ESTE (0,1,1)	NORTE (1,0,0)	h (2,0,0)
1699	641938,5738	10001791,4223	641938,5730	10001791,4223	251,6396
1700	641938,5742	10001791,4223	641938,5733	10001791,4223	251,6396
1701	641938,5745	10001791,4223	641938,5736	10001791,4223	251,6400
1702	641938,5749	10001791,4223	641938,5739	10001791,4223	251,6401
1703	641938,5752	10001791,4223	641938,5743	10001791,4223	251,6404
1704	641938,5756	10001791,4223	641938,5746	10001791,4223	251,6406
1705	641938,5759	10001791,4223	641938,5749	10001791,4223	251,6408
1706	641938,5762	10001791,4223	641938,5752	10001791,4223	251,6411
1707	641938,5766	10001791,4223	641938,5756	10001791,4223	251,6413
1708	641938,5769	10001791,4224	641938,5759	10001791,4223	251,6415

Tabla 11 Pronósticos para 10 semanas de los modelos aceptados estación Riobamba

SEMANA GPS	MÍNIMOS CUADRADOS		ARIMA	
	NORTE	ESTE (2,0,0)	NORTE (2,0,0)	h (1,1,0)
	1699	9996834,43228971	761339,55403238	9996834,43226741
1700	9996834,43229252	761339,55409367	9996834,43227023	2817,04617701
1701	9996834,43229532	761339,55406295	9996834,43227307	2817,04605880
1702	9996834,43229813	761339,55406196	9996834,43227593	2817,04597853
1703	9996834,43230093	761339,55405279	9996834,43227881	2817,04588895
1704	9996834,43230374	761339,55404712	9996834,43228171	2817,04580166
1705	9996834,43230654	761339,55404121	9996834,43228463	2817,04571380
1706	9996834,43230935	761339,55403615	9996834,43228756	2817,04562608
1707	9996834,43231215	761339,55403152	9996834,43229051	2817,04553833
1708	9996834,43231496	761339,55402737	9996834,43229349	2817,04545059

Los pronósticos para todas las semanas se encuentran en el ANEXO 4

Tabla 12 Pronósticos para 10 semanas de los modelos aceptados estación Loja

SEMANA GPS	MÍNIMOS CUADRADOS			ARIMA	
	ESTE	NORTE	ESTE (2,0,0)	NORTE (2,0,0)	h (0,1,1)
1699	700011,5668	9992353,7135	700011,5437	9992353,7135	2142,8165
1700	700011,5672	9992353,7135	700011,5436	9992353,7135	2142,8164
1701	700011,5675	9992353,7135	700011,5424	9992353,7135	2142,8163
1702	700011,5678	9992353,7135	700011,5419	9992353,7135	2142,8162

1703	700011,5682	9992353,7135	700011,5414	9992353,7135	2142,8161
1704	700011,5685	9992353,7135	700011,5410	9992353,7135	2142,8160
1705	700011,5688	9992353,7135	700011,5407	9992353,7135	2142,8159
1706	700011,5692	9992353,7135	700011,5405	9992353,7135	2142,8158
1707	700011,5695	9992353,7135	700011,5403	9992353,7135	2142,8157
1708	700011,5698	9992353,7135	700011,5402	9992353,7135	2142,8155

Un buen modelo tiene residuales próximos a cero, sin embargo lo importante de un modelo es pronosticar a futuro así se puede evaluar los modelos con datos observados a futuro. Se ha evaluado para 5 observaciones por lo que se realiza la prueba de chi-cuadrado para validar nuestros modelos, mediante la siguiente fórmula:

$$x^2_{cald} = \sum \frac{(fo - fe)^2}{fe}$$

Donde:

fo = Frecuencia del valor observado

fe = Frecuencia del valor esperado

Tabla 13 Cálculo de chi-cuadrado de las diferentes estaciones

ESTACIÓN	MÍNIMOS CUADRADOS		ARIMA		
	ESTE	NORTE	ESTE	NORTE	H
ESMERALDAS	3,1338E-12	2,2671E-16	8,6577E-12	3,439E-16	3,8992E-08
RIOBAMBA		1,2194E-16	1,1085E-11	2,62E-16	1,3019E-08
LOJA	4,8518E-09	3,5312E-16	1,3272E-10	3,9917E-16	4,4294E-08

Una vez calculados los valores de chi-cuadrado se procede a verificar en la tabla los valores críticos para un nivel de confianza del 95% con 4 grados de libertad; el valor en la tabla es de 9,448; como se puede apreciar todos los valores calculados son menores por lo que se acepta la hipótesis nula de que los valores se ajustan correctamente al modelo.

En las siguientes tablas se presenta los datos utilizados para el cálculo de chi-cuadrado para cada estación.

Tabla 14 Residuos de los pronósticos con datos observados
Estación Riobamba

SEMANA GPS	COORDENADAS OBSERVADAS			RESIDUOS			
				MÍNIMOS CUADRADOS		ARIMA	
	ESTE	NORTE	He	NORTE	ESTE (0,1,1)	NORTE (1,0,0)	(2,0,0)
	1700	761339,5546	9996834,432	2817,046506	-0,00003152	0,00053098	-0,00000924
1701	761339,555	9996834,432	2817,047546	0,00000087	0,00095558	0,00002311	0,00148718
1702	761339,555	9996834,432	2817,047546	-0,00000194	0,00095657	0,00002025	0,00156746
1703	761339,5562	9996834,432	2817,050529	-0,00000502	0,00210117	0,00001710	0,00464041
1704	761339,5554	9996834,432	2817,049021	0,00001399	0,00138369	0,00003601	0,00321951

**Tabla 15 Residuos de los pronósticos con datos observados
Estación Esmeraldas**

SEMANA	CCORDENADAS OBSERVADAS			RESIDUOS				
				MÍNIMOS CUADRADOS		ARIMA		
	GPS	ESTE	NORTE	h	ESTE	NORTE	ESTE (0,1,1)	NORTE (1,0,0)
1700	641938,5733	10001791,42	251,6400	-0,000896	-0,000041	-0,000017	0,000001	0,000378
1701	641938,5747	10001791,42	251,6380	0,000134	-0,000011	0,001034	0,000030	-0,001918
1702	641938,5747	10001791,42	251,6380	-0,000211	-0,000017	0,000709	0,000023	-0,002111
1703	641938,5762	10001791,42	251,6396	0,000982	-0,000013	0,001923	0,000027	-0,000749
1704	641938,5752	10001791,42	251,6416	-0,000427	-0,000004	0,000535	0,000036	0,000986

**Tabla 16 Residuos de los pronósticos con datos observados
Estación Loja**

SEMANA	CCORDENADAS OBSERVADAS			RESIDUOS				
				MINIMOS CUADRADOS		ARIMA		
	GPS	ESTE	NORTE	h	ESTE	NORTE	ESTE (0,1,1)	NORTE (1,0,0)
1700	700011,5435	9992353,714	2142,823	-0,02375	-0,00001	-0,00019	0,00001	0,00661
1701	700011,5375	9992353,714	2142,82	-0,03007	-0,00003	-0,00500	-0,00001	0,00453
1702	700011,5375	9992353,714	2142,82	-0,03040	-0,00003	-0,00447	-0,00002	0,00464
1703	700011,5473	9992353,714	2142,813	-0,02094	0,00003	0,00585	0,00004	-0,00253
1704	700011,5448	9992353,714	2142,81	-0,02378	0,00003	0,00370	0,00004	0,00169

Para que el modelo sea completo es necesario tener un cálculo de las 3 coordenadas por estación

4.4 UTILIDAD DE LOS MODELOS

Determinando el desplazamiento anual es decir 52 semanas se sabe directamente hacia donde y cuanto se mueve el Ecuador Continental.

Se obtiene el desplazamiento semanal el que se utiliza para la transformación entre épocas de referencia

$$\begin{aligned}X(t_o) &= X(t_i) + (t_o - t_i) \times V_x \\Y(t_o) &= Y(t_i) + (t_o - t_i) \times V_y \\Z(t_o) &= Z(t_i) + (t_o - t_i) \times V_z\end{aligned}$$

Siendo $X(t_o)$, $Y(t_o)$, $Z(t_o)$ las coordenadas en la época deseada, $X(t_i)$, $Y(t_i)$, $Z(t_i)$ las coordenadas en la época de referencia, $(t_o - t_i)$ el intervalo de tiempo transcurrido entre la realización del sistema de referencia y el levantamiento GNSS y V_x , V_y , V_z las velocidades de las estaciones de referencia

En las siguientes tablas se presentan los desplazamientos calculados por los modelos para las diferentes estaciones; este cálculo se lo realizó partiendo de la definición de velocidad que es la magnitud física que muestra y expresa la variación en cuanto a posición de un objeto y en función del tiempo, que sería lo mismo que decir que es la distancia recorrida por un objeto en la unidad de tiempo; pero además del tiempo, para definir la velocidad de desplazamiento de un objeto, será preciso tener en cuenta también la dirección y el sentido del mencionado desplazamiento.

Para la presente investigación se consideró los pronósticos generados en cada uno de los modelos, obteniendo la velocidad de la siguiente manera:

$$v = \frac{\text{desplazamiento}}{\text{tiempo}}$$

El desplazamiento está dado por la diferencia entre coordenada final, con la coordenada inicial; para el tiempo se tiene la diferencia entre el número de semana GPS final con el número de semana GPS inicial; con estos valores se obtiene el valor de velocidad para 1 semana; posteriormente se multiplica por 52 que es el número de semanas GPS que tiene un año GPS para obtener el valor de velocidad anual.

Tabla 17 Velocidad de desplazamiento de las estaciones del Ecuador

ESTACIÓN	MINIMOS CUADRADOS		ARIMA		
	ESTE	NORTE	ESTE	NORTE	h
	mm/año	mm/año	(0,1,1) mm/año	(1,0,0) mm/año	(2,0,0) mm/año
ESMERALDAS	17,84859	0,30348	16,54987	0,28976	4,99109
RIOBAMBA		0,14495	0,17598	0,14097	-5,06324
LOJA	17,11813	0,17082	0,22825	0,14468	-4,98991

NOTA: Según la resolución SIRGAS 2011 No. 04 del 10 de agosto de 2011 sobre el Proyecto MoNoLin: Incorporación de movimientos no lineales en marcos de referencia geodésicos SIRGAS del 10 de agosto de 2011, manifiesta que:

Considerando

1. Que las coordenadas de los puntos materializados sobre la superficie de la Tierra cambian con el tiempo de un modo complejo que responde a diferentes procesos geofísicos del Sistema Tierra, p. ej. eventos sísmicos, dinámica de la atmosfera y de la hidrosfera, etc.;

2. Que la cinemática de los marcos de referencia se describe usualmente a través de cambios lineales de coordenadas (i.e. velocidades constantes);

3. Que esta descripción resulta insuficiente para representar la posición real de las estaciones que conforman los marcos de referencia;

4. Que es necesario definir metodologías que permitan la incorporación de movimientos no lineales en la realización de los marcos de referencia;

5. Que la Presidencia del Grupo de Trabajo I de SIRGAS (Sistema de Referencia) y del Grupo de Trabajo II (SIRGAS-GTII: SIRGAS en el Ámbito Nacional) han propuesto la creación de un proyecto orientado a este tema específico;

Se resuelve

1. Establecer un proyecto específico denominado MoNoLin (Incorporación de movimientos no lineales en marcos de referencia geodésicos), suscrito a los Grupos de Trabajo SIRGAS-GTI y

SIRGAS-GTII. El objetivo de este proyecto es definir la estrategia más adecuada para incluir los movimientos no lineales de las estaciones de referencia en la determinación de sus coordenadas y consecuentemente mejorar la representación de la cinemática de los marcos de referencia que conforman;

2. Que la coordinación del proyecto esté a cargo de Juan Carlos Báez de la Universidad de Concepción, Chile y Sergio Cimbaro del Instituto Geográfico Nacional de Argentina, con el propósito de que definan la estrategia y cronograma necesarios para alcanzar los objetivos propuestos y reporten rutinariamente al Consejo Directivo de SIRGAS sobre los avances dados;

3. Que la vigencia inicial de este proyecto sea de 4 años.

Esto indica que los modelos lineales actuales no representan totalmente la realidad del movimiento de placas tectónicas.

4.5 MAPA DE VELOCIDADES DEL ECUADOR CONTINENTAL

Para los resultados obtenidos en la tabla 17; considerando que existen velocidades con la metodología ARIMA tanto para las coordenadas Este, Norte y Altura elipsoidal se procede a elaborar un mapa de velocidades de cada una de las estaciones, Esmeraldas Riobamba y Loja; al tener datos en Este y Norte, se procede a obtener el vector resultante de estas, obteniendo una dirección y un desplazamiento representados en la figura 9; al ser el movimiento mucho mayor de la estación de Esmeraldas, no se puede

representar con un único símbolo, razón por la cual se los representa con vectores de diferentes colores; al ser los movimientos de las estaciones de Loja y Riobamba similares si se los representa con vectores del mismo color.

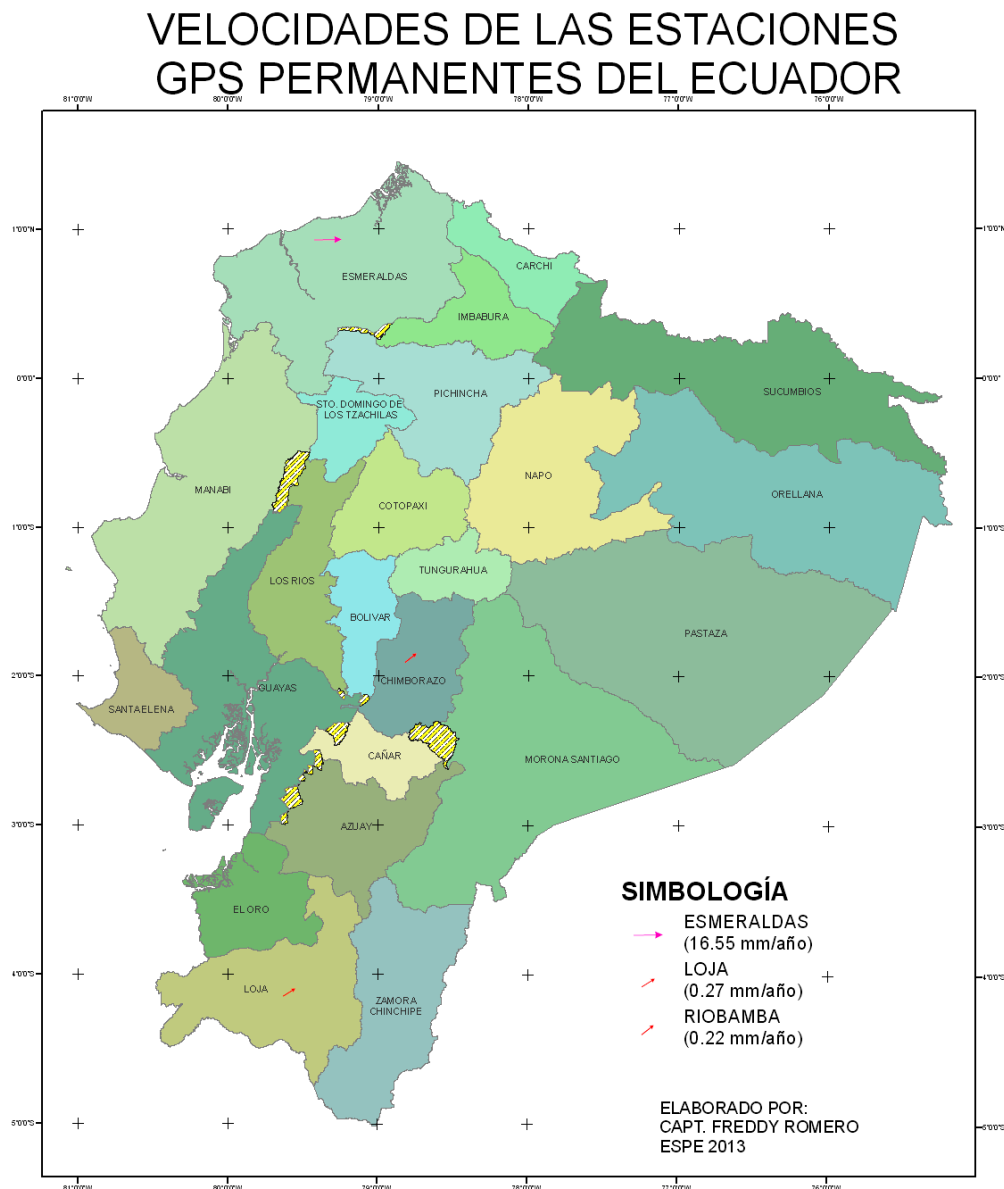


Figura No. 9 Mapa de Modelo de Velocidades de las Estaciones GPS Permanente del Ecuador

CONCLUSIONES

- El modelamiento por mínimos cuadrados, ajuste a una recta, no es aplicable en la presente investigación ya que se necesita que se generen modelos para las coordenadas Este, Norte y Altura Elipsoidal de cada estación, y esta metodología se aplica únicamente a las coordenadas Este y Norte de las estaciones de Esmeraldas y Loja y a la coordenada Norte de la estación de Riobamba, quedando inconcluso el modelamiento.
- La metodología ARIMA es adecuada para realizar el modelamiento de las coordenadas Este, Norte y Altura Elipsoidal de las tres estaciones; esta metodología permite realizar modelos con un nivel de confianza del 95%.
- Dado que con la metodología ARIMA permite generar varios tipos de modelos, no se puede generalizar modelo para todas las coordenadas de las diferentes estaciones, el tipo de modelo generado obedece a aplicar los principios propios de esta metodología y está en base a las observaciones y a la realidad propia de cada estación.
- El movimiento anual en las coordenadas Este y Norte en las estaciones es relativamente mínimo en el orden de decimas de milímetro, sin embargo en la coordenada Este de la estación de Esmeraldas el movimiento anual es de 16.55 mm.
- Las estaciones de Riobamba y Loja presentan un movimiento negativo de alrededor de 5 mm anuales en el Altura Elipsoidal,

mientras que la estación de Esmeraldas presenta un movimiento de 5 mm anuales en la Altura Elipsoidal.

- SIRGAS considera que se deben calcular modelos no lineales para el movimiento de placas tectónicas, por lo que la metodología ARIMA, podría satisfacer esta necesidad.

RECOMENDACIONES

- Se utilice la metodología ARIMA para modelar todas las estaciones GPS permanentes del país, para de esta manera poder generar un modelo de velocidad propio.
- Se realice los trámites necesarios para poder reactivar la estación GPS permanente de la ESPE e integrar esta estación a la REGME; esto permitirá tener datos propios que permitirá realizar mayores estudios.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Brunini, C. G. (2004). *Agrimensoft*. Recuperado el Agosto de 2012, de <http://agimensoft.com.ar>

Gemael, C. (1994). *Introdução ao Ajustamento de Observações Aplicações Geodésicas*,.

Geophysical Journal International. (s.f.). *Mantleplumes*. Recuperado el Agosto de 2012, de <http://www.mantleplumes.org>

Gobierno de Perú. (s.f.). Recuperado el Agosto de 2012, de <http://www.estadisticas.gobierno.pr>

Instituto Geográfico Militar. (s.f.). *Geoportal*. Recuperado el Julio de 2013, de <http://www.geoportaligm.gob.ec>

Mate, C. *Modelos ARIMA*. Universidad Pontificia Comillas de Madrid.

Profesor en línea. (s.f.). *Profesor en línea*. Recuperado el Agosto de 2012, de <http://www.profesorenlinea.cl>

Quesada Pegalajar, M. *Análisis de Series, Modelos Heterocedásticos*.

Reduaz. (s.f.). Recuperado el Agosto de 2012, de <http://matematicas.reduaz.mx>

SIRGAS. (s.f.). *SIRGAS.ORG*. Recuperado el 12 de SEPTIEMBRE de 2012, de <http://www.sirgas.org>

Universidad Técnica Particular de Loja. (s.f.). Recuperado el 2011, de <http://www.utl.edu.ec>