

Revista Geoespacial N° 7

**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y MEDIO AMBIENTE**

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

**ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO**

## **Revista Geoespacial N° 7**

Revista oficial de difusión científica y tecnológica de la Carrera de Ingeniería Geográfica y Medio Ambiente del Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción de la Escuela Politécnica del Ejército

**Periodicidad:** La Revista Geoespacial es publicada un número anualmente

## **Revista Geoespacial, Diciembre 2010**

### **Editor**

Dr. Alfonso Tierra.  
Centro de Investigaciones Científicas  
Escuela Politécnica del Ejército-Ecuador

### **Comité Editorial**

Luis Cumbal. Ph.D  
Centro de Investigaciones Científicas  
Escuela Politécnica del Ejército-Ecuador

M.Sc. Oliva Atiaga  
Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción  
Escuela Politécnica del Ejército-Ecuador

M.Sc. Mario Cruz  
Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción  
Escuela Politécnica del Ejército-Ecuador

M.Sc. Modesto Correoso  
Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción  
Escuela Politécnica del Ejército-Ecuador

### **Diseño de Portada**

Ing. Oswaldo Padilla

### **Preguntas y Correspondencia**

Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción  
Av. General Rumiñahui s/n  
Sangolquí-Pichincha-Ecuador  
atierra@espe.edu.ec

Los contenidos de los artículos, aquí publicados, son de responsabilidad de los autores

**Sumario**

**Número 7, 2010**

<b>ELABORACIÓN DE 33 CARTAS – CROQUIS DE AMENAZAS POR TSUNAMI Y ANÁLISIS DE RIESGOS EN LA COSTA ECUATORIANA UTILIZANDO INDICADORES GEOMORFOLÓGICOS Y SOCIO-AMBIENTALES</b> MARIO A. CRUZ D’ HOWITT; NELSON E. VÁSQUEZ G.....	<b>1</b>
<b>IMPACTO AMBIENTAL EN LA PARROQUIA PACAYACU, (CANTÓN LAGO AGRIO - PROVINCIA DE SUCUMBÍOS), DESDE LA ECOLOGIA DEL PAISAJE</b> MARIO A. CRUZ D’HOWITT.....	<b>21</b>
<b>IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA COMO UNA HERRAMIENTA PARA EL MONITOREO DEL RETROCESO DE GLACIARES DEL NEVADO ANTIZANA. ESTUDIO DE CASO: GLACIARES 12, 15 Y CUENCA DEL RÍO ANTIZANA.</b> IVAN A. MEDINA; MARIO A. CRUZ D’HOWITT; JANISSE G. ROMERO .....	<b>32</b>
<b>NUEVO REPORTE Y LOCALIDADES DE RHODEA COUSINI JOUSSEAUME, 1900 (GASTROPODA: SUBULINIDAE) PARA EL ECUADOR.</b> MODESTO A. CORREOSO R.....	<b>45</b>
<b>GENERACIÓN DE UN MODELO DE ONDULACIONES GEOIDALES DEL ECUADOR CONTINENTAL A PARTIR DE DATOS DISPERSOS MEDIANTE MÍNIMOS CUADRADOS, COLOCACIÓN (LSC)</b> N. ARMANDO ECHEVERRÍA LL., ALFONSO R. TIERRA C. ....	<b>52</b>
<b>GENERACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO IONOSFÉRICO LOCAL, MEDIANTE MEDIDAS DE FALSA DISTANCIA A PARTIR DE ESTACIONES DE MONITOREO CONTINUO GPS</b> JOSÉ A. SILVA A.; ALFONSO R. TIERRA C.; MARCO P. LUNA L .....	<b>61</b>





# ELABORACIÓN DE 33 CARTAS – CROQUIS DE AMENAZAS POR TSUNAMI Y ANÁLISIS DE RIESGOS EN LA COSTA ECUATORIANA UTILIZANDO INDICADORES GEOMORFOLÓGICOS Y SOCIO-AMBIENTALES

MARIO A. CRUZ D'HOWITT<sup>(1)</sup>; NELSON E. VÁSQUEZ G.<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE. DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN. ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO. Avenida El Progreso, s/n. Campus Politécnico, Sangolquí-Ecuador; email: mcruz@espe.edu.ec

<sup>(2)</sup> SECRETARÍA NACIONAL DE GESTION DE RIESGOS. La Colina N-26-16 y San Ignacio. Quito-Ecuador; email: nelson\_vasquez@yahoo.com

Recibido: 26 de marzo 2010 / Aceptado: 6 de septiembre 2010

## RESUMEN

Nuestro País, debido a su posición geográfica, forma parte del llamado “Cinturón de Fuego del Pacífico”, una de las zonas sísmicamente más activas del planeta. Los sismos con epicentros en el lecho marino, o muy cercanos a la Costa, generan movimientos anormales de grandes masas de agua conocidos con el nombre de “Tsunami” o “Gran ola en puerto”. En las costas ecuatorianas, desde 1906 a la fecha, se han registrado al menos 6 eventos tsunamigénicos; por ello, entre los años 1993 y 2007, los autores, funcionarios de la Dirección Nacional de Defensa Civil, elaboraron 33 Cartas – Croquis de amenaza por tsunami, a escalas 1: 10.000 y mayores, (según el tamaño de la población), con sus respectivos anexos explicativos y análisis de vulnerabilidad para cada una de ellas. Este documento resume la metodología utilizada y muestra un análisis de los riesgos de la Costa ecuatoriana para eventos tipo tsunami. Expone algunas de las 33 Cartas de Amenazas realizadas, donde se muestran las zonas de seguridad y rutas de evacuación identificadas, a fin de proporcionar a los Gobiernos provinciales, seccionales y de socorro, el sustento técnico para los Planes de Contingencias que deberían realizarse para prevenir y mitigar el riesgo que supone la ocurrencia de un tsunami en la Costa ecuatoriana.

**Palabras Clave.** Amenaza. Tsunami. Riesgo.

## ABSTRACT

Our Country, due to its geographical position, is part of the “Pacific Ring of Fire”, one of the most seismically active areas on the planet. The earthquakes with epicenters in the sea floor, or very close to the coast, generating abnormal movements of large bodies of water known by the name “Tsunami” or “Great wave in port.” In the Ecuadorian coast, from 1906 to date, there were at least 6 events like tsunami type, therefore, between 1993 and 2007, the authors, members of the Civil Defense of Ecuador, drew 33 Sketches maps of tsunami, to scale 1: 10,000 and above (depending on the size of the population), with their explanatory annexes and vulnerability analysis for each of them. This document summarizes the methodology used and shows a risk analysis of the Ecuadorian coast tsunami type event. It presents some of the 33 Sketches maps made, showing safe areas and evacuation routes identified in order to provide to government agencies, fire departments and Red Cross agencies, the technical support for contingency plans to be implemented to prevent and mitigate the risk by the occurrence of a tsunami on the Ecuadorian coast.

**Key words.** Hazard. Tsunami. Risk.

## 1. INTRODUCCIÓN

Nuestro País, debido a su posición geográfica, forma parte del llamado “Cinturón de Fuego del Pacífico”, una de las zonas sísmicamente más activas del planeta. Aproximadamente a 50 kilómetros al Oeste de las costas ecuatorianas, se encuentra la “fosa” oceánica, lugar en

donde convergen dos placas tectónicas: la continental o sudamericana con la oceánica o del Pacífico, constituyendo esta interacción la fuente sismogénica más importante para Sudamérica.

Los sismos con epicentros en el fondo o lecho marino, o muy cercanos a la Costa, generan movimientos anormales de grandes masas de agua que se perciben en las costas como olas gigantescas que se abaten sobre las playas con suficiente energía para irrumpir cientos de metros costa adentro. Este fenómeno, muy conocido en Japón, se conoce con el nombre de “Tsunami” o “Gran ola en puerto”.

En las costas ecuatorianas, desde 1906 a la fecha, se han registrado al menos 6 eventos tsunamigénicos con alturas promedio de olas apenas superiores a dos metros, por lo que han pasado casi inadvertidas para la población, con excepción del gran tsunami de 1906 que afectó a la población de Esmeraldas, que, según tradiciones orales, prácticamente desapareció en un gigantesco remolino que se formó en la desembocadura del río, arrastrando consigo todo tipo de embarcaciones y gente.

## 2. JUSTIFICACIÓN Y ACCIONES EMPRENDIDAS

Este tipo de evento natural, recientemente conocido por la comunidad en general a raíz del tsunami de Asia, (26 de diciembre de 2004), y el de Chile (27 de febrero de 2010), justifican la necesidad de mitigar los daños que podrían causar tsunamis cercanos o lejanos en nuestras costas, (balnearios y puertos marítimos), en especial a la población, habida cuenta que un 75% de las playas nacionales son una fuente importante de atracción turística en el ámbito nacional y sub – regional<sup>1</sup>, y el porcentaje restante alberga a localidades costeras pequeñas cuyos habitantes están dedicados a la pequeña o mediana industria pesquera, artesanal, maderera o camaronera.

Por esta razón, el Instituto Oceanográfico de la Armada Nacional, (Espinosa, J., INOCAR), con el auspicio de las Naciones Unidas, realizó entre los años 1989 – 1992 el primer modelo matemático para un tsunami en costas ecuatorianas, acompañado de una Carta – Croquis de zonas de peligro para Salinas, en ese entonces Provincia del Guayas. Este trabajo sirvió de base para iniciar en el año de 1993 el proyecto “Análisis de impacto ambiental y mapas de riesgos potenciales en las provincias de Esmeraldas y Manabí”, por parte del Departamento Técnico de la Dirección Nacional de Defensa Civil, (Cruz, M., Vásquez, N.), en colaboración con Fundación Natura y con el Asesor Técnico Principal del Proyecto Ecu/91/004 de las Naciones Unidas.

Entre 1995 y 1996 el estudio mencionado se perfeccionó con el desarrollo de una metodología propia para realizar el “Análisis de Vulnerabilidad”, con miras a obtener valores cuantitativos a partir de valores cualitativos de riesgo, para las poblaciones ecuatorianas asentadas en zonas de influencia de eventos sísmico – tsunamigénicos. En el año 2004, se complementa la investigación con una actualización cartográfica y de datos, realizada para la provincia de Manabí, en colaboración con la Escuela Politécnica del Ejército (ESPE), Facultad de Ingeniería Geográfica. Como resultado, de 64 poblaciones estudiadas (que representan el 85% del total existente en las provincias de Esmeraldas y

---

<sup>1</sup> Espinosa, J. – INOCAR, 1990

Manabí), se obtuvieron los primeros 33 mapas finales de riesgos, complementados con datos de vulnerabilidad física y socio – económica, los mismos que, infortunadamente, no se conocieron fuera del ámbito de la desaparecida Dirección Nacional de Defensa Civil, a pesar de la importancia que reviste el tema por la alta densidad poblacional y de infraestructura física que caracteriza actualmente a los principales balnearios de la Costa ecuatoriana.

Además, el explosivo desarrollo urbano, la tala indiscriminada de vegetación, la expansión de la industria camaronera, la alteración de la morfología natural de playas y esteros para fines turísticos o industriales y la migración campesina a las grandes ciudades experimentado por el Ecuador en los últimos años, obliga a actualizar las Cartas - Croquis existentes y sus respectivos Análisis de Vulnerabilidad, para lo cual el primer paso es socializar los logros alcanzados y retroalimentar el proyecto con la respuesta de la comunidad involucrada.

### 3. METODOLOGÍA

Partiendo de un modelo matemático que predice el comportamiento de tsunamis de origen cercano en el Ecuador, calcula las probables alturas de olas y los tiempos de llegada a nuestras playas, (Espinosa, J., INOCAR,1992), se realizó un estudio geomorfológico de las poblaciones asentadas a orillas del mar, primeramente en la provincia de Esmeraldas y posteriormente en Manabí, utilizando fotografías aéreas verticales a escala aproximada de 1:60.000, ampliaciones de fotografías aéreas verticales a escala 1:30.000 y Cartas Topográficas a escalas de 1:25.000 y 1:50.000 adquiridas al Instituto Geográfico Militar (I.G.M.).

Con los resultados del proceso anterior, se realizó la caracterización del evento y su probable avance hacia el interior (run up), para lo cual se dibujaron varios perfiles batimétricos con distintas orientaciones frente a cada una de las poblaciones (un perfil perpendicular a la costa y dos ortogonales hacia el Sur y Norte, respectivamente, para analizar el comportamiento del fenómeno según la ubicación del epicentro sísmico con relación a la población investigada), utilizando para el efecto, Cartas de Navegación marítima, a escalas de 1:100.000 y 1:50.000 adquiridas al Instituto Oceanográfico de la Armada Nacional (INOCAR, 1984).

Ante la carencia de cartografía base a escalas adecuadas, o frente a la imposibilidad económica de elaborar ortofoto – mapas a escalas de 1: 10.000 o mayores, se utilizaron croquis censales, no geo - referenciados, a escalas aproximadas de 1:5.000, 1:2.500 y 1: 10.000, según el tamaño de la población investigada, adquiridas al Instituto Ecuatoriano de Estadística y Censos (INEC), levantadas para el censo de 1992, lo que obligó a efectuar trabajos de actualización y nivelación simple en cada una de las poblaciones estudiadas, para establecer cotas y zonas de seguridad.

Las acciones más importantes fueron la captura de información en las poblaciones investigadas utilizando indicadores socioeconómico – ambientales mediante técnicas como la encuesta planificada, observación no participativa, memoria colectiva, entre otras, y la verificación y corrección de la cartografía preliminar con datos de campo, labores efectuadas durante varios períodos, con el auspicio absoluto de la Dirección Nacional de Defensa Civil, desde los años 1993 al 2004. Con este material se procedió a la elaboración de las matrices de vulnerabilidad, sobre la base de distintos escenarios de ocurrencia y

factores modificadores de la vulnerabilidad, para cada una de las poblaciones costeras, incluyendo aquellas que hasta hoy no disponen de cartografía de ningún tipo, primero a lo largo del perfil costanero de la provincia de Esmeraldas, y posteriormente de Manabí.

En las Cartas -croquis se delimitaron las zonas de inundación directa e indirecta por acción de un tsunami, las zonas de seguridad, y se identificaron los recursos de la población tales como posibles albergues, oficinas estatales y de socorro (Policía, Bomberos), obteniéndose finalmente Mapas de Amenazas por Tsunami para 16 poblaciones de la provincia de Esmeraldas y 17 de la provincia de Manabí, con sus respectivas memorias explicativas y resúmenes ejecutivos. El método para la cuantificación de la vulnerabilidad fue desarrollado por los autores, en el Departamento Técnico de la Dirección Nacional de Defensa Civil del Ecuador, entre los años de 1993 a 1996.

A partir de los efectos del tsunami de Diciembre de 2004 en Asia, se realizó una discusión y análisis de la cartografía obtenida, concluyendo que en las localidades que poseen playas tendidas y morfología plana, el área de afectación debía incrementarse más (ampliarse en rangos de 500 a 1000 metros, según las particularidades y morfología de la zona).

#### **4. RESULTADOS**

Entre los años 1993 al 2007 se elaboraron 33 Cartas – Croquis de amenaza por tsunamis, a escalas 1:10.000 y mayores, (según el tamaño de la población), con sus respectivos anexos explicativos y análisis de vulnerabilidad para cada una de ellas.

Entre los objetivos más importantes alcanzados, se mencionan:

- Identificación de las áreas de influencia para eventos tipo tsunami, las zonas de seguridad y rutas de evacuación, para conocimiento y preparación de la población.
- Capacidad de proporcionar a los Organismos de Gobierno provincial y seccional, documentos imprescindibles para la planificación urbana y uso de la tierra.
- Sugerir medidas de mitigación adecuadas al tipo de población, porcentaje de riesgo y nivel socio - económico - cultural de sus habitantes.
- Proporcionar información de base para realizar la capacitación de autoridades y población en general ante la probable ocurrencia de un desastre por tsunami en los poblados costeros de las mencionadas provincias.
- Incorporar a la conciencia de la población y autoridades la variable riesgo derivado de este evento natural.

En la tabla N°. 1 constan las poblaciones cartografiadas y en la N°. 2 aquellas que, a pesar de no poseer cartografía de ninguna clase, fueron igualmente investigadas, llegando a determinar el grado de riesgo cualitativo sobre la base de parámetros geomorfológicos, socio – culturales, económicos y ambientales.

Tabla N°. 1: Poblaciones cartografiadas

<b>Provincia</b>	<b>Localidad</b>
Esmeraldas	Ancón (Palma Real)
	Pampanal de Bolívar
	San Lorenzo
	Tambillo
	Valdéz (Limonas)
	La Tolita
	La Tola
	Rocafuerte
	Río Verde y Palestina
	Tachina
	San Mateo
	Esmeraldas
	Tonsupa
	Atacames
	Tonchigüe
	Muisne
Manabí	Cojimés
	Pedernales
	Canoa
	Briceño
	San Vicente
	Bahía de Caráquez
	San Jacinto y San Clemente
	Crucita
	Jaramijó
	Manta
	San Mateo
	San Lorenzo
	Puerto Cayo
	Machalilla
	Puerto López
	Salango
Ayampe	

Tabla N°. 2: Poblaciones sin cartografía base

a) **Provincia de Esmeraldas:**

<b>No.</b>	<b>Población:</b>	<b>Riesgo por tsunami:</b>
1	El Brujo	Alto, acción de olas
2	El Cauchal	Alto, acción de olas

3	Recinto Pichangal	Medio, reflujo de esteros
4	El Changuaral	Medio, reflujo de esteros
5	Recinto El Viento	Alto, reflujo de esteros
6	La Tolita de los Ruano	Medio, reflujo de esteros
7	Cachimalero	Alto, acción marina
8	La Tolita (Pampa de Oro)	Alto, reflujo de ríos y esteros
9	Olmedo	Medio, reflujo de ríos y esteros
10	Recinto La Barca	Alto, acción mar y esteros
11	Las Peñas	Alto, acción del mar
12	Bolsoria y Vainillita	Muy Alta, acción del mar
13	Africa, Bocana de Ostiones	Muy Alta, acción del mar
14	Achilube	Alto, acción del mar
15	Las Piedras	Alto, acción del mar y del río
16	Playa Ancha	Muy Alta, acción del mar
17	Tonsupa	Muy Alta, acción del mar
18	Same y Casa Blanca	Alto, acción del mar y ríos
19	San Francisco	Muy Alto, acción del mar
20	Bunche	Por investigar
21	Las Manchas	Muy Alta, acción ríos/ mar
22	Mompiche	Por investigar
23	Portete	Por investigar
24	Bolívar	Por investigar
25	Daule	Por investigar

b) **Provincia de Manabí:**

No.	Población:	Riesgo por tsunami:
1	Lechugal	Alto, acción del mar
2	Cañaverál	Alto, acción del mar
3	La Chorrera	Alto, acción del mar
4	La Cabuya	Alto, acción río y del mar
5	Don Juan	Alto, acción de río y del mar
6	Pto. El Matal	Bajo, acción del mar
7	Boca de Briceño	Alto, acción del río y del mar
8	Los Arenales	Alto, acción del mar
9	San Mateo	Bajo, acción del mar
10	Santa Marianita	Bajo, acción del mar
11	Ligüique	Bajo, acción del mar
12	San Lorenzo	Bajo, acción del mar
13	Las Piñas	Bajo, acción del mar
14	El Abra	Bajo, acción del mar
15	Santa Rosa	Bajo, acción del mar

16	Boca de Cayo	Bajo, acción del mar
17	Río Amargo	Bajo, acción de ríos y esteros
18	Los Frailes	Muy Alto, acción del mar
19	Isla Salango	Muy Alto, acción del mar
20	Puerto Rico	Muy Alto, acción de ríos y mar
21	Ayampe	Muy Alto, acción de ríos y mar

## 5. ANÁLISIS DEL RIESGO

Para este efecto, se inició la investigación identificando las amenazas que conlleva el fenómeno tsunami. Del estudio de tsunamis ocurridos en otras regiones del Globo, especialmente del evento del 26 de Diciembre del 2004 en Asia, se desprende que un tsunami, ya sea de origen cercano o lejano, presenta cuatro tipos o categorías de amenazas, según el tipo de daño que pueda causar:

- 1) Amenaza por rotura o colapso de cresta (“efecto de ariete” o mecánico, por acción hidráulica: golpe o embate de la ola).
- 2) Amenaza por inundación turbulenta veloz, espumosa y con gran inercia (run up) debido al desplazamiento hacia adelante de una importante cantidad de agua colapsada.
- 3) Amenaza por erosión activa durante el reflujos o retroceso de la masa de agua, (run off) antes de la llegada de la siguiente ola; y,
- 4) Amenaza por “efecto de dique” en zonas de desembocaduras al mar de ríos y esteros: es decir, el reflujos de las aguas de éstos provocado por el ingreso de olas tsunamigénicas a sus cauces, ocasionando inundaciones costa adentro, por elevación rápida del nivel del agua.

Además, considerando que la ocurrencia de tsunamis de origen cercano es frecuente en Sudamérica, (Perú, 1946, 1952, 1957, 1964, 1974; Chile, 1868, 1927, 1949, 1960, 2010; Colombia, 1979, Ecuador 1906<sup>2</sup>) deben añadirse a la lista anterior, algunas amenazas intrínsecas del evento generador, que complican el escenario:

- La magnitud del sismo tsunamigénico ( $M_s > 6.7$ ), que de por sí es destructor.
- Amenaza de licuación de arenas durante la ocurrencia del sismo.
- Amenaza de desestabilización de taludes, con ocurrencia de deslizamientos, desprendimientos y derrumbes en colinas y acantilados.
- Amenaza de destrucción / obstrucción de vías de comunicación / evacuación.
- Colapso de líneas vitales (energía, agua potable y alcantarillado, comunicaciones) de una varias poblaciones cercanas al epicentro.

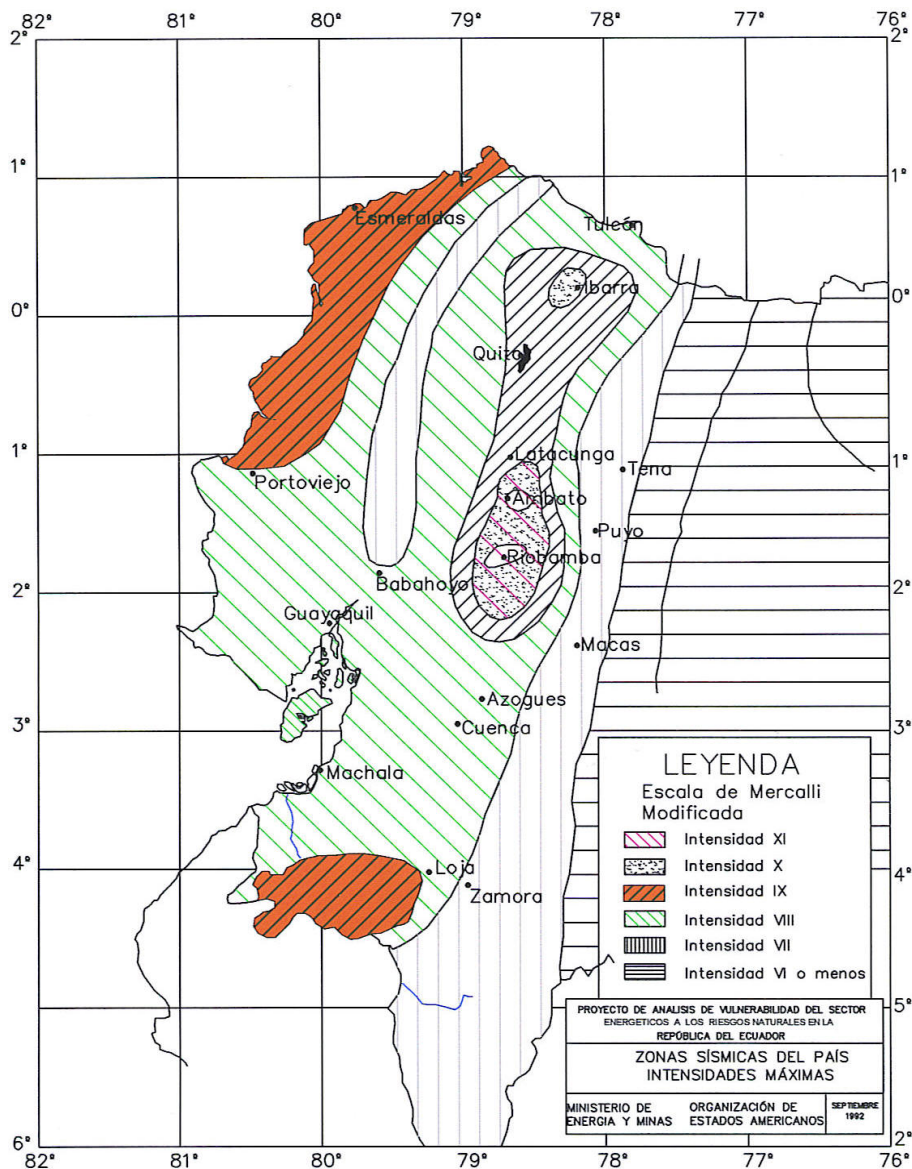
<sup>2</sup> Evento más importante



- Incendios de magnitud (caso de la ciudad de Esmeraldas).
- Contaminación ambiental (derrame de petróleo y derivados, rotura de sistemas de alcantarillado y agua potable).
- Saturación de los equipos de socorro.
- Tiempo de llegada de la primera ola (estimado entre 7 y 25 minutos, según la ubicación y geometría del epicentro (J. Espinosa INOCAR, 1992).

El mapa de zonificación sísmica del Ecuador (Fig. 1) muestra que las intensidades sísmicas esperadas son de grado IX, las mayores del país, y corresponden a las provincias de Esmeraldas y Norte de Manabí (M. Energía y Minas, OEA, IG-EPN, 1992), particular que por sí sólo sería suficiente para justificar la realización del presente estudio en la costa ecuatoriana.

Figura 1: Mapa de zonificación sísmica del Ecuador





Estudios y modelos probabilísticos (Nishenko, S., 1989, entre otros) indican una alta probabilidad de ocurrencia de sismos importantes en el Ecuador; esta situación es preocupante para un país en vías de desarrollo como el nuestro, en donde un fenómeno de este tipo, con los efectos observados en Asia, (Diciembre 2004), o Chile (Febrero 2010), se convertiría en “desastre nacional” debido a que el Estado se veía desbordado, especialmente en el ámbito social y económico, por la magnitud de la tragedia.

Esta afirmación no es exagerada si consideramos que nuestras playas han ido ganando paulatinamente importancia turística a nivel nacional e internacional, con la consiguiente expansión urbana hacia sectores demasiado cercanos al mar, aumentando así la vulnerabilidad y la contaminación ambiental. Así, en la provincia de Esmeraldas el 32% de las playas están calificadas como de atractivo excepcional a nivel subregional y regional; el 36% son de atractivo nacional y el restante porcentaje son de interés local y cantonal. Es decir, un 68% de las playas esmeraldeñas son las preferidas por el turismo nacional e internacional (Dirección Nacional de Turismo, 2006). Esto es fácil de comprobar, especialmente en el sector Sur de la provincia mencionada, (Atacames, Tonsupa, Same, Casa Blanca, etc.).

La zona Norte de Esmeraldas, si bien es menos turística que la anterior, constituye uno de los sectores más productivos de la costa ecuatoriana, no solamente por su exuberante vegetación, sus reliquias arqueológicas, (La Tolita), sino por el desarrollo de las industrias maderera, pesquera, camaronera, comercio de mariscos y actualmente la nascente industria del ecoturismo.

Paradójicamente, en esta provincia, el 56% de los habitantes de la zona rural, especialmente al Norte, vive en la extrema pobreza (Diario “El Comercio”, 08-05-96), lo que ha motivado la inadecuada explotación de los recursos naturales hasta casi extinguirlos (Diario “El Comercio”, 01-05-05), como el caso del manglar, la concha prieta, árboles maderables, entre otras especies.

En la provincia de Manabí, el 4.65% de las playas son consideradas de atractivo excepcional a nivel internacional (Bahía de Caráquez, Manta, Puerto López), el 37% son playas con atractivo excepcional a niveles nacional y subregional, el 32.56% son de atractivo nacional y el 25.58% lo son a nivel cantonal y local (Dirección Nacional de Turismo, 2006). Es decir, el 70% de las playas reciben todo el año a turistas internacionales y nacionales, estando la infraestructura hotelera y turística, en general, más completa y desarrollada que en la provincia de Esmeraldas. Por esta razón existe también mayor cantidad de infraestructura física y población sujeta a alto riesgo por eventos marinos.

Para el análisis de riesgos en la costa ecuatoriana, se consideró, a más de la variable amenaza y probabilidad de ocurrencia (o Peligro), la hipótesis de trabajo: “ocurrencia de un tsunami de origen cercano directamente al frente de cada una de las poblaciones estudiadas”. Esta hipótesis plantea, además, el peor de los casos o la situación más extrema a presentarse, y se la escogió a fin de reducir el margen de error y estar preparados de mejor manera para enfrentar un evento de esta naturaleza.

En nuestro análisis se consideraron las vulnerabilidades más significativas: física, social, cultural, económica, política y ambiental. Además se identificaron e involucraron otros factores modificadores de estas vulnerabilidades (Gráfico 1):

## **Factores modificadores de la Vulnerabilidad:**

- Hora del día de ocurrencia de los eventos naturales.
- Tipo y magnitud de los daños causados por el sismo precursor.
- Tipo de costa (forma, altura).
- Tipo y forma de playa (barreras naturales, profundidades).
- Infraestructura existente en las playas (tipo, cantidad).
- Densidad poblacional en la zona de riesgo (población flotante, población estable).
- Homogeneidad cultural de la población bajo riesgo.
- Capacidad de respuesta institucional y de la población.
- Medios disponibles (factores humanos, económicos, infraestructura física, etc.).
- Grado o nivel de preparación alcanzado por la población y por los Organismos de socorro.



Gráfico 1: Factores modificadores de la vulnerabilidad

Con el análisis de estas variables, se pudo estimar el nivel de riesgo cualitativo, resumido en el “Mapa de Riesgos por Tsunami de la Costa ecuatoriana”, (Figura 2).

De este mapa se deduce que los asentamientos humanos ubicados en zonas bajas y planas, muy cerca de playas “tendidas” o de poca pendiente; sobre islas arenosas, playas de acumulación o barras arenosas, zonas de marismas, albuferas y estuarios (Archipiélago de San Lorenzo, Muisne, Mompiche, Cojimíes, Boca de Briceño, entre otras) son de muy alto riesgo ante tsunamis a causa de su alta vulnerabilidad social, física y geomorfológica.

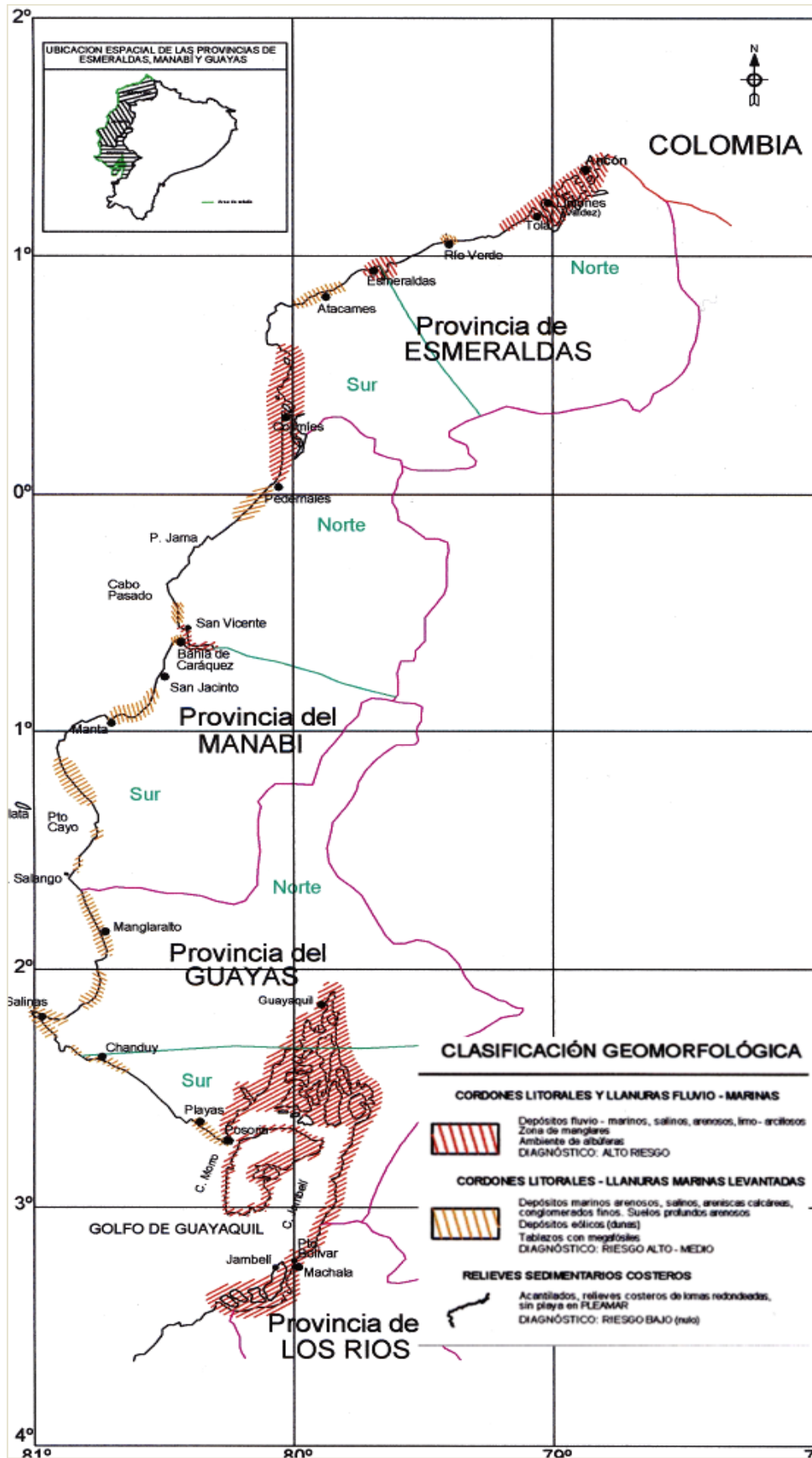


Figura 2: Mapa de riesgos por tsunami, de la costa ecuatoriana

La vulnerabilidad geomorfológica está representada por la inexistencia de zonas que brinden seguridad y la desaparición de barreras naturales; la vulnerabilidad socio – ambiental se refleja en la destrucción de las barreras vegetales naturales (bosques y manglares) para privilegiar la industria o el comercio; y sobre todo, en la gran densidad de población de escasos recursos económicos que viven en precarias condiciones en zonas bajas, junto al mar.

Por el contrario, quienes habitan en zonas altas, colinadas, playas levantadas y cerca de los acantilados costeros (algunos barrios de las ciudades de Esmeraldas, Pedernales, San Vicente, Bahía de Caráquez, Crucita, Manta, Puerto Cayo, Machalilla, Puerto López, entre otras) son consideradas sujetos de bajo riesgo para eventos tipo tsunami, sin embargo, estos últimos sectores son de alto riesgo frente a sismos con características de terremoto precursor debido a la inestabilidad de las laderas, taludes y acantilados que pueden originar deslizamientos, desprendimientos y derrumbes.

Además, para ambos tipos de asentamientos, es decir en zonas altas y bajas, se debe considerar la siempre presente posibilidad de licuación de los suelos arenosos, en especial los saturados o con niveles freáticos superficiales, aspectos no discutidos en el presente estudio.

En algunas localidades, dependiendo de la ubicación de los barrios o asentamientos humanos, existe la muy alta posibilidad de que apreciables sectores de población queden incomunicados y afectados por acción de varios eventos negativos a la vez, esto es, por escombros de casas y edificios como consecuencia del terremoto precursor, interrupción de vías de comunicación por deslizamientos y derrumbes y pocos minutos después por el embate de olas muy grandes, entre 8 y 10 metros de altura, (Espinosa, J., INOCAR, 1992) con la consiguiente inundación violenta o “run up” en los mismos sectores. Este el caso de la ciudad de Esmeraldas (barrio “Las Palmas”) y balneario de “Súa” en Esmeraldas; los barrios ubicados a lo largo del malecón de Pedernales; Puerto “El Matal”; San Vicente (barrios aledaños al aeropuerto y al cementerio); Bahía de Caráquez (sector hotel “La Piedra”), o la zona comercial de Manta, (sector del I. Municipio), en Manabí; Salinas y La Libertad en Santa Elena, entre otros ejemplos.

Los gráficos del 2 al 8, (Anexo 1), ilustran algunos ejemplos de los resultados finales obtenidos en el transcurso de esta investigación en diferentes poblaciones de la Costa ecuatoriana, aunque, por razones de extensión, no se anexa en este artículo las memorias explicativas y el análisis de vulnerabilidad de cada una de las poblaciones estudiadas.

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores reconocen el apoyo brindado por las siguientes instituciones y personas:

- Dirección Nacional de Defensa Civil, sus autoridades y funcionarios, entre los años 1992 a 2007.

- INOCAR, años 1992 - 1998, autoridades y funcionarios del Departamento de Ciencias del Mar, en especial al ingeniero Jorge Espinosa, por el apoyo técnico y personal en la consecución de esta investigación.
- DHA-UNDRO y sus funcionarios entre los años 1992 – 1998.
- ESPE, Facultad de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente, a sus autoridades, entre los años 2005 a 2007.

A todos ellos muchas gracias.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cruz M., Boada L. y Briceño J. **Los tsunamis en las provincias de Esmeraldas y Manabí: Impacto Ambiental y Mapas de Riesgos Potenciales.** DHA-UNDRO-DNDC - Fundación Natura. Informe no publicado, Quito, 1993.
- Diario **El Comercio**, Mayo 1996, Agosto 1998, Mayo 2005, Quito.
- Diario **El Universo**, Enero 30 de 2005 Guayaquil.
- Dirección Nacional de Turismo del Ecuador. **Listado de playas, jerarquía, características y ubicación** citado en J. Espinosa, ECU/91/004- INOCAR, 1992.
- Dirección Nacional de Turismo del Ecuador. **Sitios turísticos del Ecuador**, en “El Comercio” mayo 2006 – Quito.
- Espinosa J. **Peligros por tsunamis en las provincias de Esmeraldas y Manabí** informe técnico del proyecto ECU/91/004- INOCAR, 1992, no publicado. Guayaquil- Ecuador.
- Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, página WEB.
- Ministerio de Energía y Minas & O.E.A. **Proyecto de Análisis de Vulnerabilidad del sector Energético a los riesgos naturales de la república del Ecuador.** Informe no publicado. Archivo del Ministerio, Quito, 1992.
- Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA). **Mar Educativo: Tsunamis**, 2004.



## ANEXO 1

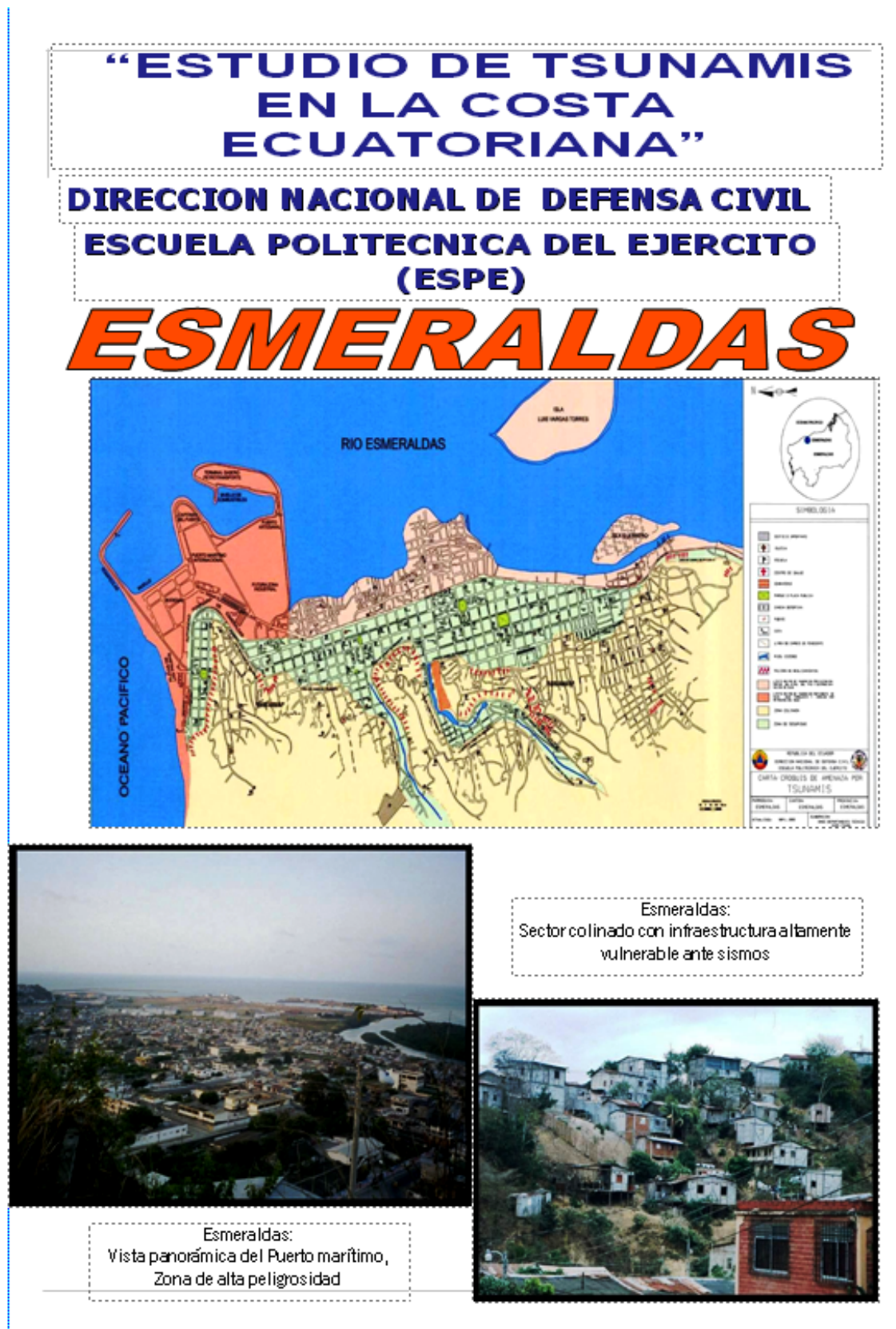
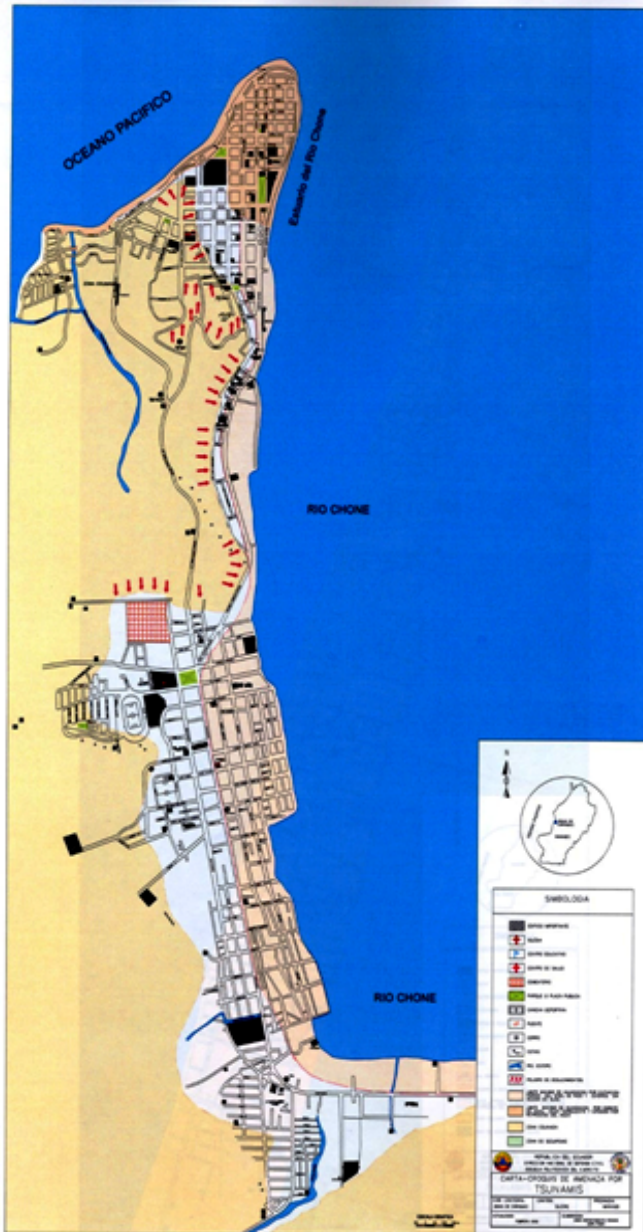


Gráfico 2: Resultados obtenidos para la ciudad de Esmeraldas

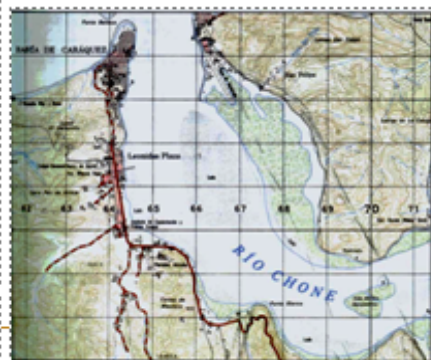
**MAPA DE AMENAZAS POR  
TSUNAMI PARA  
Bahía de  
Caráquez**



El oleaje atravesará de un lado a otro el sector plano de la ciudad, afectando gravemente la zona comprendida entre el malecón Alberto Santos y Av. Unidad Nacional, hasta las calles Montúfar y Av. Bolívar, tal como se muestra en el mapa, constituyéndose ésta como la zona de MAS ALTO RIESGO.



El área de ALTO RIESGO POR INUNDACIÓN RÁPIDA debida al efecto de dique en el río Chone se iniciaría en la Av. 5 de Noviembre y malecón Alberto Santos (Capitanía de Puerto), Av. Velasco Ibarra y a lo largo de la Av. Atahualpa hasta el sector de Leonidas Plaza.

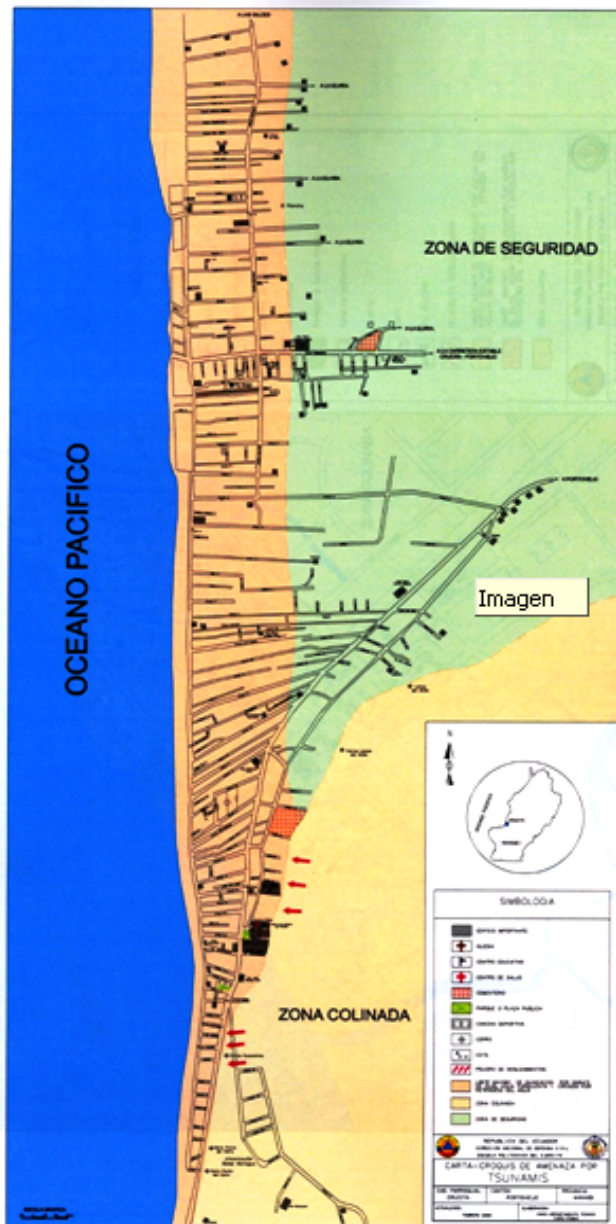


Las flechas indican taludes inestables, susceptibles a deslizarse o caer. Áreas blancas son las de menor probabilidad a sufrir daños graves.

Gráfico 3: Resultados obtenidos para Bahía de Caráquez (Manabí)



## MAPA DE AMENAZAS POR TSUNAMI PARA CRUCITA



Carta Croquis elaborada por la Dirección Nacional de Defensa Civil y la ESPE (2005).

El nivel de riesgo ES MUY ALTO para el 80% de la población que se asienta en la zona plana. Se prevé inundación y afectación severa de la infraestructura física y servicios básicos en todo el sector, a más de daños importantes causados por erosión durante el retroceso de las aguas.

Si el sismo generador ocurre muy cerca de la costa, podría activar deslizamientos, tan comunes en las laderas del sector colinado al SE.

Construcciones y demás infraestructura podría afectarse severamente por efectos de licuación de arenas, en la playa y sectores planos arenosos.



Las flechas indican taludes inestables, susceptibles a deslizarse o caer. Zonas de color verde son las de menor probabilidad a sufrir daños graves y podrían considerarse seguras ante eventos tipo tsunami.

Gráfico 4: Resultados obtenidos para Crucita (Manabí)





Gráfico 5: Resultados obtenidos para la Jaramijó (Manabí)

## MAPA DE AMENAZAS POR TSUNAMI PARA EL PUERTO DE MANTA



En el sector El Murciélago, donde las colinas terminan en acantilados de 20 metros de altura, la zona de **ALTO RIESGO** por embate de olas e inundación por agua turbulenta, está confinada al sector de la playa, en la que prácticamente no existe infraestructura física que pueda ser afectada.

Hacia el Este en cambio, la zona centro de la ciudad ocupa el área de **MUY ALTO RIESGO** por embate de olas, inundación por aguas turbulentas y erosión por refluo, incluyendo especialmente las instalaciones del Puerto Marítimo

Desde el Puerto marítimo y la Dársena, la zona de **MUY ALTO RIESGO** incluye el área turística de playa (Tarqui) y sectores planos colindantes, afectando la zona industrial, incluyendo los tanques de almacenamiento de combustibles de Petroe-



Gráfico 6: Resultados obtenidos para el Puerto de Manta (Manabí)



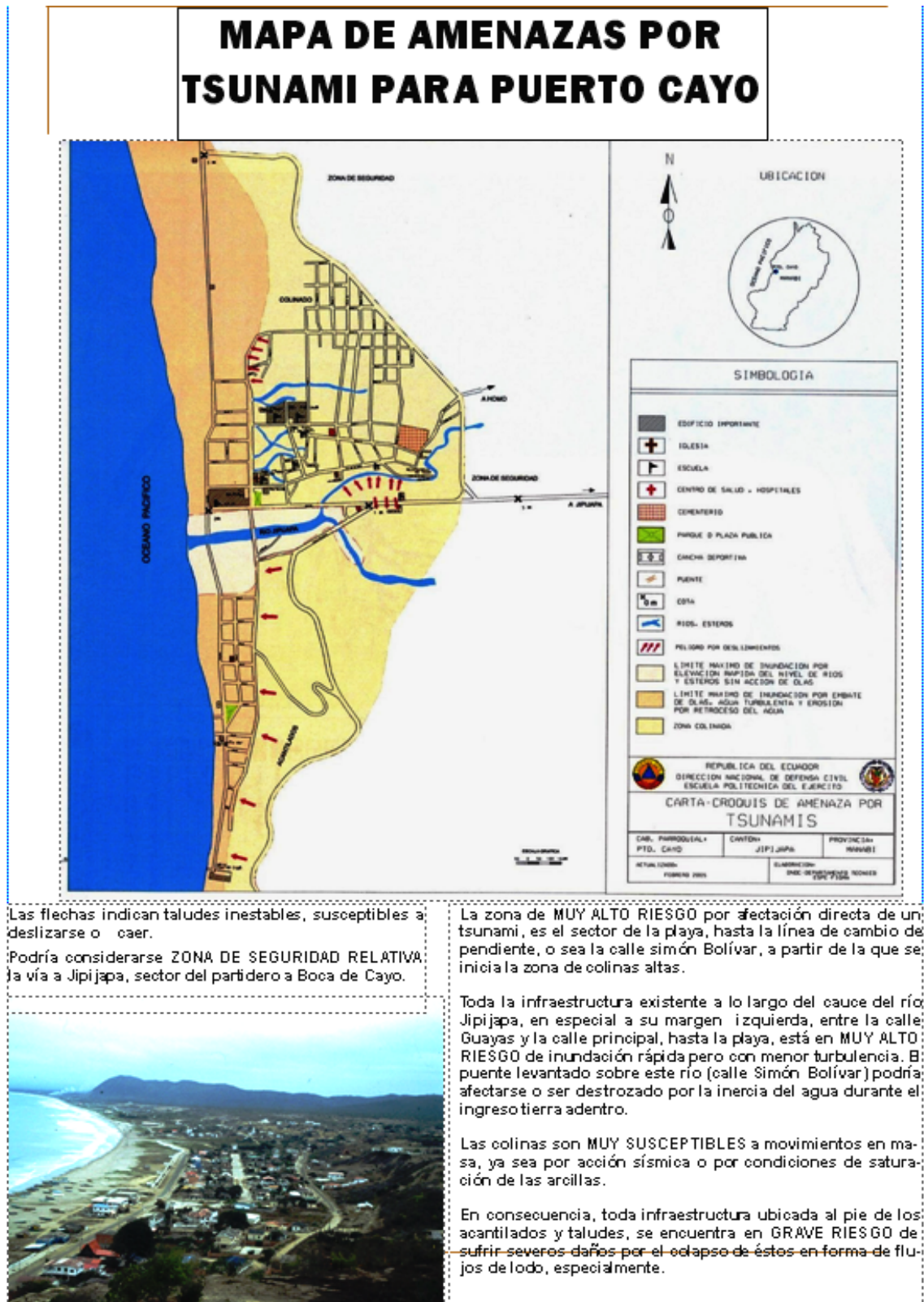


Gráfico 7: Resultados obtenidos para Puerto Cayo (Manabí)

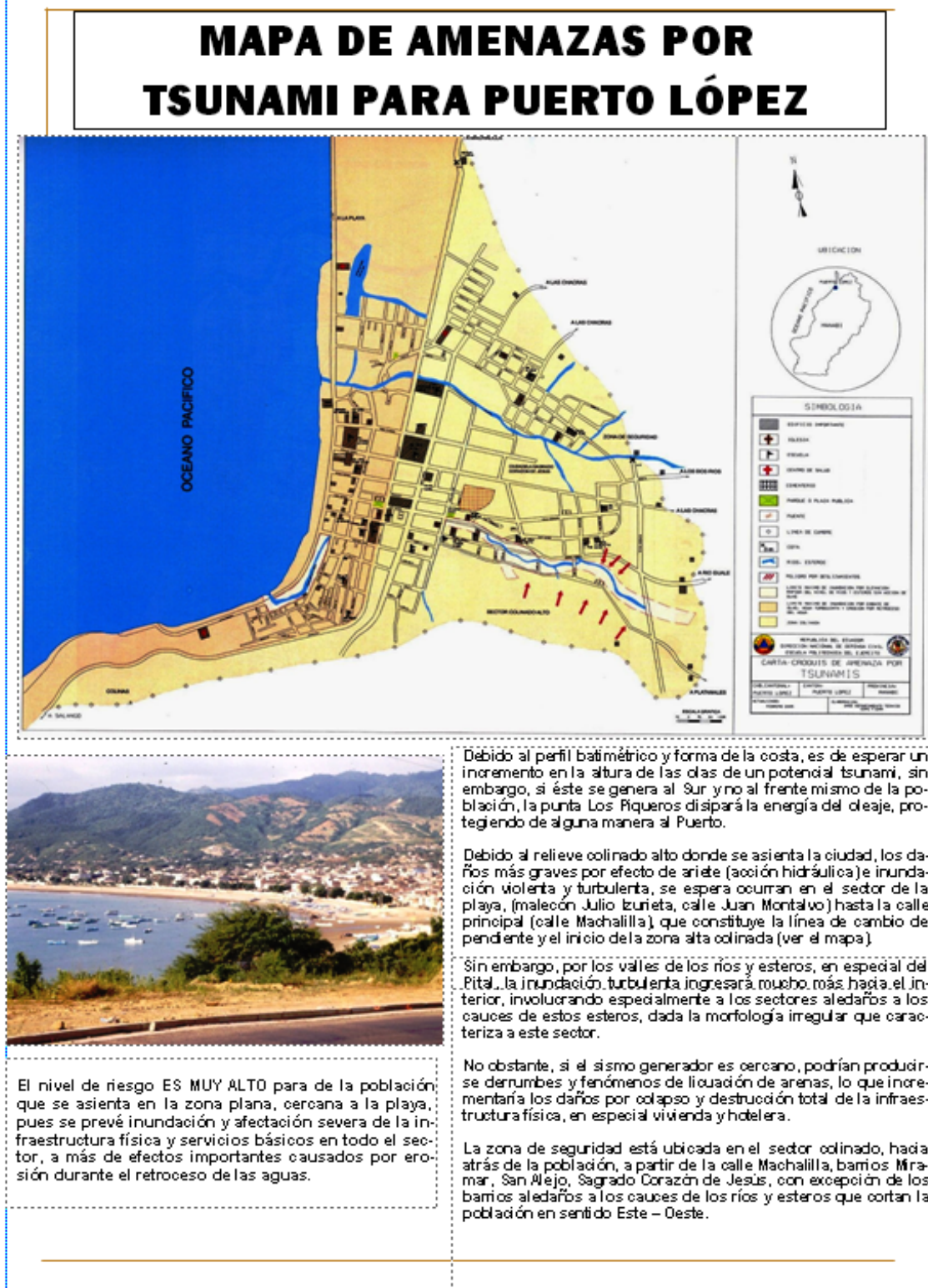


Gráfico 8: Resultados obtenidos para la Puerto López (Manabí)

## **IMPACTO AMBIENTAL EN LA PARROQUIA PACAYACU, (CANTÓN LAGO AGRIO - PROVINCIA DE SUCUMBÍOS), DESDE LA ECOLOGIA DEL PAISAJE**

**MARIO ANTONIO CRUZ D'HOWITT**

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN, CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE. ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO. Avenida El Progreso, S/N. Sangolquí – Ecuador; email: mcruz@espe.edu.ec

Recibido: 5 de abril 2010 / Aceptado: 13 de octubre 2010

### **RESUMEN**

La diversidad eco-regional, paisajística y eco-sistémica del cantón Lago Agrio y sus parroquias, es privilegiada. La parroquia Pacayacu, ubicada al Este del cantón Lago Agrio, desarrolla una importante actividad petrolera, agrícola y ganadera. En los límites con el parque nacional Cuyabeno, esta parroquia dispone de importantes reservas forestales (bosque primario), con especies como cedro rojo, canelo rojo, canelo amarillo, nogal y laurel. Desde la década de los años setenta, muchos de los obreros que inicialmente se dedicaron a las labores petroleras, fueron asentándose en los territorios aledaños a los pozos petroleros, y junto a sus familias, iniciaron un proceso sistemático de explotación de la tierra para fines agrícolas y la tala del bosque para la obtención de madera (o para la expansión de sus fronteras agrícolas), afectando cada vez mayores cantidades de bosque húmedo tropical, proceso que continúa hasta hoy, alcanzando a los límites de la reserva Cuyabeno, en el sector oriental de la parroquia Pacayacu. La colonización no planificada de los terrenos adyacentes a los campos petroleros, el uso inadecuado de la tierra con prácticas agropecuarias ancestralmente inapropiadas, la carencia de respeto por la naturaleza y por el medio ambiente en general, sumado a las labores de prospección y extracción del petróleo, ha llevado a la irreversible pérdida de la calidad visual intrínseca, del entorno inmediato y del fondo escénico de los paisajes de la región, en diferentes niveles. Este deterioro paulatino de la zona está perjudicando a la reciente industria del eco-turismo, que está tomando impulso en la región como una alternativa de sustento para las comunidades indígenas y de agricultores. Sin embargo, esta naciente industria ve con preocupación menguar paulatinamente la cantidad de visitantes poco atraídos o desencantados ante las drásticas alteraciones de las condiciones ambientales, expresadas en la degradación del paisaje en la región.

**Palabras clave.** Ecología. Ambiente. Paisaje.

### **ABSTRACT**

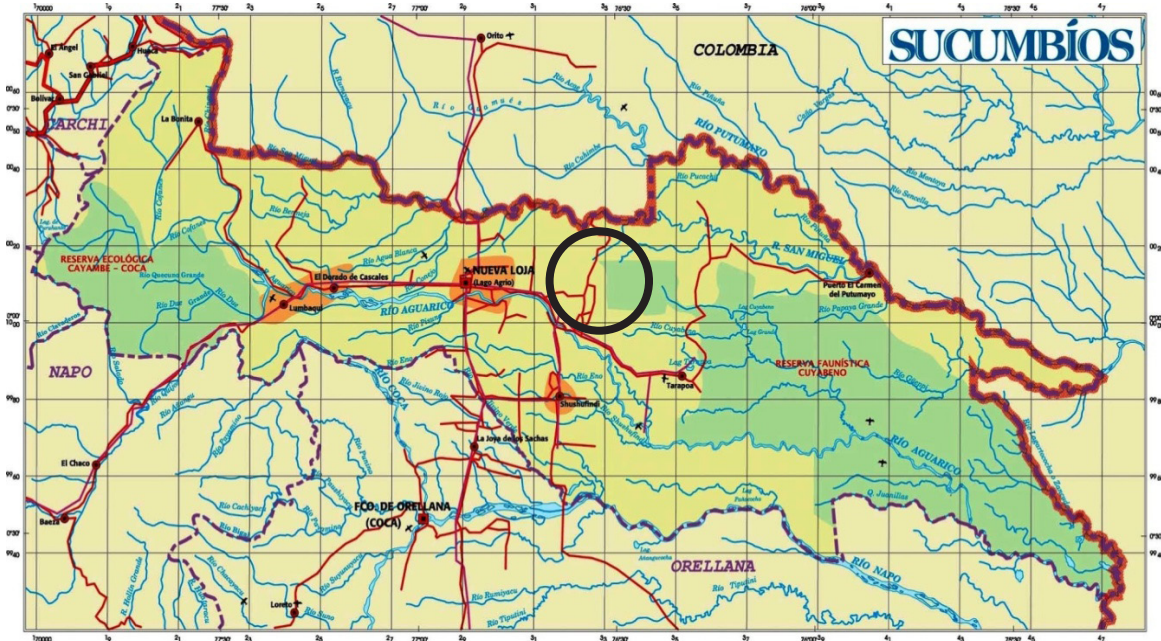
The echo-regional, landscaping and echo-systemic diversity of Lago Agrio and its parishes is privileged. The Pacayacu parish, located to the East of Lago Agrio, develops an important oil, agricultural and cattle activity. In the limits with the Cuyabeno national park, this parish has important forest reserves (primary rain forest), with species like red cinnamon cedar, yellow cinnamon, walnut and laurel. From the decade of the Seventies, many of the workers who initially dedicated themselves to the oil workings, went being becoming in the territories bordering to oil wells with their families and initiated a systematic process of land use for agricultural aims and cutting the forest for the wood obtaining (or to allow the expansion of its agricultural borders), affecting every time majors amounts of tropical humid forest, process that continue today, reaching to the limits of the Cuyabeno national park, in the Eastern sector of the investigated area. The no planned colonization of adjacent lands to the oil fields, the inadequate land use with ancestrally unsuitable farming practices, the deficiency of respect by the nature and the environment, added to the workings of prospection and extraction of petroleum, has taken to the irreversible loss of the intrinsic visual quality, the immediate surroundings and the scenic bottom of the landscapes of the region, at different levels. This gradual deterioration of the zone is harming the recent industry of the eco-tourism, which is taking impulse in the region as an alternative work source for the indigenous and agriculturists communities. Nevertheless, this rising industry sees with preoccupation diminish the amount of visitors little attracted or disillusioned before the drastic alterations of the environmental conditions, expressed in the degradation of the landscapes in this area.

**Key words.** Ecology. Enviromental. Landscape.



## 1. INTRODUCCIÓN

El área investigada se encuentra al Norte de la provincia de Sucumbíos e involucra los sectores de Pacayacu, la “Y” de Harber, Estación Secoya de Petroproducción, San Vicente, Pre-Cooperativa Secoya N°. 1, Campamento Cooper (control Militar), Pre-Cooperativa Juan Montalvo y Pre-Cooperativa San Juan de Pózul, a lo largo de la vía Pacayacu – San Miguel, en la frontera colombo – ecuatoriana, (Gráfico 1).



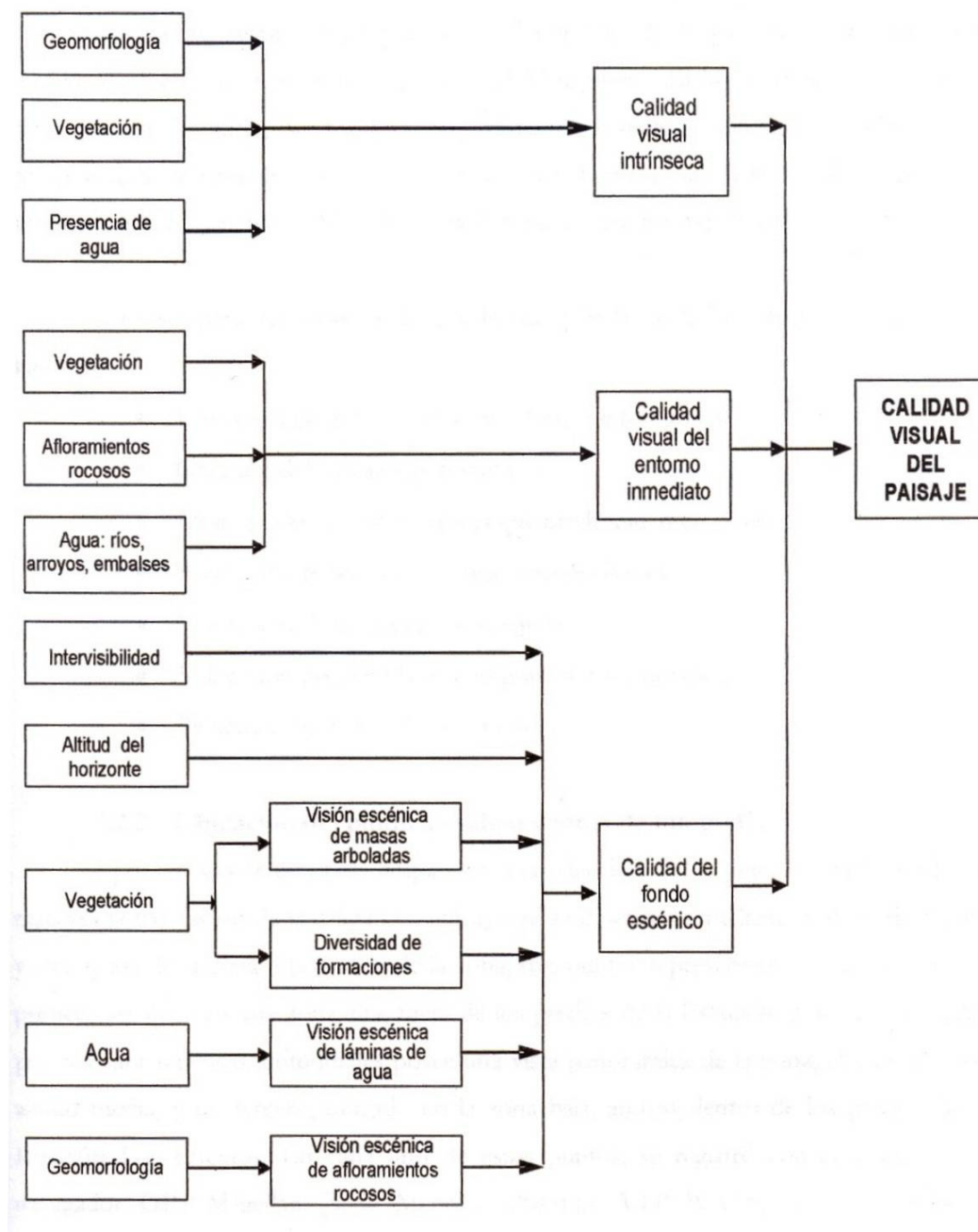
**Gráfico 1.** Ubicación del área de estudio (círculo)

La provincia, cuya ciudad más importante y capital es Nueva Loja (Lago Agrio), inicialmente habitada por las nacionalidades amazónicas Cofán, Siona y Secoya, comenzó a poblarse en la década de 1960 con la instalación del campamento petrolero Lago Agrio de la compañía TEXACO. A este sector afluyeron colonos provenientes de las provincias de la Sierra, especialmente de Loja y del Tungurahua para trabajar en las empresas petroleras. Desde esa época, la actividad más importante que se desarrolla en el cantón Lago Agrio ha sido la explotación de petróleo, (a pesar de existir evidencias de oro y plata), seguida de la agrícola: el escaso suelo produce café, cacao, plátano, yuca y palma africana.

En la parroquia Pacayacu, ubicada al Este del cantón Lago Agrio, se desarrolla una importante actividad petrolera, agrícola y ganadera. Es el sector donde se explotan las grandes reservas de petróleo del campo Libertador, que a su vez abarca varias estructuras petroleras muy productivas como Pacayacu, Shuara, Shushuqui y Secoya. En los límites con el cantón Cuyabeno esta parroquia dispone de importantes reservas forestales (bosque primario), con especies como cedro rojo, canelo rojo, canelo amarillo, nogal y laurel. Por estas razones se la seleccionó para realizar un estudio sobre la calidad actual del paisaje y su tendencia a futuro.

## 2. METODOLOGÍA

El proceso seguido para la obtención de la calidad visual del paisaje se fundamenta en el análisis de variables macro-estructurales, (clima, condiciones geológicas), y meso-estructurales del paisaje, (cobertura vegetal, geomorfología, suelos, cuerpos de agua, actividad antrópica), y se resume en el siguiente diagrama (1):



**Diagrama 1.** Proceso seguido para la determinación de la calidad total del paisaje

### 3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La diversidad eco-regional, paisajística y eco-sistémica del cantón Lago Agrio y sus parroquias, es privilegiada. Paradójicamente es uno de los cantones orientales que tiene la más alta tasa de deforestación del país. Muchos de sus bosques naturales han desaparecido y no han sido reemplazados. A partir de la década de los años setenta, la deforestación se aceleró en el cantón debido al inicio de las actividades de prospección y explotación de petróleo: se talaron y adecuaron tres hectáreas de bosque primario por cada pozo a perforarse y se impactaron 15 hectáreas adicionales por pozo para extraer la madera requerida en la construcción de las vías de acceso a las plataformas, (Carrere R. 1997).

Concomitantemente, muchos de los obreros que inicialmente se dedicaron a las labores petroleras fueron asentándose en los territorios aledaños a los pozos perforados y, junto a sus familias, iniciaron un proceso sistemático de explotación de la tierra para fines agrícolas y de tala del bosque para la obtención de madera (o para la expansión de sus fronteras agrícolas), afectando cada vez mayores cantidades de bosque húmedo tropical, proceso que continúa hasta hoy, alcanzando los límites de la reserva Cuyabeno, en el sector oriental de la parroquia Pacayacu, (Foto 1).



**Foto 1.** El sector oriental de la parroquia Pacayacu limita con la reserva “Cuyabeno” (letrero en vía de acceso pozo Pacayacu 5).

Con la disminución de las áreas boscosas están ocurriendo procesos erosión genética, es decir, hay una visible disminución de la diversidad de especies vegetales, otrora abundantes en la zona. Por tanto, la deforestación ha reducido la biodiversidad en los niveles genético, de especies y de ecosistemas, porque está destruyendo los hábitats de muchas especies que están estrechamente vinculadas a ecosistemas específicos.

Finalmente, la industria petrolera ha introducido un impacto ambiental adicional, que es la alteración de la geomorfología natural en su afán de adecuar y preparar el terreno para las



plataformas petroleras (y la construcción de sus respectivos caminos de acceso), a partir de las cuales se inicia la perforación de pozos y la posterior explotación del petróleo, (Foto 2).



**Foto 2.** Alteración de la geomorfología natural y explotación de madera, (círculo), en la plataforma del pozo petrolero “Pacayacu 5”, que limita con la zona de reserva “Cuyabeno”.

La suma de los factores anteriores ha llevado a un proceso acelerado de deterioro de la calidad total del paisaje, que conjuntamente con la desaparición del bosque nativo y la contaminación del agua, constituye uno de los impactos ambientales más significativos en la parroquia Pacayacu.

#### 4. SITUACIÓN ACTUAL

Como se indicó, la actividad petrolera demandó de mano de obra calificada y no calificada. En la década de los años setenta los obreros de la industria del petróleo comenzaron a establecerse en los alrededores de las plataformas petroleras conjuntamente con sus familias, iniciándose así un éxodo paulatino, especialmente de las provincias australes del Ecuador, hacia lo que hoy son los territorios del cantón Lago Agrio (actualmente Nueva Loja).

La colonización no planificada de los terrenos adyacentes a los campos petroleros, (Foto 3), el uso inadecuado de la tierra con prácticas agropecuarias ancestralmente inapropiadas, (Foto 4), la carencia de respeto por la naturaleza y por el medio ambiente en general, sumado a las labores de prospección y extracción del petróleo, ha llevado a la irreversible pérdida de la calidad visual intrínseca, del entorno inmediato y del fondo escénico de los paisajes de la región, en diferentes niveles, (Foto 5).

La total despreocupación por la naturaleza se manifiesta en la forma de vida de los agricultores de la zona, ajenos a toda inquietud que no sea la de obtener beneficios a partir de la sobreexplotación de la tierra y del bosque circundante (Foto 6). La de la industria petrolera se manifiesta en la continua agresión al paisaje mediante grandes movimientos de tierras y tala de los remanentes de bosque para adecuar las condiciones naturales a sus necesidades, (Fotos 7 y 8), además de frecuentes derrames que contaminan el suelo y el agua.



**Foto 3.** Colonización no planificada de los terrenos adyacentes a los campos petroleros, (finca Sr. Carlos Varela, sector de la pre-cooperativa Juan Montalvo).



**Foto 4.** Uso inadecuado de la tierra con prácticas agropecuarias ancestralmente inapropiadas (Pre-cooperativa Juan Montalvo).





**Foto 5.** Pérdida de la calidad visual intrínseca y del entorno inmediato del Paisaje. Ejemplo: sectores aledaños al pozo petrolero Secoya 26.



**Foto 6.** Afectación de la calidad intrínseca del paisaje y del entorno y fondo escénico, debido a la sobre-explotación de la tierra y del bosque circundante, (ingreso al pozo Pacayacu 5).

---





**Foto 7.** Agresión al paisaje por excesivo movimiento de tierras y tala del bosque, para adecuar las condiciones naturales a las necesidades de la industria petrolera. (Depósito de ripios, zona adyacente al pozo Secoya 26).

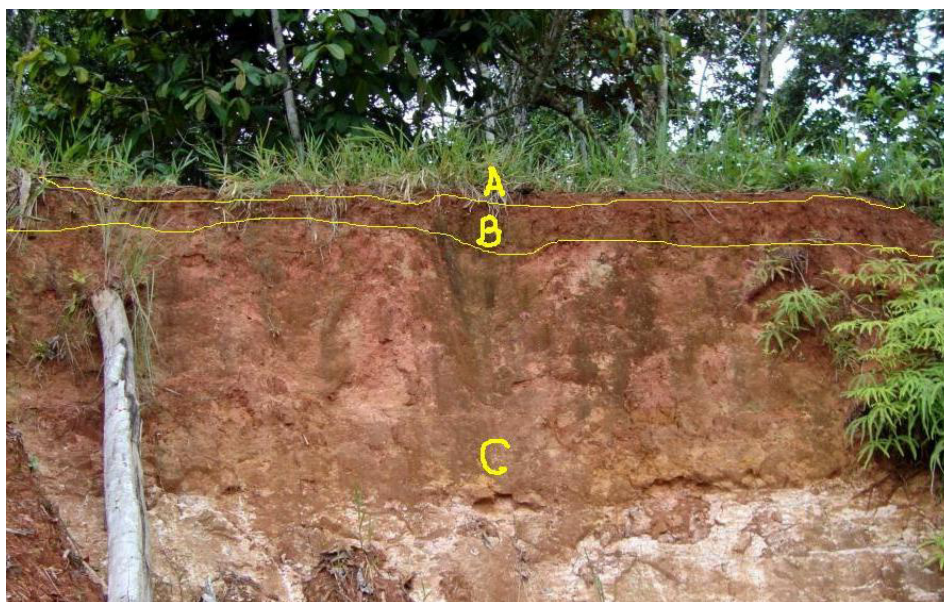


**Foto 8.** Degradación ambiental (y paisajística), por movimientos de tierra, destrucción del bosque y contaminación de fuentes de agua, (círculo).  
(sector aledaño al pozo Secoya 26).

## 5. IMPLICACIONES AMBIENTALES

La agresiva deforestación en el cantón Pacayacu está ocasionando el empobrecimiento paulatino del suelo por agotamiento de los nutrientes (horizonte “A” o capa húmica) y la micro flora y fauna de la capa superficial del suelo. En general, el horizonte “A” está muy poco desarrollado en los suelos de la región oriental, llegando a tener espesores de unos cuantos centímetros, (Foto 9). Este horizonte se regenera a partir de la biodegradación de la misma materia orgánica vegetal y animal (hojas, tallos, troncos, etc. que caen y se descomponen en el suelo del bosque). Al desaparecer la cobertura vegetal, los nutrientes se agotan rápidamente, empobreciendo el suelo; consecuentemente los agricultores se ven en la necesidad de utilizar agroquímicos para mantener la productividad, mismos que, bajo la acción de las aguas pluviales, contaminan las aguas de ríos y esteros con elementos peligrosos para la salud humana.

Además, con la desaparición de grandes extensiones de bosque primario están ocurriendo también procesos erosión genética, es decir, hay una visible disminución de la diversidad de especies vegetales, otrora abundantes en la zona. Este impacto se hace evidente en los pastizales recientes, en donde han quedado esporádicos árboles nativos, como evidencias de la otrora riqueza forestal y biótica, (foto 10). Adicionalmente, las plantaciones de especies exóticas tienen características de monocultivos, (cultivos de palma, palmito, cacao, maíz), llegando a ocasionar “desiertos ecológicos”, es decir lugares donde la biodiversidad animal y vegetal es mínima (Foto 11).



**Foto 9.** Perfil del suelo en la zona investigada: horizonte “A” de muy poco espesor. Horizonte “B” de 30 cm. seguido del horizonte “C” o roca madre. (Foto pozo Pacayacu 5).





**Foto 10.** Árbol nativo, único representante de la otrora riqueza forestal y biótica del bosque primario.



**Foto 11.** Monocultivos de pasto y maíz: “desiertos ecológicos” o lugares donde la biodiversidad animal y vegetal es mínima.

Las especies cuyo hábitat todavía no está muy intervenido, podrían estar eventualmente en peligro de desaparecer debido a la simplificación de sus ecosistemas, es decir, las zonas de selva que quedan como relictos, podrían no contener todos los recursos que necesitan para sobrevivir.

Con la disminución de las áreas boscosas se ha reducido, evidentemente, la evapotranspiración y consecuentemente la humedad atmosférica, produciendo inestabilidades climáticas todavía no muy acentuadas en la zona; sin embargo ya son notorias las modificaciones en el clima (se han alterado los períodos de lluvia y sequía).

En conclusión, este deterioro paulatino de la zona está perjudicando a la reciente industria del eco-turismo, que está tomando impulso en la región como una alternativa de sustento para las comunidades indígenas y de agricultores. Sin embargo, esta naciente industria ve con preocupación menguar paulatinamente la cantidad de visitantes poco atraídos o desencantados ante las drásticas alteraciones de las condiciones ambientales, expresadas en la degradación del paisaje en la parroquia, (Foto 12).



**Foto 12.** Deterioro paulatino del paisaje en la parroquia Pacayacu. (Amanecer en una finca aledaña a la “Y” de Harber).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baby, P., & Rivadeneira, M. **La cuenca Oriente: Geología y Petróleo** Editorial PETROECUADOR - IRD Quito, 2004
- BGS – CODIGEM. **“Mapa Geológico de la República del Ecuador”**, escala 1: 1000.000. Edición IGM, Quito, 1990.
- Carrere Ricardo. Deforestacion y Monocultivos en el Ecuador: Las venas siguen abiertas. **Revista del Sur**, Third World Network, Instituto del Tercer Mundo. No. 67-Mayo 1997. Montevideo, Uruguay.
- Cruz, M. Deforestación en el cantón La Joya de los Sachas, (provincia de Orellana), y sus implicaciones ambientales. **Revista Geoespacial N° 5**. Editorial ESPE, Sangolquí, 2008.
- Martínez Esperanza. Impactos ambientales de la típica actividad petrolera: **Revista Amazonía por la vida**. Martínez E. y Bravo, E. Quito, Ecuador. Acción Ecológica, 1994.

# IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA COMO UNA HERRAMIENTA PARA EL MONITOREO DEL RETROCESO DE GLACIARES DEL NEVADO ANTIZANA. ESTUDIO DE CASO: GLACIARES 12, 15 Y CUENCA DEL RÍO ANTIZANA.

**IVAN A. MEDINA; MARIO A. CRUZ D' HOWITT; JANISSE G. ROMERO**

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE, DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN, ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO. Av. El Progreso s/n, Campus Politécnico, Sangolquí – Ecuador; email: imedina@espe.edu.ec; mcruz@espe.edu.ec; janisse.romero@gmail.es

Recibido: 19 de febrero 2010 / Aceptado: 15 de octubre 2010

## RESUMEN

El Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD) y el Proyecto “Glaciares – Ecuador” han monitoreado el volcán Antizana y sus cuencas aledañas desde 1995. Sin embargo, la información obtenida durante los años de estudio no se registró de manera ordenada por lo que se la reclasificó y sistematizó a fin de integrarla dentro de una geodatabase para generar el Sistema de Información Geográfica (SIG), adecuado a esta investigación. La información obtenida está representada sobre cartografía a escala 1:50.000, en sistema de referencia WGS-84, proyección UTM, zona 17 Sur. Este sistema integra información sobre los estudios del monitoreo anual de glaciares, ubicación de estaciones de medición y delimitación de micro cuencas. Adicionalmente se personalizó una barra de herramientas para consulta, con botones propios del software *ArcGis 9.3* y otros generados mediante programación de *ArcObjects* (lenguaje Visual Basic), lo cual permite acceder a la información de las bases de datos alfanuméricas de Access. Por medio de la herramienta *Model Builder* se desarrolló un modelo que permite integrar herramientas para simplificar el proceso de cálculo de Rangos Altitudinales de contornos de glaciar. Como fase final se realizó un análisis multitemporal de la zona de ablación del glaciar Antizana y se obtuvo mapas y tablas que muestran las variaciones del hielo durante los años de monitoreo.

**Palabras clave.** Glaciar. SIG. Geodatabase.

## ABSTRACT

From 1995, the Development Investigation Institute (IRD) and Glaciers Project-Ecuador have monitored Antizana volcano and its surrounding basins. Obtained data through the monitoring years was incorrectly classified. Alphanumeric and geographical information was gathered, ordered and integrated into a geodatabase to generate a Geographic Information System (GIS), ruled by national and international standards. Whole information is representing on 1:50.000 cartography, in WGS-84 reference system, UTM projection, and South 17 area. Inside the system, information like studies of the annual monitoring of the glaciers, measurement stations location and watershed delimitation was stored. A consultation toolbar was also personalized containing buttons characteristic of *ArcGis* and others generated by *ArcObjects* code (Visual Basic language), and it allows to access to MS Access alphanumeric information databases. By using *Model Builder*, a model was developed. In order to integrate tools from *ArcToolbox* and simplify altitude ranges calculating process of glacier outlines. In addition, a multitemporal analysis of the glacier ablation area was carried out, from which it was possible to obtain maps and charts showing the glacier behavior during the monitoring years.

**Key words.** Glacier. SIG. Geodatabase



## 1. INTRODUCCIÓN

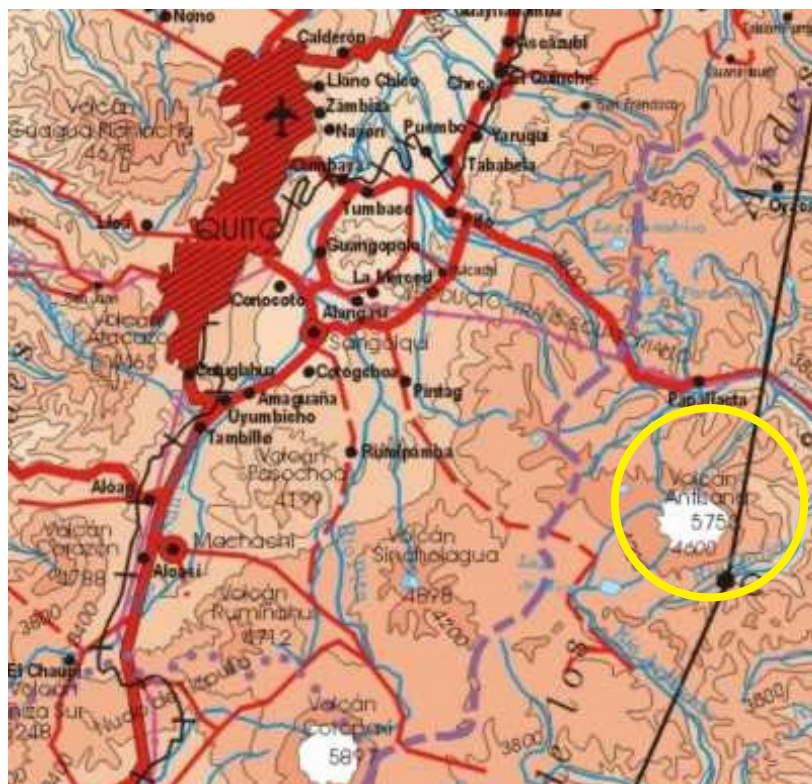
En la actualidad, los glaciares tropicales representan el mejor indicador de cómo afecta la variabilidad climática al ambiente. Es por esta razón que se ha visto necesario monitorear los glaciares y sus cuencas aledañas para contar con información sobre su comportamiento.

Para obtener conclusiones confiables, el monitoreo de los glaciares se centra en definir los siguientes tres parámetros fundamentales: 1) la variación climática, 2) la variación de los recursos hídricos disponibles para el abastecimiento de agua a diferentes poblados y ciudades, y 3) el peligro de ocurrencia de lahares por desagüe violento de lagunas glaciares.

El (IRD) y su Proyecto Glaciares – Ecuador en conjunto con Instituciones como el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EMAAP-Q) y la Escuela Politécnica Nacional (EPN), han realizado estudios sobre el retroceso de glaciares obteniendo datos geográficos y alfanuméricos que, en este proyecto, fue necesario integrarlos en un Sistema de Información Geográfica (SIG), para facilidad de manejo.

## 2. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

El Volcán Antizana se encuentra ubicado en el límite de las provincias de Pichincha y Napo, en la Cordillera Real, a  $0^{\circ} 28' S$  y  $78^{\circ} 08' W$ , a 40 kilómetros al Este de la ciudad de Quito, capital del Ecuador. (Figura. 1)



Fuente: IGM – Mapa Físico del Ecuador, 1980

**Figura 1.** Localización Geográfica Volcán Antizana

### 3. MARCO TEÓRICO

#### *Glaciar*

Es una masa de hielo compuesta de nieve compactada y cristalizada que fluye por su propio peso sobre una superficie; este movimiento no es perceptible, pero puede ser comprobado mediante mediciones de precisión.

#### **Glaciares de valle o alpinos**

Son los más frecuentes. Su dimensión es mucho menor que los glaciares continentales y su formación se da en las zonas montañosas altas. Estos glaciares son corrientes de hielo que se deslizan valle abajo lentamente (Figura. 2.).



Fuente: Proyecto Glaciares – IRD – INAMHI – EMAAP-Q

Foto 1. Glaciar 15 lenguas  $\alpha$  y  $\beta$  del volcán Antizana

#### *Balance de masa del glaciar*

Es "...la ganancia o pérdida neta anual de nieve en agua equivalente para todo el cuerpo de hielo..."<sup>3</sup>

#### *Zonas del Glaciar*

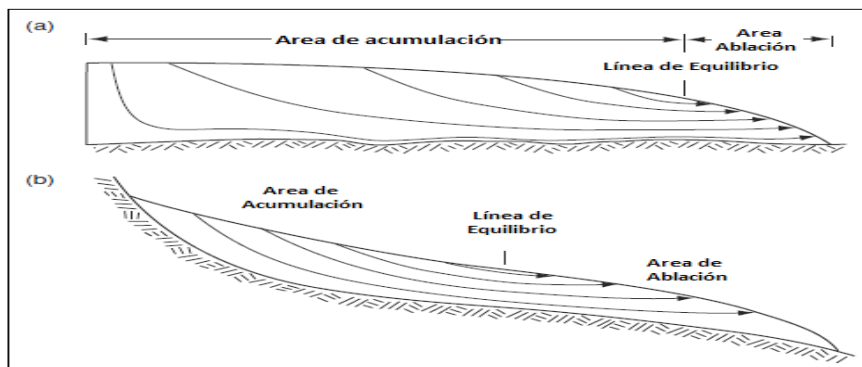


Figura 2. Área del Glaciar

<sup>3</sup> Balance de masa glaciológico y condiciones regionales de nieve en el norte chico: interacción con el clima y su influencia en el deshielo.

### **Área de acumulación**

Es la parte más alta del glaciar, dónde la acumulación neta de nieve se produce debida a que durante la época fría la caída de nieve es mucho mayor que la fusión de la misma durante el verano.

### **Área de Ablación**

En las partes de menor altura el hielo tiende a moverse por acción de la gravedad y llega a zonas donde se produce mayor fusión anual que caída de nieve durante sus respectivas estaciones para producir una pérdida neta.

### **Línea de Equilibrio**

Es la línea que divide estas las dos áreas anteriores. En este punto la fusión total al final del verano va a ser equivalente a la caída de nieve al final del invierno. Este límite varía de año a año.

### **Baliza**

Se forma de seis estacas, cada una de 2 metros de longitud, colocadas una sobre otra y numeradas ascendentemente desde su base en el hielo, (Foto.2). Los datos necesarios para calcular el balance de masa anual son el número de estaca en la que se encuentra la nieve/hielo (tramo), la emergencia (porción de estaca que sobresale del hielo), el espesor total de la nieve que se acumula sobre la capa de hielo y las densidades del hielo y de la nieve.



Fuente: Proyecto Glaciares – IRD – INAMHI – EMAAP-Q

**Foto 2.** Baliza - Toma de datos mensual

#### 4. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN (Diagrama 1)

##### 4.1. RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN

En esta fase fue necesario familiarizarse con la información que se maneja dentro del proyecto, conocer los procesos que realiza para su obtención, como y quien la maneja y para qué la utilizan.

Se puede conocer que existían dos bases de datos que albergaban la información alfanumérica y que los datos geográficos se los representaba mediante un Sistema CAD.

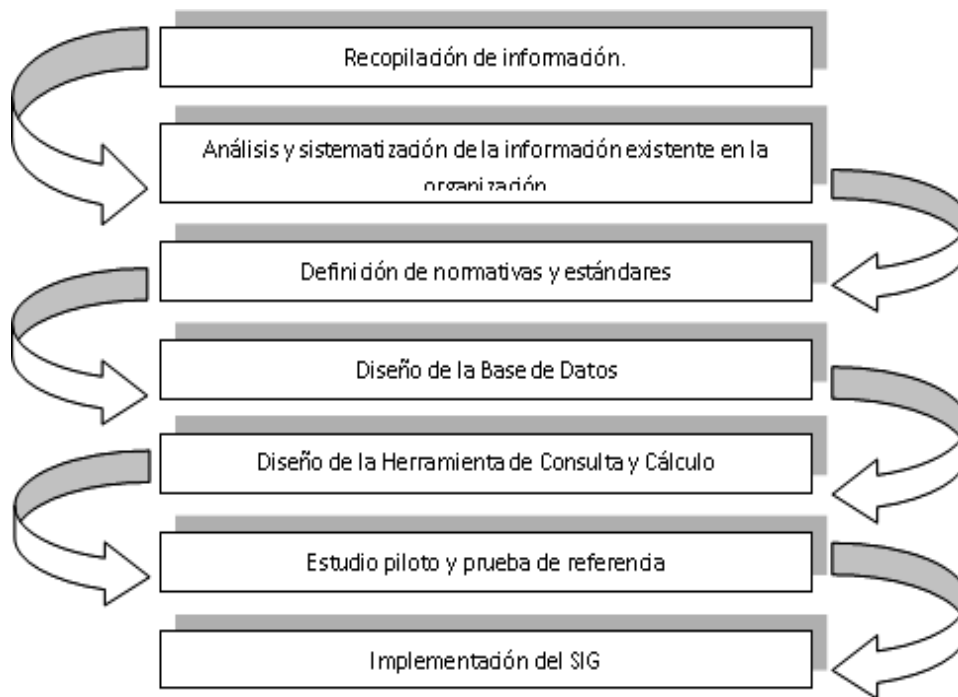


Diagrama 1: Diseño de la investigación

##### 4.2. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Al analizar la información geográfica existente se pudo observar que existían varios errores en cuanto a manipulación y duplicación por lo que fue necesario acudir a la fuente primaria y obtener datos correctos.

##### 4.3. DEFINICIÓN DE NORMATIVA Y ESTÁNDARES

Fue necesario aplicar las normativas ISO<sup>4</sup> referentes al manejo de información geográfica digital. La gran familia ISO 19100 permite normar la información geográfica en los ámbitos de Catálogo de Objetos DIGEST<sup>5</sup> (ISO 19110) y Generación de Metadatos (ISO 19115 y 19139). El catálogo de datos que se obtuvo para el proyecto se detalla en Tabla. 1.

<sup>4</sup> Organización de Estandarización Internacional

<sup>5</sup> Norma de Intercambio de Información Geográfica Digital

#### 4.4. DISEÑO DE LA BASE DE DATOS Y DE LA HERRAMIENTA DE CONSULTA Y CÁLCULO

En esta fase se obtuvo el diseño conceptual (representación de la realidad mediante diagramas), lógico (diseño de las tablas con sus relaciones), y físico (implementación del sistema y la herramienta). Estos tres modelos se los puede observar en la Figura. 3.

Tabla. 1: Catálogo de Objetos para el SIG\_GREATICE

Categoría	Código	Subcategoría	Código	Entidad	Código	Tipo información
<b>CULTURA</b>	A	Misceláneos	L	Poblados	AL105	Vector/Punto
		Transportación / Carreteras	P	Vías	AP030	Vector/Línea
<b>HIDROLOGÍA</b>	B	Cuerpos de Agua	H	Lago / Laguna	BH080	Vector/Polígono
				Río Doble	BH142	Vector/Polígono
				Río / Torrente	BH140	Vector/Línea
				Embalse	BH132	Vector/Polígono
				Zanja / Acequia	BH030	Vector/Línea
		Nieve / Hielo	J	Glaciar	BJ030	Vector/Polígono
Drenaje*	L	Cuenca	BL010	Vector/Polígono		
<b>CARTOGRAFIA</b>	C	Hipsografía	A	Curva de Nivel	CA010	Vector/Línea
		Área de Estudio*	B	Límite	CB010	Vector/Polígono
<b>FISIOGRAFIA</b>	D	Formas del Terreno	B	Loma / Colina	DB031	Vector/Punto
<b>DEMARCACIÓN</b>	F	Límites Hidrográficos	C	Contorno de Glaciar*	FC180	Vector/Polígono
<b>BALANCE DE MASA*</b>	J	Monitoreo del Glaciar	A	Balizas	JA010	Vector/Punto
		Rangos Altitudinales	B	Área Parcial	JB010	Vector/Polígono
<b>HIDRO – METEOROLOGÍA*</b>	K	Estaciones de Medición	A	Estación Automática/ Aforos	KA010	Vector/Punto

#### 4.3. DISEÑO DE LA HERRAMIENTA

La herramienta de consulta se desarrolló en Visual Basic 6, en la que se programó una interface que permite hacer consultas, desde el SIG hacia las bases de datos alfanuméricas. Esta interface posee filtros que permiten tener información específica tanto de balances de masa como de estaciones totales.

En la Figura. 4 se muestran los procesos de programación realizados.



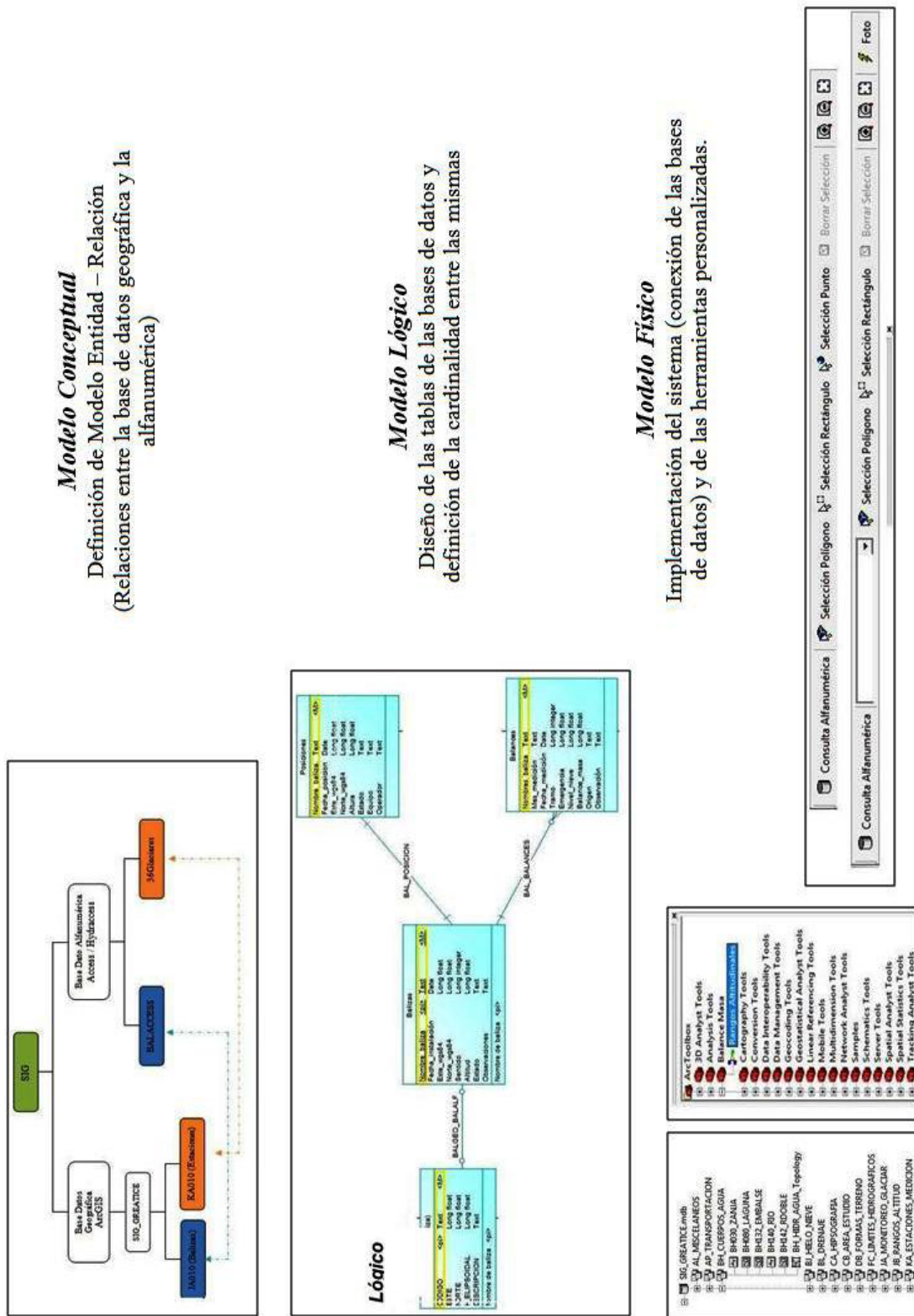


Figura 3: Modelos obtenidos

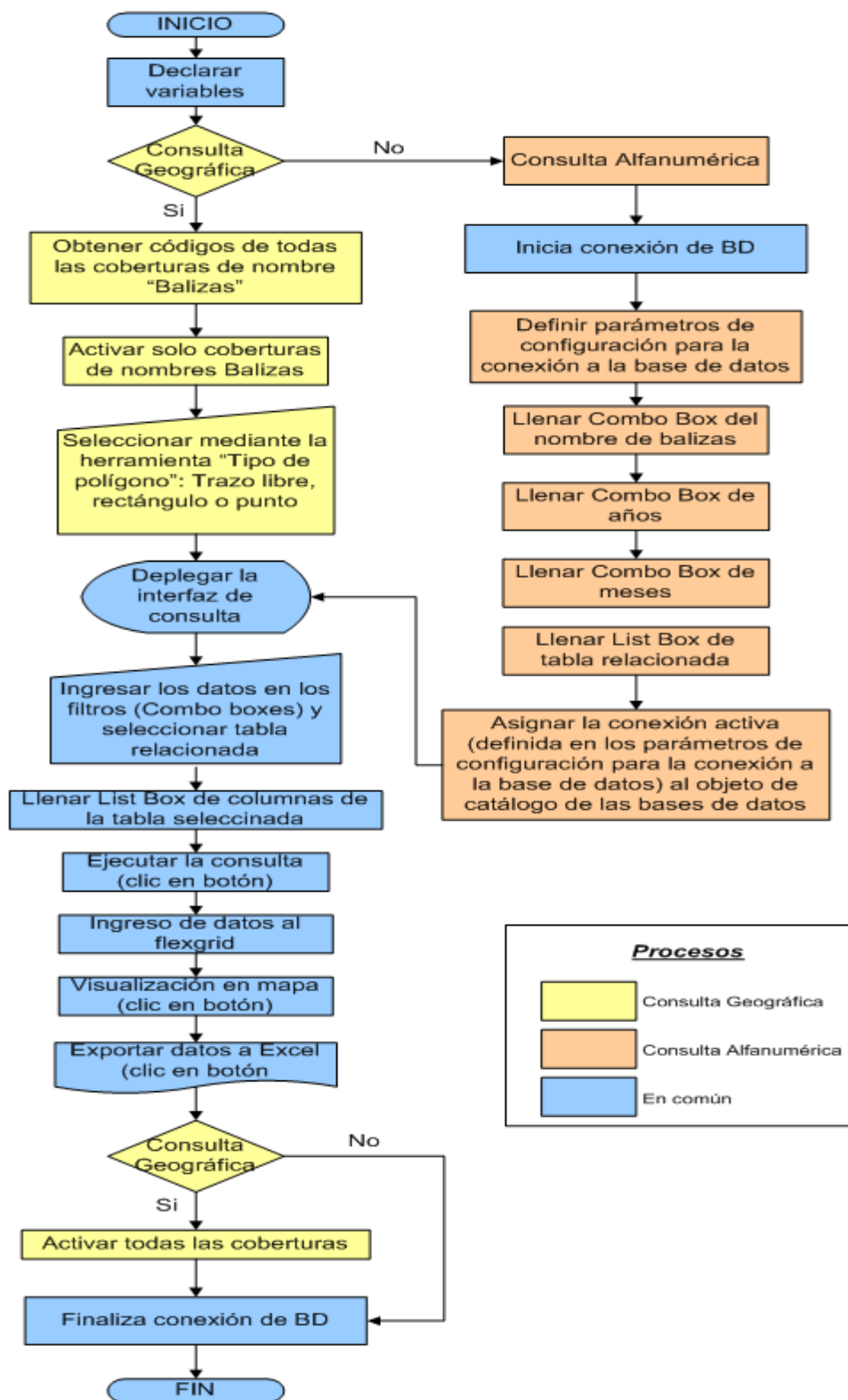
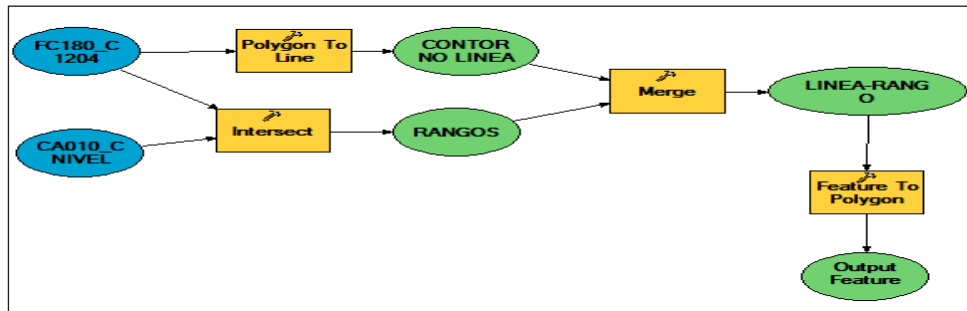


Figura 4. Diagrama de flujo de la programación de la herramienta de consulta

En cuanto a la herramienta de cálculo, se la desarrolló en *Model Builder*, herramienta de ArcInfo, en la que se integró varios procesos, (Figura. 5), para obtener una nueva herramienta de *ArcToolbox*, que permite calcular áreas parciales (Rangos Altitudinales),

de los contornos de glaciación, los cuales son necesarios para el análisis anual de balance de masas.



**Figura 5.** Diagrama de integración de procesos de la herramienta de cálculo

#### 4.4. ESTUDIO PILOTO

Se realizó una capacitación al personal, (Foto 3) encargado del manejo de la información. El curso dictado mostraba la utilización correcta de los manuales: técnico y de usuario, para el ingreso de información nueva y la utilización de las herramientas.



**Foto 3:** Curso de manejo del SIG\_GREATICE

Como resultado se obtuvo que la organización de la información dentro de la geodatabase cumplía con los requerimientos de los usuarios y de la misma forma el funcionamiento de las herramientas.

Como resultado de capacitación se obtuvo una mapa, (Figura 6) con la información definida por el usuario, además de obtener resultados desde las bases de datos alfanuméricas (Figura 7).



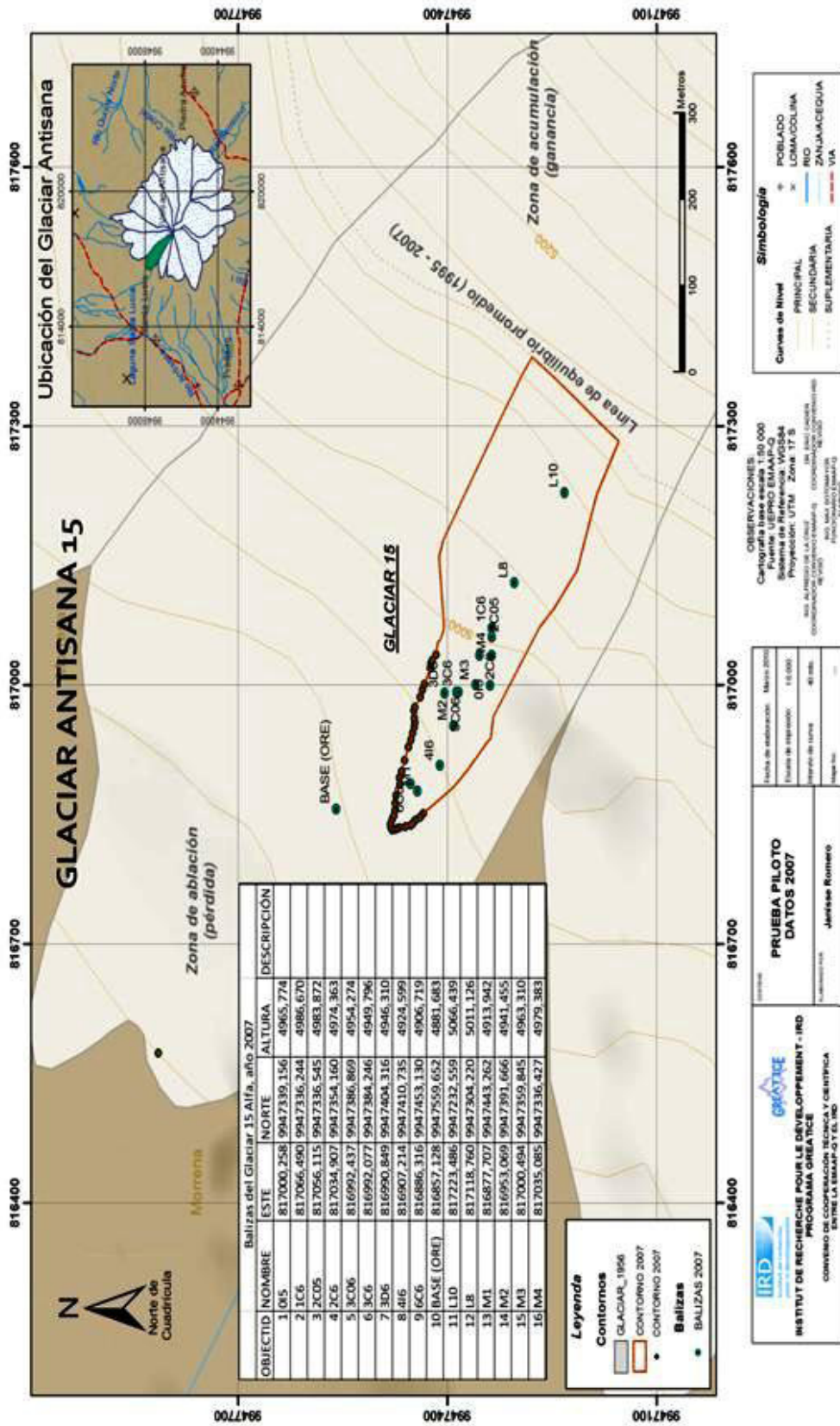
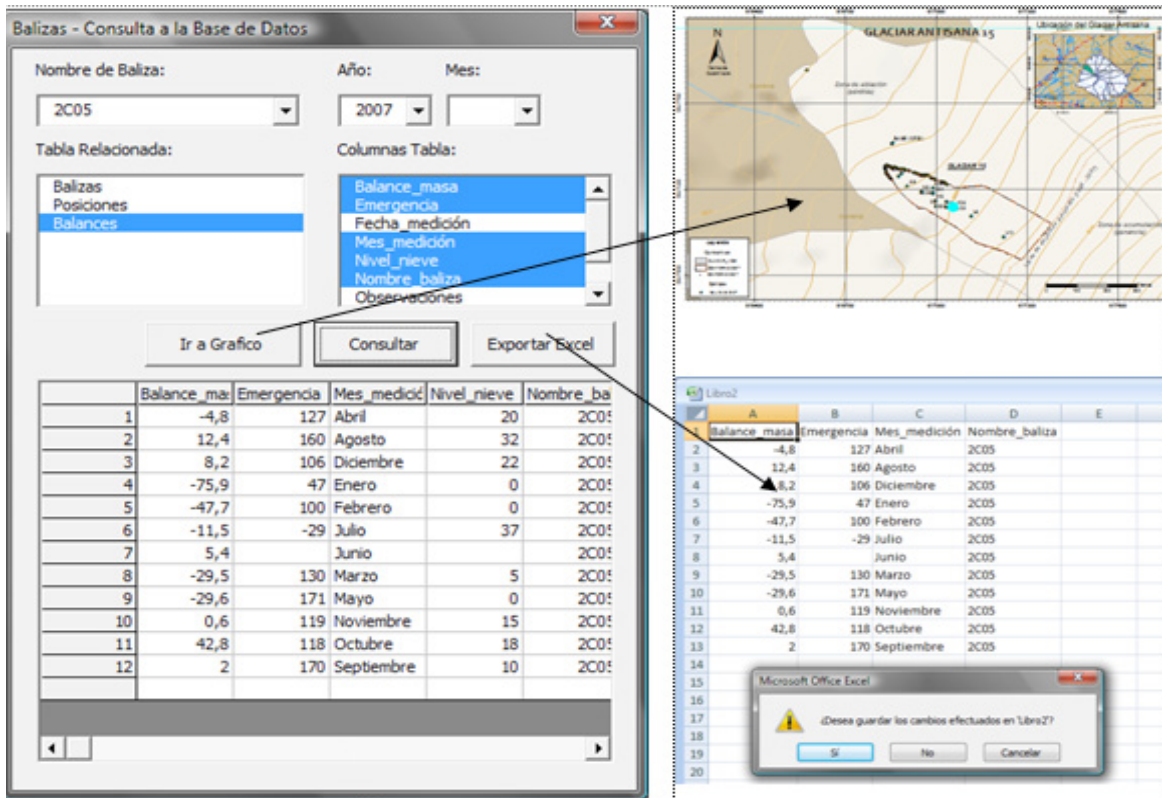
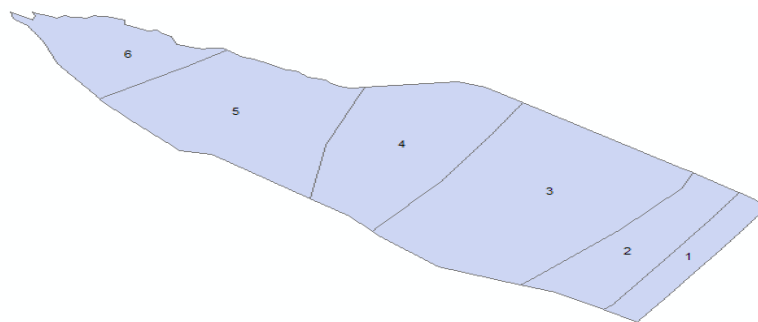


Figura 6. Prueba piloto – Mapa Glaciar 15α – Datos año 2007



**Figura7.** Prueba piloto – Utilización de la Herramienta de Consulta – Datos año 2007

Además, se realizó la prueba del funcionamiento de la herramienta de cálculo, utilizando el contorno del glaciar 15 $\alpha$ , del año 2009. En la Figura 8, se puede observar los resultados.



OBJECTID*	Shape*	Shape Length	Shape Area
1	Polygon ZM	374,647029	4158,754769
2	Polygon ZM	448,795418	7973,221179
3	Polygon ZM	630,920976	24389,114169
4	Polygon ZM	487,48006	14555,358948
5	Polygon ZM	544,043455	16109,005106
6	Polygon ZM	416,66564	6997,886241

Record: 1 Show: All Selected

**Figura 8.** Prueba piloto – Utilización de la Herramienta de Cálculo – Datos año 2009

#### 4.5. IMPLEMENTACIÓN DEL SIG

La instalación final de todos los productos del proyecto se la realizó una vez comprobado el funcionamiento correcto de las herramientas, así como el cumplimiento de las necesidades del usuario.

### 5. CONCLUSIONES

- Se logró obtener información correcta, ordenada e integrada en un solo programa, para facilitar el manejo de los datos alfanuméricos y geográficos mediante la creación de herramientas de consulta y cálculo.
- El principal problema que se afrontó durante la realización de este proyecto fue la duplicación de información debido a la mala administración de los datos provenientes de campo.
- Se generó una herramienta de consulta la cual permite realizar consultas desde ArcMap hacia las bases de datos alfanuméricas. La misma está dotada de filtros que permiten obtener información puntual, conocer su ubicación en el mapa y exportar los datos consultados a Excel para su posterior análisis.
- Mediante la herramienta *Model Builder* de ArcGis se desarrolló un modelo que integró, en un solo paso, los procesos necesarios para obtener superficies parciales de los contornos del glaciar en función de las curvas de nivel, datos necesarios para el cálculo de balance de masa. De esta manera se obtuvo la herramienta de cálculo planteada en los objetivos.

### 6. RECOMENDACIONES

- Se sugiere que los técnicos del Proyecto Glaciares actualicen constantemente las bases de datos y que los datos sean manejados por una sola persona y en un solo computador para evitar errores de manipulación y duplicación.
- Se debería respetar la metodología propuesta en el Manual Técnico para el manejo de la geodatabase, por lo que se recomienda leer el *Manual de Usuario* antes de utilizar la barra de herramientas personalizada ya que existen algunas condiciones para su uso.
- Si se desea cargar la herramienta de consulta a un nuevo documento de ArcMap (*layout*), se recomienda que los nombres que se asignen a los nuevos botones sean exactamente iguales a los que están definidos en la programación.
- En la herramienta de cálculo es estrictamente necesario guardar el archivo de salida en la dirección que muestra la interface al abrirse. Si se escoge otra carpeta, los procesos no se ejecutarán y se mostrará un error.
- Ya que el estudio es un monitoreo continuo, se recomienda utilizar una base de datos con mayor capacidad de almacenamiento.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su reconocimiento a las siguientes entidades y personas:

Autoridades de la ESPE, en especial al director del Departamento y de Carrera, por el apoyo brindado a lo largo del proyecto. Al Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD) y al Proyecto Glaciares Ecuador, por el auspicio brindado para la realización del presente trabajo. Al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), Empresa Municipal de Alcantarillado y Agua Potable de Quito (EMAAP-Q), por el apoyo brindado. Al Ing. Bolívar Cáceres, funcionario INAMHI, por su aporte científico que complementó la investigación. A los Ingenieros Mauricio Murillo y Francisco Yujra por su colaboración en lo referente a programación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cáceres, Bolívar, **Balance de Masa**, INAMHI – IRD, 2008 - 2010.
- Hubbard, B. Glasser, N., **Field Techniques in Glaciology and Glacial Geomorphology**, Editorial John Willey & Sons, Ltda, Inglaterra, 2005, Junio 2009, pág. 187.
- Longwell, C. Flint, R., **Geología Física**. primera edición (1965), Editorial Limusa – México, pág. 248, Mayo 2009.
- Maisincho Luis, **Hidrología y meteorología de la cuenca del río Antizana**, INAMHI – IRD, 2008 – 2010.
- ¿Qué es un glaciar?, <http://www.glaciaresandinos.org/glaciar.html>, Abril 2009.
- Tarbuck y Lutgens, **Geología Física** pág. 509
- Wicander R. y Monroe J., **Fundamentos de Geología**, segunda edición, Internacional Thomson Editores, 2000, pág. 293, Mayo 2009.

## **NUEVO REPORTE Y LOCALIDADES DE *RHODEA COUSINI* JOUSSEAUME, 1900 (*GASTROPODA: SUBULINIDAE*) PARA EL ECUADOR.**

**MODESTO A CORREOSO R**

DPTO. CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN CARRERA INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE. DEPTO. CIENCIAS DE LA VIDA ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO ESPE. Av. General Rumiñahui S/N, Campus Politécnico, Sangolquí – Ecuador; email: mcorreoso@yahoo.com

Recibido: 26 de marzo 2010 / Aceptado: 6 de septiembre 2010

### **RESUMEN**

El primer reporte, desde más de un siglo del género endémico andino *Rhodea*, Familia *Subulinidae*, en Ecuador, con registro documental en base a ejemplares colectados, datos ecológicos, etológicos y conquiológicos. Se enriquece la biodiversidad malacológica del Ecuador con una nueva y notable localidad. El Chontal en Imbabura. Un pequeño aporte a un grupo poco estudiado, con escasos ejemplares en museos mundiales. Se analizan y comparan algunas características de las especies reportadas anteriormente y la posibilidad que solo sean variaciones geográficas o ecotipos.

**Palabras clave.** *Rhodea*. *Subulinidae*. Malacológica

### **ABSTRACT**

The first report *Rhodea* Andean endemic genus, Family *Subulinidae* in Ecuador for more than a century, with documentary record based on specimens collected, ecological, ethological and conquiological. Malacological biodiversity is enriched in Ecuador with a new and remarkable town in Imbabura Malacological the Chontal. Even a small contribution to poorly studied group, with few specimens in museums worldwide. Analyze and compare some characteristics of the species mentioned above and the possibility that one or ecotype are geographical variations.

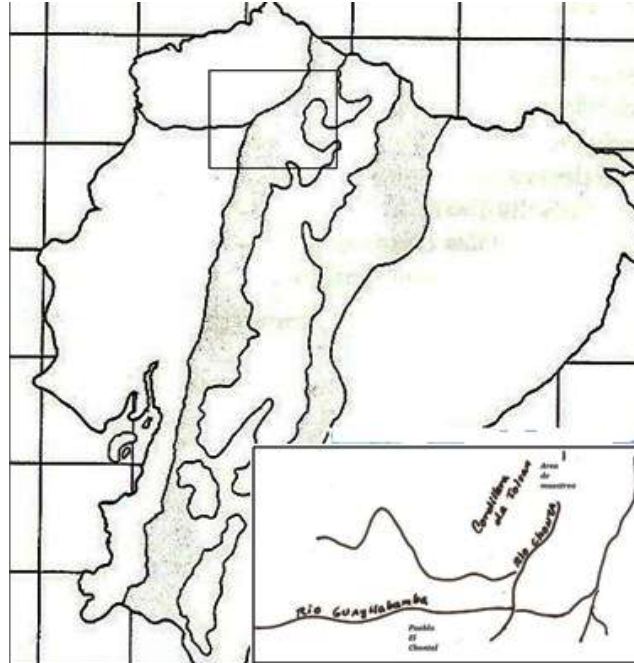
**Key words.** *Rhodea*. *Subulinidae*. Malacological

## **1. INTRODUCCIÓN**

El género *Rhodea* H. & A. Adams, 1855; *Achatinacea Subulinidae Obeliscinae*, es considerado representativo y endémico de la Subregión Colombiana (Parkinson, Hemmen, Groh 1987, Grego Jozef 2007). El género presenta pocas especies con subespecies no muy bien reconocidas: *Rhodea californica*, *R gigantea*, *R wallisiana*, *R. bancrofti*, *R. crosseana*, *R. marialejandrae*, *R. aequatorica*, y *R. cousini*. Su distribución biogeografía al NW de América del Sur, con varias especies en Colombia y Ecuador. El territorio de Colombia puede ser considerada el centro de origen del taxón, en razón de presentar mayor cantidad de especies, reportes y rango de distribución más amplio con varias localidades, la cordillera occidental, Bogotá, Valle del Cauca y Ocana entre otras. La biogeografía tan particular de *Rhodea* sugiere que podría representar un elemento relictivo de la antigua fauna de Gondwana. Ejemplares de este género son bastante escasos en las colecciones de museos a nivel mundial.



Uno de los objetivos de este estudio es documentar y analizar este importante y poco conocido género y sus especies en Ecuador, ya que no existen registros y localidades nuevas desde hace un siglo.



**Mapa 1.** Ubicación del área de la especie cerca al río Guayllabamba

Pese a estar realizando recolectas por más de 10 años no teníamos evidencias físicas del género en el país, excepto la parte superior de una concha rota de la localidad de Mindo, que no se pudo identificar preliminarmente hasta este nuevo reporte en Junio 2007.

Tampoco se reporta en ninguno de los tres artículos clásicos de la fauna malacología del Ecuador, solo escasas referencias en la literatura de algunas localidades de Colombia (ver Ver Grego J et al 2007 Basteria). La única referencia para Ecuador, está en Jousseume 1900 *Mollusques terrestres. Clausilia, Rhoea et Bulimus Sud-Americanae*.

Las únicas especies ecuatorianas reportadas por Jousseume, F. 1900 fueron recolectadas por A Cousin: *R equatorensis* Jousseume 1900 sinónima de *R. aequatoria* Da Costa, 1889, y *R. cousini* J, 1900: se colectaron también en el área de influencia del río Guayllabamba: *R. aequatoria* Da Costa, 188 en Paramba Imbabura y Los Puentes cerca de Quito; *R. cousini* en Guayllabamba (se respeta la ortografía inicial) y entre Pacto y Pachijal, en Pichincha sin más detalles

## 2. METODOLOGÍA

Los ejemplares fueron colectados en senderos de montaña, mediante muestreo simple aleatorio; se realizaron observaciones ecológicas in situ del hábitat, análisis de características morfológicas generales: Conquiliología, comportamiento, alimentación, etológicos in vivo



y Morfometría de las conchillas solamente; por presentar pocos ejemplares, carencia de información, materiales de comparación y poco apoyo en museos nacionales. La nueva localidad principal, está relativamente cercana al pueblo El Chontal, cantón Cotacachi, Parroquia García Moreno, Provincia Imbabura, vía Calacalí-Nanegalito, cercana al río Chontal que desemboca en el Guayllabamba, y colindante con la reserva Bosque Protector Los Cedros.

Área con remanentes de bosques primarios bastante conservada y relacionada con el Chocó y varios tipos de formaciones vegetales: Bosque Siempreverde Montano Bajo de los Andes occidentales y Bosque de Neblina Montano de los Andes occidentales. Según Sierra et al 1999.

**Hábitat y sustrato.-** Altitud 900 msnm aproximadamente que oscila entre 600 a 1.800 msnm, Temperatura promedio de 25 °C zona de alta pendiente cercana a cascadas, clima ligeramente frío, muy húmedo (más de 80%) dentro de vegetación densa de bosque primario algo alterado, suelo húmico. Viven bajo hojarasca en sitios con umbría, con pocos elementos petrícolas, por lo que se cree que son calcífilos e higrófilos. Para la descripción de la concha se utilizó parámetros básicos: forma de la concha, consistencia, patrones de color, escultura, sutura, abertura, peristoma, ombligo, labio y mediciones fenéticas básicas. Los ejemplares están depositados (lote 27001-2) en la Colección Malacológica del autor con duplicados en la Universidad ESPE.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se determinaron características morfológicas generales: **Conquiliología-Morfometría:** Animal pequeño en relación con la concha, pie pequeño y simple, coloración amarillenta fuerte tentáculos cortos sin coloración ocular particular. **Conducta.-** Presenta movimientos relativamente rápidos y hábitos fosoriales, excavan en la hojarasca a casi una pulgada de profundidad. La coloración del animal y sus hábitos, demuestran su poca tolerancia a la luz, típico del hábitat fosorial. Desplazan la concha arrastrándola por entre la hojarasca, puedan trepar muy poco por ramas pegadas al suelo (en el terrario). Las observaciones se realizaron con un ejemplar en cautiverio: tiempo 2 meses.



Foto 1. Animal en su hábitat.



**Foto 2.** Vista general de la conchilla



**Foto 3.** De izquierda a derecha Detalles de la abertura última vuelta y carina de la conchilla y conchillas de los juveniles.



**Foto 4.** Detalles generales de las conchillas con el periostraco presente

Los individuos convivían simpátricamente con otras especies fosoriales de las familia *Poteriidae* y *Subulinidae* genus *Neocyclotus* y *Neobeliscus sp* en menor cantidad y *Pseudohelicina helicinaeformis familia Helicinidae*. Se reconfirma que *Rhodea* tiene reproducción vivípara, por los juveniles nacidos del ejemplar en cautiverio en terrarios, donde sobrevivieron por casi 15 días, y permitió observar detalles de la protoconcha antes de presentar las características quillas del adulto. Ver figura 3

Las conchas tienen 13 y 14 vueltas en el juvenil y adulto respectivamente. Se indican las medidas de los especímenes dentro del lote. Las medidas tomadas son usuales: Altura=H, Diámetro mayor=DMC (medido entre la vuelta corporal y la última vuelta incluyendo carina), Altura última vuelta y carina=HC, Diámetro de la Abertura =DC y la relación entre altura/ ancho diámetro del ejemplar = h/a. Guardan proporción 6.3/6.2 entre adultos y juveniles.

Tabla 1. Conquiliología. Medidas usuales de los especímenes

Núm. Ejemplares Referencia 29003	H	DMC	H C	DC	h/a
-1- adulto	38 mm	3,5mm	4 mm	5mm	6.33
2-1 adulto	38 mm	3 mm	4mm	5mm	6.33
3-1 Juvenil	34 mm	3 mm	3,5mm	4mm	6.18

La especie colectada se corresponde con *Rhodea cousini Jousseume, 1900*; para la diagnosis referencial se cita a Pilsbry 1906 in Grego 2007.

*Rhodea cousini J*, 1900: 36, PL 1 Fig. 15 (NW. 4636/holotype MNHN); Pilsbry, 1906: 238; 1907: PL 38 Fig.16. Material .NW Ecuador: Pichincha Prov., Río Guailabamba,

(MNHN 4636 MOLL holotipo. colectada por A Cousin). Pilsbry, 1906: 238).- «Shell muy profundamente umbilicada, en forma de gusano, anteriormente con una aguda espiral quilla, más bien delgado,... córneos, (estriación) oblicuamente ondulada, ápice suave, conoide. 14 Vueltas, la primera un poco convexa, los siguientes planos, presenta una carina en la sutura... apertura, triangular, margen simple. Columella engrosada, arqueada en la base, formando un canal con el margen de la base”. Mediciones.- Holotype: H 40,4 mm, 5,0 RNM W1, W2 7,0 mm, 5,0 mm AL, AW4, 0mm.

*Debate.* – La conchilla tiene una quilla. Similar en general a la forma geográficamente cerca *R. aequatoria* Da Costa, 1899, pero mucho más grande, y su quilla es más prominente.

### 3.1 DISCUSIÓN

*Rhodea cousini* J, 1900, presenta algunas características morfológicas parecidas a *Rhodea aequatoria*= *R. equatorensis*, en cuanto a detalles de la carina, tamaño y distribución biogeográfica, que complican su taxonomía, ya que las especies determinadas por Jousseume y Costa, fueron estudiadas con pocos ejemplares adultos y juveniles rotos; *R. equatorensis* con dos sintipos y *R. cousini* con solo un holotipo. Los ejemplares actuales son también escasos adultos por su tamaño y la presencia de crías en cautiverio. Los estudiados por Jousseume tenían diferencias entre sí: *Rhodea aequatoria* con un individuo dextrógiro y otro sinestrógiro (con esta forma fueron descritas por Dohm (1875a), Da Costa (1889) y Jousseume) notable caso de Carinación del género en Ecuador.

Además, se observa que ambas especies *R. cousini* y *R. aequatoria* son también muy similares en la forma de la conchillas y la distribución, lo que sugiere preliminarmente que no sean especies diferentes y si una variación geográfica, dadas la cercanía de las localidades casi todas en la cuenca baja del río Guayllabamba: Chontal, Paramba, entre Pichincha e Imbabura Guayllabamba, Los Puentes, Pacto, Pachijal y Mindo en Pichincha.

Basados en estas evidencias morfológicas y sobre todo Biogeográficas; se puede considerar preliminarmente a las especies del género *Rhodea* en Ecuador como ecotipos con subpoblaciones restringidas a un hábitat específico, que en ambientes diferentes presenta fenotipos distintos. Debido a la dificultad de envío de especímenes a museos europeos, para comparación, carecer de estudio de anatomía interna o genéticos, poca cantidad de ejemplares, falta de taxónomos del género en el área andina; entre otras no podemos precisar aun si este argumento es totalmente valido para las especies ecuatorianas y las afines de Colombia, se espera realizar estudios posteriores más completos de estas especies.

## 4. CONCLUSIONES

Aspectos relevantes para la biodiversidad en este estudio lo constituye: La distribución del género *Rhodea* y la taxonomía de sus especies en el Ecuador, el reporte de nuevas e importantes localidades malacológicas, la distribución de especies, el aporte de elementos documentales; la confirmación de datos etológicos y ecológicos nuevos, así como un análisis biogeográfico entre otros aspectos de estos raros e interesantes moluscos.



## AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos especiales al experto, Dr. Josef Grego por sus opiniones, artículos además de la extensa y amistosa comunicación malacológica compartida vía Internet; al Dr. Bran Breure que amablemente nos envió copia de la revista *Basteria* y por su colaboración en general. A los estudiantes de la UCE Escuela de Biología por su ayuda; la guía experta y cordialidad de los moradores del Chontal y el gran apoyo de mi esposa Marcela Coello, profesora y coordinadora de la Práctica de campo en la UCE.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Correoso, R.M. Caracterización y distribución preliminar de los moluscos terrestres y fluviales del Ecuador Continental. **CIENCIA** Vol. 5 No 2, 147-154, 2002.
- Correoso, R.M. Los moluscos terrestres y fluviales del Ecuador continental, la biodiversidad desconocida. **SIMBIOE** Quito, 2008.
- Cousin Auguste. Faune malacologique de l´republique de L´Equateur. **Bull, Soc. Zoo.** Zool de Francia, 1887.
- Greco, Jozef & Infante Alan Pierre. **Review of the genus *Rhodea* (Gastropoda, Pulmonata, Subulinidae), with description of two new species from Colombia** **BASTERIA**, Vol. 71, No. 1-3, 2007
- Jousseume, F. Mollusques terrestres. Clausilia, Rhodea et Bulimus Sud-Americanae. Plancha 1. **Extrate du Bulletin de la societe Philomathique de Paris.** (9) tomo II no pág. 5 -44, 1990.
- Mission du service Géographique de l´armée. Pour la mesure d´un Arc de Méridien Equatorial en Amérique du Sud. 1899-1906. Tome 9. **Zoologie.** Fascicule 3. Mollusques Ministère de L´instruction Publique .Paris, 1910.
- Parkinson Brian, Hemmen Jens and Klaus Groh. Tropical Landshells of the world. 1-279 Veriag Christa Hemmen. Wiesbaden .Western Germany, 1987.
- Vera Ardila, Mónica Lucía .**Lista de los géneros de moluscos terrestres de Colombia (Mollusca: Gastropoda: Prosobranchia: Mesogastropoda y Pulmonata: Stylommatophora)** **Biota Colombiana**, Vol. 9, Núm. 1, pp. 39-62, 2008.

## **GENERACIÓN DE UN MODELO DE ONDULACIONES GEOIDALES DEL ECUADOR CONTINENTAL A PARTIR DE DATOS DISPERSOS MEDIANTE MÍNIMOS CUADRADOS, COLOCACIÓN (LSC)**

**N. ARMANDO ECHEVERRÍA LL.<sup>(1)</sup> , ALFONSO R. TIERRA C.<sup>(2)</sup>**

<sup>(1)</sup> CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE. ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO. Av. General Rumiñahui, s/n, Sangolquí - Ecuador; e-mail: nael\_w9@hotmail.com

<sup>(2)</sup> CENTRO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS. ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO. Av. General Rumiñahui s/n, Sangolquí-Ecuador; e-mail: atierra@espe.edu.ec

Recibido: 7 de junio 2010 / Aceptado: 15 de septiembre 2010

### **RESUMEN**

Mediante la aplicación del posicionamiento GPS, se ha facilitado la resolución de problemas prácticos en diversas áreas de la ingeniería; a través de la obtención de coordenadas geodésicas y alturas elipsoidales referidas al sistema WGS84 de puntos de posicionamiento, pero las alturas elipsoidal no son aplicables en la resolución de estos problemas debido a que no se encuentran referidas al nivel medio del mar (geoide) como se requiere en las aplicaciones de ingeniería. Es por esto que se genera la necesidad de obtener un modelo de alta precisión que calcule el valor de la diferencia entre las alturas referidas al nivel medio del mar y las alturas elipsoidales en los puntos de posicionamiento, teniendo este modelo que adaptarse de la mejor manera a la distribución espacial y temporal de los puntos de datos con los cuales se va a generar dicho modelo. Razón por la cual, el presente estudio muestra la investigación y aplicación de la metodología de mínimos cuadrados colocación (LSC), para la generación de un modelo de ondulaciones geoidales del Ecuador continental a partir de datos dispersos.

La generación del cálculo de la ondulación geoidal en los puntos de datos GPS/nivelación se realizó a través de la aplicación del método geométrico, generando un modelo que proporciona, cuando sea necesario el valor de la ondulación geoidal en un punto o una grilla de puntos dentro del Ecuador continental, permitiendo al usuario transformar las alturas elipsoidales en alturas niveladas con respecto al nivel medio del mar sin recurrir a métodos como la nivelación geométrica o trigonométrica, optimizando de esta manera los recursos del usuario, especialmente el tiempo.

**Palabras clave.** GPS. Mínimos cuadrados colocación. Ondulación geoidal

### **ABSTRACT**

Through the application of GPS positioning, the resolution of practical problems in various areas of engineering have been solve easily, using the acquisition of geodetic coordinates and ellipsoidal heights referred to WGS84 system on the positioning points, but the ellipsoidal heights are not applicable in solving these problems because they are not referred to the average sea level (geoid) as required in engineering applications. That is why it generates the need for create a highly accurate model that calculates the value of the difference between the heights referred to the average sea level and the ellipsoidal heights on positioning points, having this model to adapt in the best way to the spatial and temporal distribution of data points which will generate the model. For this reason, this study shows the research and application of the method of least squares collocation (LSC), to generate a model of continental Ecuador geoid undulations from sparse data.

The generation of the calculation of actual geoid undulations of data points GPS / leveling was done through the implementation of the geometric method, generating a model as needed to provide the value of the geoid undulation at a point or a grid of points within continental Ecuador, allowing the user to transform the ellipsoidal heights on leveled heights with respect to the average sea level without resorting to methods such as geometric or trigonometric leveling, thus optimizing the user's resources, especially time.

**Key words.** GPS. Least square collocation. Geoid undulations.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de navegación por satélites artificiales, en especial el NAVSTR-GPS (Global Positioning System) (Seeber, 1993), (Galera, 2000) están siendo cada vez más usados para las diferentes aplicaciones tanto prácticas como científicas. El GPS permite calcular las coordenadas latitud, longitud y altura sobre el elipsoide de referencia, pero para ciertos fines es necesario conocer una altura de carácter físico, como la altura ortométrica. Para poder transformar la altura elipsoidal a ortométrica es necesario conocer la ondulación geoidal de un punto. La búsqueda del geoide sigue siendo una tarea fundamental de muchos países del mundo, y en especial es una necesidad para nuestro país en vista que no se dispone de este geoide con una buena precisión para poder calcular las ondulaciones geoidales.

Para la determinación del geoide existen varios métodos que han sido aplicados como son métodos Geopotenciales, Gravimétricos y los Geométricos. En nuestro país, al no existir un modelo geoidal con buena precisión es muy utilizado el EGM96 (Lemoine et.al, 1998) o EGM08 (Earth Geopotential Model) (Pavlis et. al, 2008) para calcular las ondulaciones geoidales con cobertura mundial. Pero estos modelos, en el área del Ecuador pueden llegar a tener errores hasta 4 metros (Tierra, 2009), lo que para muchos trabajos no es aplicable. Actualmente, no se dispone de datos gravimétricos suficientes como para poder desarrollar un modelo gravimétrico que mejore la precisión, en el área de Ecuador, que las obtenidas con los modelos geopotenciales. El método geométrico conocido como método GPS/Nivelación geométrica fue utilizado en este trabajo con la finalidad de calcular las ondulaciones geoidales en el Ecuador Continental.

Para la aplicación del método se obtuvo valores de altura nivelada realizada mediante nivelación geométrica, y en los mismos puntos se realizó posicionamiento GPS de precisión por parte del Instituto Geográfico Militar-IGM. La cantidad de puntos obtenidos a lo largo del país indica que tienen una distribución dispersa, irregular y poca densa, lo que motivo para que se pueda utilizar la metodología de mínimos cuadrados colocación (LSC) (Moritz, 1980).

## 2. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

### 2.1 DESCOMPOSICIÓN GENERAL DE UNA OBSERVABLE

Al realizarse la observación de un fenómeno, se obtiene un número que representa el valor en un determinado instante y lugar de medición que toma el fenómeno estudiado. Pero este valor se encuentra enmascarado por una parte aleatoria incluida en el número obtenido, el cual es un componente aleatorio. Una observación ajustada puede ser escrita como la ecuación (1).

$$L_a = L_b + V \quad (1)$$

Donde:

$L_a$ : es el valor ajustado de la observable.

$L_b$ : es el valor observado.

$V$ : es el valor de la parte aleatoria de la observación conocida como residual

Se puede considerar entonces que la observación se encuentra compuesta por una parte determinista que incluye el valor esperado de la observable, una posible parte aleatoria propia del fenómeno estudiado y un error aleatorio:

$$L_a = L_b + r + s \quad (2)$$

Donde:

$r$ : es el error aleatorio de la medida llamado ruido.

$s$ : es la parte aleatoria propia del campo en el que se realiza la observación llamada señal.

De esta manera, la parte aleatoria de la observación está constituida por el ruido y la señal:

$$V = r + s \quad (3)$$

## 2.2 MÍNIMOS CUADRADOS COLOCACIÓN (LSC)

El modelo general de mínimos cuadrados colocación (LSC), constituye un caso muy general de mínimos cuadrados, su característica principal es que además de los parámetros y residuales de observación, permite estimar otras cantidades aleatorias de gran interés en problemas geodésicos.

La solución por mínimos cuadrados colocación (LSC) es una de las mejores estimaciones lineales insesgadas de los parámetros y de las señales que puede obtenerse con datos dispersos, en el sentido de que es una estimación lineal insesgada mínima varianza (Sevilla, 1987).

El modelo matemático de mínimos cuadrados colocación es:

$$A X + L = s + r \quad (4)$$

Donde:

$A$ : es la matriz de diseño o de coeficientes del modelo matemático, también conocida como la matriz de derivadas parciales del modelo.

$X$ : es el vector de las correcciones de los parámetros del modelo.

$L$ : es el vector de diferencia de las observaciones entre los valores aproximados de las observaciones ( $L_a$ ) y el vector de las observaciones ( $L_b$ ).

Se supone que se posee  $n$  observaciones  $L_b$  y por lo tanto  $n$  ruidos  $r$  y  $n$  señales  $s$  en los puntos de observación y  $u$  parámetros  $X$ , con la condición que  $n > u$  para tener superabundancia de datos; además se supone que se desea estimar señales en puntos que pueden ser distintos a los de observación, siendo  $z$  el vector de las señales en los puntos distintos de dimensión  $k$  y sin correlación con el ruido  $r$ .



La determinación de los parámetros  $X$  es un problema de ajuste, la de la señal  $z$  en puntos distintos a los de observación es un problema de predicción y la eliminación del ruido en las observables es un problema de filtrado, que combinados tanto el ajuste, la predicción y el filtrado forman el problema de colocación por mínimos cuadrados (LSC) (Moritz, 1980).

Obteniéndose, de esta manera las ecuaciones del (5), (6) y (7) para el ajuste, filtrado y predicción a partir del método paramétrico, basadas en la ecuación general de colocación por mínimos cuadrados de Moritz (1980), demostradas y analizadas por Sevilla (1987).

$$X_{LSC} = -(A^T C^{-1} A)^{-1} A^T C^{-1} L_{LSC} \tag{5}$$

$$s = C_{ss}^{-1} V \tag{6}$$

$$z = C_{zs}^{-1} V \tag{7}$$

Donde:

$C$ : es la matriz de covarianza de las observaciones formada por:

$$C = C_{ss} + C_{rr} = C_{L_b L_b} \tag{8}$$

Siendo:

$C_{ss}$ : la matriz covarianza de las señales de las observaciones. En general, la función covarianza de las señales de las observaciones es definida como:

$$C_{ss} = C(P, Q) = E [s(P), s(Q)] \tag{9}$$

Donde  $s(P)$  y  $s(Q)$  son los valores de la señal en dos puntos genéricos  $P$  y  $Q$  y  $E$  es el operador esperanza matemática, esta función debe ser definida positiva y se la supone isótropa, es decir que solo dependa de la distancia entre los puntos  $P$  y  $Q$  (ecuación (10) y (11)); entonces:

$$C(P, Q) = C(d) \tag{10}$$

$$d = dist(P, Q) \tag{11}$$

Esto indica que la función covarianza es constante para el punto  $P$  y todos los puntos de una circunferencia centrada en  $P$  de radio  $d$ .

$C_{rr}$ : la matriz covarianza del ruido. Se obtiene por la precisión de las medidas. La función covarianza del ruido adopta la forma diagonal:

$$C_{rr} = \sigma_0^2 I \tag{12}$$

Donde:

$\sigma_0^2$  es la varianza de la unidad de peso de las observaciones e  $I$  la matriz identidad.

La parte más delicada en la aplicación del método de mínimos cuadrados colocación (LSC) es el establecimiento de las funciones covarianza, debido a que las funciones covarianzas verdaderas son desconocidas, por tal motivo se las debe aproximar por funciones covarianza calculadas, de manera que sean positivas en el intervalo de distancia esférica en el que van a ser utilizadas. Las funciones covarianza constituyen el modelo teórico que representa las covarianzas estimadas en puntos discretos a partir de los datos de observación, por lo que difieren abruptamente de un problema geodésico a otro.

En Geodesia, hay problemas para los cuales las funciones covarianza están muy bien estudiadas como es el caso del potencial perturbador de la gravedad, pero esto no ocurre en todos los casos. Para obtener la matriz covarianza de las señales de las observaciones  $C_{ss}$ , de la cual se va a obtener la matriz o vector covarianza de las señales de los puntos de predicción  $C_{zs}$ , dependiendo de la isotropía de la covarianza como si indica en la ecuación (10), se utiliza la función covarianza empírica (Sevilla, 1987). Una vez obtenidas las señales  $s$  al aplicar la ecuación (6), se realiza el filtrado en los  $n$  puntos originales de observación aplicando la ecuación (4) se obtiene:

$$L_s = L_0 - A X - s \quad (13)$$

De esta manera las nuevas ecuaciones  $L_s$ , ya no posee los errores de observación. Después, se calcula el nuevo vector  $L_{LSC}$  en función de las nuevas observaciones filtradas  $L_s$ , mediante la cual se va a calcular el valor de los parámetros ajustados  $X_{LSC}$ , a través del ajuste por mínimos cuadrados colocación (LSC) aplicando la ecuación (5).

Finalmente para realizar la predicción se utilizan los valores de la señal  $z$ , obtenidos a partir de la ecuación (2.47), y se utilizan los valores de los parámetros ajustados  $X_{LSC}$  mediante colocación por mínimos cuadrados (LSC), aplicando la ecuación (14):

$$L_z = L_{oz} - D X_{LSC} - z \quad (14)$$

Donde,  $D$  es la matriz de coeficientes correspondiente a los nuevos puntos (similar a  $A$ ), cuyas dimensiones serán de  $(k \times u)$  y  $L_{oz}$  el vector de observaciones aproximadas en los puntos de predicción.

### 2.3 CÁLCULO DE LA ONDULACIÓN GEOIDAL POR EL MÉTODO GEOMÉTRICO

La ondulación geoidal es la distancia que separa al elipsoide del geoide, tomada sobre la normal elipsoidal de un punto, comúnmente se la representa como ( $N$ ). Conociendo la ondulación geoidal se puede calcular la altura ortométrica de algún punto de observación en particular, a partir del valor de la altura sobre el elipsoide determinada por un equipo GPS, expresándola de la siguiente manera (ecuación (15)) (Garafulic, 2002):

$$H = h - N \quad (15)$$

Donde:

$H$  = Altura ortométrica

$h$  = Altura elipsoidal

$N$  = Ondulación Geoidal

La altura ortométrica requiere del conocimiento del valor medio de la gravedad a lo largo de la línea de la plomada, por tal motivo se utilizan métodos para determinar las alturas ortométricas, pero estos a su vez no son aplicados en la práctica. Por ese motivo, puede aplicarse la altura nivelada con respecto al nivel medio del mar, como altura ortométrica de un punto sin conocer el geoide, siendo un valor similar para efectos prácticos, debido a que la altura con respecto al nivel medio del mar, puede ser obtenida mediante nivelación (Leick, 1995).

$$H \approx H_n \tag{16}$$

Donde :

$h_n$   $H_n$  = altura nivelada

Por este motivo se puede conocer la ondulación geoidal sustituyendo la ecuación (16) en la ecuación (15) obteniéndose:

$$H_n = h - N \tag{17}$$

Despejando ( $N$ ) de la ecuación (17) se obtiene el valor de la ondulación geoidal en un punto determinado mediante la ecuación:

$$N = h - H_n \tag{18}$$

El método geométrico para el cálculo de la ondulación geoidal es el método más antiguo para determinar un geoide, se denomina de esta manera por que solo se utilizan elementos geométricos para su aplicación. Es un método ideal para áreas de escasa extensión (Geoides puntuales), inferior a una superficie de 2° x 2°, es un método de aplicación local (Nuñez, 2006).

Consiste en determinar la ondulación del geoide calculando e interpolando la diferencia entre la cota ortométrica (se utiliza la altura nivelada para fines prácticos) y la altura elipsoidal (obtenida en las observaciones GPS), utilizando la ecuación (18).

Se debe poseer puntos del terreno posicionados con GPS y con altura nivelada, para calcular la ondulación geoidal “real” de estos puntos. La distribución espacial de estos puntos, la técnica aplicada para su posicionamiento y la técnica para el cálculo de su altura nivelada determinarán los resultados de la metodología, se recomienda utilizar modelo matemáticos ajustamos por el método de mínimos cuadrados colocación, optando por los siguientes modelos matemáticos, cuyos valores de los parámetros dependerán de la cantidad y distribución de los datos (Edwards Apud Nuñez):

$$\begin{aligned} N &= a\lambda + b\varphi + c \\ N &= a\lambda + b\varphi + c\lambda\varphi + d \\ N &= a\lambda + b\varphi + c\lambda^2 + d\varphi^2 + e \\ N &= a\lambda + b\varphi + c\lambda\varphi + d\lambda^2 + e\varphi^2 + f \end{aligned} \tag{19}$$

Donde:

$a, b, c, d, e, f$  son los parámetros del modelo

$\lambda, \varphi$ : son las coordenadas geodésicas de los puntos

### 3. METODOLOGÍA

Se realizó la selección del modelo matemático que mejor se adapte a los 108 puntos de datos GPS/nivelación con los cuales se desarrolló la metodología de mínimos cuadrados colocación (LSC) y de los cuales se obtuvo el valor de la ondulación geoidal real calculado por el método geométrico, una vez seleccionado el método matemático más apropiado, se realizó su ajuste por el método paramétrico de mínimos cuadrados.

A partir de las matrices y vectores obtenidos por el ajuste paramétrico se inició la aplicación de la metodología de mínimos cuadrados colocación (LSC), para el área de ajuste. Convirtiéndose, el cálculo de la función covarianza empírica de las observaciones en la parte crítica de la metodología, debido a que la metodología de mínimos cuadrados (LSC), utiliza a la función covarianza como parte central de su desarrollo.

Para validar los ajustes se utilizaron 24 puntos de datos GPS/nivelación que no intervinieron en el ajuste, en los cuales se calculó el valor de la ondulación geoidal real por el método geométrico. Se calculó también el valor de ondulación geoidal de los puntos de validación por el modelo matemático ajustado por el método paramétrico y por la metodología de mínimos cuadrados colocación (LSC), con el fin de comparar los resultados.

Se calculó la diferencia de los valores de ondulación geoidal calculados por el modelo matemático ajustado por el método paramétrico con respecto a los valores de ondulación geoidal real calculados por el método geométrico. Para realizar todos los cálculos, los ajustes, la aplicación de la metodología de mínimos cuadrados colocación y la validación de los resultados obtenidos, se automatizó todo proceso mediante el desarrollo de programas creados en el software MatLab; además se generó los mapas y analizar los resultados con la distribución espacial de los puntos de datos GPS/nivelación.

### 4. RESULTADOS

El análisis de los resultados de la aplicación de mínimos cuadrados colocación para la generación de un modelo de ondulaciones geoidales para el Ecuador continental a partir de datos dispersos, se realizó mediante la validación con respecto a los valores de ondulación geoidal obtenidos por el método geométrico y comparación con la validación de los resultados obtenidos por la aplicación del modelo matemático.

La Tabla 1, muestra los resultados de la validación de la aplicación del modelo matemático, en la cual se puede observar que se obtuvo una desviación estándar de 2 m con un RMSE de 2m, la amplitud de los errores son aproximadamente de 5.5 m y una media de los errores de 50 cm.

Tabla 1. Resultados de la validación del cálculo de la ondulación geoidal por el modelo matemático ajustado por el método paramétrico

Diferencia máxima (m)	3.896
Diferencia mínima (m)	-2.508
Media de las diferencias (m)	0.469
Desviación estándar de las diferencias (m)	2.026
<b>RMSE (m)</b>	<b>2.038</b>



Finalmente se realizó la diferencia de los valores de ondulación geoidal calculados por la metodología de mínimos cuadrados colocación (LSC) con respecto a los valores de ondulación geoidal real calculados por el método geométrico. Los valores obtenidos de la comparación son mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados de la validación de la aplicación de la metodología de mínimos cuadrados colocación (LSC)

Diferencia máxima (m)	0.103
Diferencia mínima (m)	-0.212
Media de las diferencias (m)	-0.020
Desviación estándar de las diferencias (m)	0.086
<b>RMSE (m)</b>	<b>0.087</b>

De esta manera se determina que la aplicación de la metodología de mínimos cuadrados colocación (LSC) para el cálculo de las ondulaciones geoidales en los puntos seleccionados para la validación fue satisfactoria, obteniendo un RMSE en la validación de resultados de 8.7 centímetro y una desviación estándar de 8.6 cm, un error máximo de 25 cm aproximadamente y con una amplitud de 30 cm. Los resultados mostrados en la tabla 1 y en la tabla 2, indica que la utilización del LSC mejora bastante respecto al modelo matemático utilizado.

Con estos resultados obtenidos con el LSC, se procedió a utilizarlo con la finalidad de generar el mapa de valores de ondulaciones geoidales en el área de aplicación de la metodología. La Figura 1, muestra la variación de las ondulaciones geoidales que se pueden encontrar en el área de estudio, y pueden estar entre 10 m en la zona del litoral subiendo hasta 29 m e la zona andina y bajando a 15 m en la zona oriental.

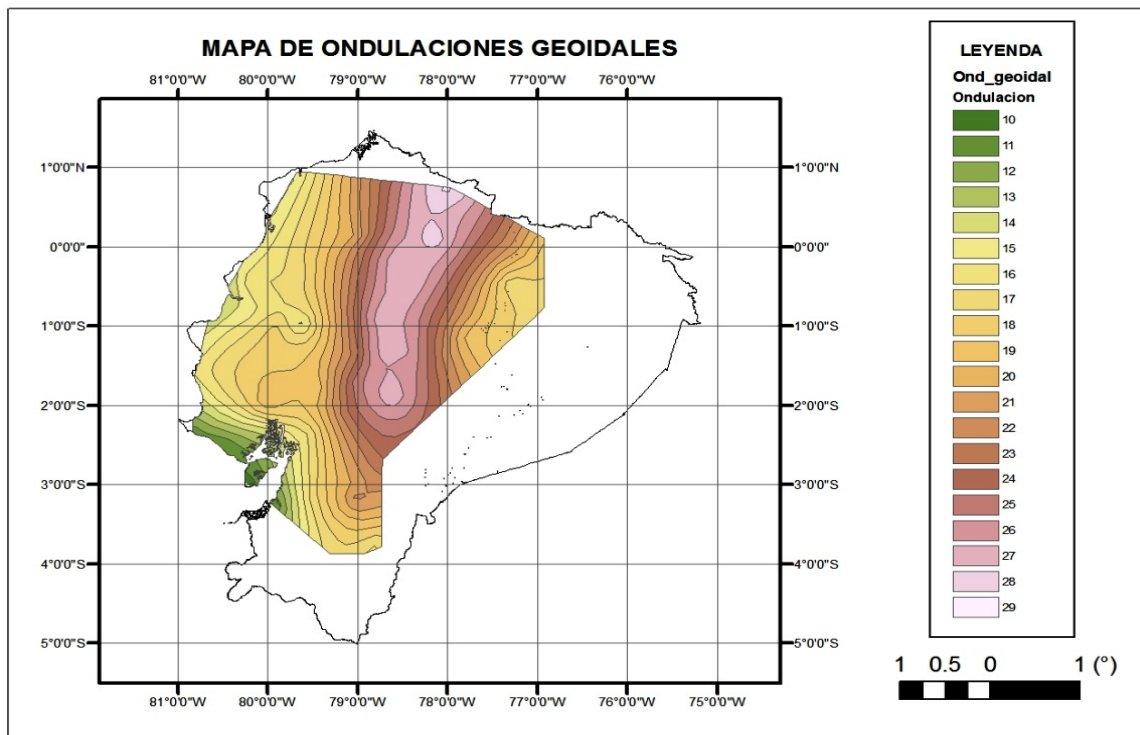


Figura 1. Mapa de ondulaciones geoidales del área de ajuste

## 5. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede indicar lo siguiente:

- Con la aplicación del método de mínimos cuadrados colocación se obtuvo mejores resultados en la interpolación comparado con el modelo matemático.
- Los errores pueden alcanzar los 25 cm en el área de estudio, mejorando de esta manera a los obtenidos con los modelos geopotenciales EGM96 y EGM08.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Galera, M. **Posicionamiento pelo NAVSTAR-GPS. Descrição, Fundamentos e Aplicações**. UNESP, Sao Paulo, 2000.
- Garafulic, P. **Geodesia: teoría y práctica**, Universidad de Santiago de Chile, Santiago – Chile, 2002.
- Leick, A. **GPS satellite surveying**, Ed. John Wiley & Sons, 1995.
- Lemoine, F. et.al. The Development of the Joint NASA and the NIMA Geopotential Model EGM96-NASA/TP, USA, 1998.
- Moritz, H. **Advanced Physical Geodesy**, Herbert Wichman Verlag, 1980.
- Núñez, A., Determinación de un geode de precisión en áreas de pequeña extensión. Aplicación en el Parque Nacional de Doñana, Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Ingeniería del Terreno. **Cartografía y Geofísica**, Barcelona – España, 2006.
- Pavlis, N; Holmes, A; Kenyon, S; Factor, J. **An Earth Gravitational Model to Degree 2160:EGM08**, NGA, USA, 2008.
- Seeber, G. **Satellite Geodesy**. Walter de Gruyter, New York, 1993.
- Sevilla, M. **Colocación por mínimos cuadrados**. Universidad Complutense, Facultad de Ciencias Matemáticas, Instituto de Astronomía y Geodesia, Madrid – España, 1987.
- Tierra, A. Evaluación del EGM08 y EGM96 en el Ecuador a partir de datos GPS y Nivelación Geométrica. **Revista Geoespacial N°6**. ESPE, p. 70-78, Sangolquí-Ecuador, 2009.

# GENERACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO IONOSFÉRICO LOCAL, MEDIANTE MEDIDAS DE FALSA DISTANCIA A PARTIR DE ESTACIONES DE MONITOREO CONTINUO GPS

JOSÉ A. SILVA A<sup>(1)</sup>. ; ALFONSO R. TIERRA C.<sup>(2)</sup> ; MARCO P. LUNA L.<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y MEDIO AMBIENTE. DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN. ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO. Avenida Gral. Rumiñahui, S/N. Sangolquí-Ecuador; e-mail:jbeto5\_sa@hotmail.com; mpluna@espe.edu.ec

<sup>(2)</sup> CENTRO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS. ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO. Avenida Gral. Rumiñahui, S/N. Sangolquí-Ecuador; e-mail: atierra@espe.edu.ec

Recibido: 16 de febrero 2010 / Aceptado: 5 de agosto 2010

## RESUMEN

La atmósfera está dividida con respecto a la propagación de las señales en troposfera e ionosfera, dependiendo de las condiciones a ser relacionadas.

La ionosfera actúa como un medio que perturba las señales electromagnéticas que la atraviesan y cuyo efecto deberá ser eliminado realizando observaciones hechas con ciertas técnicas, como son las geodésicas espaciales, si se requiere obtener resultados precisos, el objetivo principal de este estudio es calcular el Retraso Ionosférico Vertical (Iv), el cual es causado por la refracción ionosférica y este atraso afecta principalmente a receptores de una frecuencia.

Un modelo representado por la serie de Fourier fue implementado en el cálculo del retraso ionosférico vertical (Iv) y los parámetros fueron calculados, a partir de datos colectados por tres estaciones de monitoreo continuo GPS (S061, CIE, ESPE) durante tres meses. Los datos de entrada del modelo fueron las falsas distancias de las portadoras  $L_1$  y  $L_2$ .

Los resultados obtenidos del retraso ionosférico vertical se localizan hasta valores de 4 metros, teniendo una mayor influencia a las 15:00 horas.

A partir de este modelo se generó un nuevo modelo matemático mediante una regresión lineal múltiple teniendo como datos el Día GPS, la Hora UTC de observación y el ángulo de elevación obteniendo un modelo con una precisión de  $\pm 0,781$  metros con respecto al modelo con Series de Fourier.

**Palabras Clave:** GPS, Ionosfera, Regresión lineal

## ABSTRACT

The atmosphere is divided according to the propagation of signals in troposphere and ionosphere, depending on the conditions to related.

The ionosphere acts like an element the disturbs electromagnetic signals that go through it, and that its effect should be eliminated with observations made with certain techniques, as is the spatial geodesical, if the object is to obtain precise results. The primary objective of this study is to calculate the Vertical Ionospheric delay of the signal (Iv), which is caused by the ionospheric refraction, and this delay affects mainly one frequency receptors.

A model represented by the Fourier series was implemented in the calculation of the vertical ionospheric delay (Iv) and the parameters were calculated by the collection of data from three GPS reference stations (S061, CIE, ESPE) during three months. The initial data for the model where the false distances of the L1 and L2 carriers.

The results obtained from the vertical ionospheric delay can be found in the order of 4 meters, having a bigger influence at 15h00 hours.

From this model a mathematical model was generated using a multiple linear regression having as data the GPS day, the UTC hour of observation and the elevation angle, obtaining a model with a 0.781m precision compared to the model generated with the Fourier series.

**Key words:** GPS, Ionosphere, Linear regression

## 1. INTRODUCCIÓN

Las principales fuentes de error sistemáticos que afectan al posicionamiento con GPS (Sistema de Posicionamiento Global) están asociados al satélite (órbita, reloj, relatividad, etc.), a la propagación de la señal (refracción troposférica e ionosférica, interrupción de la señal, multicamino), al receptor / antena (reloj, centro de fase de la antena) y a la estación de rastreo (coordenadas, movimiento del polo, etc.) (Monico, 1995). Parte de estos errores pueden ser modelados o reducidos, si técnicas adecuadas de rastreo y procesamiento fueran adoptadas.

En ausencia de la limitación impuesta a los usuarios civiles por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos (DoD), a través de la adopción de la disponibilidad selectiva (SA), la ionosfera es la mayor fuente de error en el posicionamiento, con receptores GPS de simple frecuencia.

El error asociado a la refracción ionosférica, depende de diversas variables, tales como: ciclo solar, época del año, hora del día, localización geográfica y actividad geomagnética, es difícil de ser corregido. Por ejemplo, durante la actividad solar máxima y para satélites próximos al horizonte, pueden alcanzar los 100 metros (Newby y Langley, 1992).

Los receptores GPS de doble frecuencia permiten efectuar correcciones del efecto de refracción ionosférica, debido al hecho que la refracción es dependiente de la frecuencia de la señal. Esta estrategia permite obtener resultados que son prácticamente exentos de esos efectos, desde que es realizada en épocas de actividad solar mínima.

Los mensajes de navegación transmitidos por los satélites del sistema GPS contienen información que permiten efectuar correcciones de la ionosfera para receptores GPS de una frecuencia, utilizando el modelo de Klobuchar (Klobuchar, 1987). Varios estudios mostraron que este modelo puede eliminar alrededor del 50% del efecto total (Newby y Langley, 1992).

Por lo tanto, es necesario disponer de una estrategia más efectiva de eliminar los efectos de la ionosfera, esto se lo realiza mediante el uso de modelos regionales y locales para la ionosfera.

El objetivo de este trabajo es definir y establecer un modelo matemático que represente el comportamiento de la ionosfera; las estaciones de monitoreo continuo GPS (S061, CIE y ESPE) proporcionarán los datos de entrada para el modelo.

## 2. IONOSFERA

La atmósfera terrestre puede ser dividida en cuanto a la propagación de las señales GPS en troposfera e ionosfera, pues, las ondas electromagnéticas que se propagan en tales medios sufren diferentes influencias. La troposfera es la capa comprendida entre la superficie terrestre hasta aproximadamente 50 km de altura. Se trata de una zona neutral y la propagación de la señal depende principalmente del contenido de vapor de agua, la presión del aire y la temperatura de las capas atmosféricas.



La ionosfera abarca una región de entre 50 y 1000 km, se caracteriza principalmente, por la formación de iones y electrones. En esta región la densidad de iones y electrones es suficiente para alterar la propagación de ondas electromagnéticas que dependen de la frecuencia.

Las señales GPS, en su camino entre el satélite y la antena de la estación de rastreo, se propagan a través de la atmósfera, atravesando capas, que poseen características muy diferentes. Las variaciones pueden ocurrir tanto: en la dirección de propagación, en la velocidad de propagación y en la fuerza de la señal.

La ionosfera, como medio dispersivo, afecta a la modulación y a la fase de la portadora, haciendo que sufran, respectivamente un retraso y un avance (Leick, 1995). El retraso es referido también, como atraso ionosférico y aumenta la longitud aparente del camino recorrido por la señal.

Dado que el efecto de la ionosfera depende de la frecuencia, por lo tanto depende del índice de refracción y es proporcional al contenido total de electrones (CTE), o sea al número de electrones presentes a lo largo del camino de la señal entre el satélite y el receptor. El problema principal es que los CTE varía en el tiempo y en el espacio, en razón del flujo de ionización solar, actividad magnética, ciclo de manchas solares, estación del año, localización del usuario y dirección del rayo vector del satélite (Camargo, 1999).

El índice de refracción de fase y de grupo, considerando sólo los efectos de primer orden, está dada por:

$$n_f = 1 - \frac{40.3 n_e}{f^2} \quad (1)$$

$$n_g = 1 + \frac{40.3 n_e}{f^2} \quad (2)$$

donde  $n_e$  es la densidad de electrones, que está dada en unidades de electrones por metro cúbico ( $\text{el} / \text{m}^3$ ) y  $f$  es la frecuencia de la señal.

Para el retraso de grupo de la señal GPS desde el satélite ( $s$ ) hasta llegar a la estación ( $r$ ), la refracción ionosférica  $I_r^s$  está dada por (Leick, 1995):

$$I_r^s = \frac{40.3}{f^2} TEC \quad (3)$$

### 3. MODELOS EMPÍRICOS DE LA IONOSFERA

Algunos modelos permiten realizar la corrección del efecto de refracción ionosférica, la cuantificación de este efecto puede ser hecha a través de:

- ✓ Coeficientes transmitidos en los mensajes de navegación, utilizando el modelo Klobuchar;
- ✓ Observaciones realizadas con receptores GPS de una frecuencia;
- ✓ Observaciones realizadas con receptores GPS de doble frecuencia, modelo cual detallamos más adelante ya que el estudio se realizó con dichos receptores.

En este estudio, el modelo utiliza datos de receptores GPS de doble frecuencia, especialmente la de falsas distancias obtenidas a través de códigos. En la derivación del modelo, los errores debidos al no sincronismo del reloj del satélite y del receptor satélite, el error de las efemérides y de la refracción troposférica no serán consideradas, pues estos efectos contaminan cada una de las medidas efectuadas, en ambas frecuencias, de la misma manera en unidades de distancia.

El modelo se basa en la diferencia entre las falsas distancias ( $P_r^s$ ) de las portadoras  $L_2$  y  $L_1$ . Está dado por (Georgiadiou, 1994):

$$P_{2r}^s - P_{1r}^s = I_{2r}^s - I_{1r}^s + (S_{p2} - S_{p1}) + (R_{p2} - R_{p1}) + \varepsilon_{p21} \quad (4)$$

Utilizando la ecuación. (3) se obtiene la ecuación (5):

$$\begin{aligned} I_{2r}^s - I_{1r}^s &= 40.3 \text{ TEC} \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} \\ &= I_{1r}^s \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_2^2} = I_{1r}^s \frac{1}{F} \end{aligned} \quad (5)$$

así:

$$F(P_2 - P_1)_r^s = I_{1r}^s + F[(S_{p2} - S_{p1}) + (R_{p2} - R_{p1})] + F\varepsilon_{p21} \quad (6)$$

La ecuación (6) es utilizada para el cálculo del atraso ionosférico  $I_{1r}^s$  en la portadora  $L_1$ . Las diferencias  $(S_{p2} - S_{p1})$  y  $(R_{p2} - R_{p1})$  respectivamente representan el error sistemático interfrecuencia  $L_1$ - $L_2$  de los satélites y de los receptores y  $\varepsilon_{p21}$  las diferencias de los demás errores restantes.

El modelo desarrollado por Georgiadiou (1994) para modelar la ionosfera fue una contribución hacia el desarrollo de modelos regionales, una modificación en el modelo original ecuación (6), para calcular el atraso ionosférico a lo largo del camino del satélite/receptor fue realizado por Georgiadiou y Kleusberg (1988), así:

$$I_{1r}^s = \frac{I_1^v}{\cos(z^{1s})} \quad (7)$$

donde  $I_1^v$ , representa el retraso ionosférico vertical y  $z'$  el ángulo cenital del satélite (s), en el punto ionosférico IP (Figura 1) para una capa ionosférica de altitud media igual a 400 km.

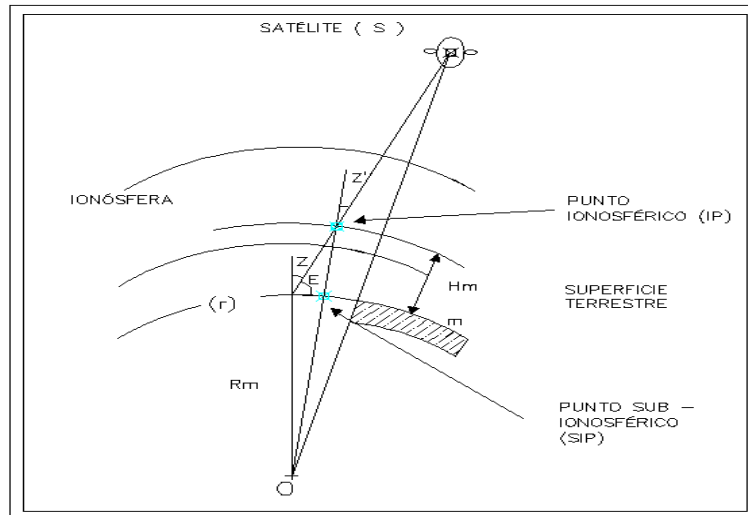


Figura. 1. Geometría para el Retraso del Camino Ionosférica

Fuente: Adaptado de Hofmann-Wellenhof (1993)

Así:

$$F(P_2 - P_1)_r = \frac{I_1^v}{\cos(z'^s)} + F \left[ (S_{p2} - S_{p1}) + (R_{p2} - R_{p1}) \right] + F \epsilon_{p21} \quad (8)$$

El término del lado izquierdo de la ecuación (8), representa el retraso ionosférico en la portadora L1, obtenidas a partir de las mediciones de las falsas distancias en ambas frecuencias. Georgiadiou (1994) utiliza la siguiente serie de Fourier ecuación (9), debido a la naturaleza periódica del efecto para representar el comportamiento diurno del retraso ionosférico vertical:

$$I_1^v = a_1 + a_2 B^s + \sum_{\substack{i=1 \\ j=2i+1}}^6 \left\{ a_j \cos(ih^s) + a_{j-1} \sin(ih^s) \right\} + a_{15} B^s h^s \quad (9)$$

La variable  $B^s$  representa la diferencia entre la latitud del receptor y la latitud del punto subionosférico (proyección de la latitud del punto ionosférico, en la capa ionosférica de altitud media, sobre la superficie de la Tierra).

La variable  $h^s$  está dado por:

$$h^s = \frac{2\pi}{T} (t - 14^t) \quad (10)$$

Donde:

$T$  representa el período de 24 horas y  $t$  la hora local del punto de subionosférico ambos en horas.

Cuando se utilizan falsas distancias, para modelar el atraso ionosférico, se tiene un total de 15 incógnitas que representan los coeficientes de la serie ( $a_1, a_2, \dots, a_{15}$ ). En este estudio no se toma en cuenta los errores sistemáticos de los receptores y de los satélites.

Los coeficientes del modelo se calculan mediante un ajuste por el método de mínimos cuadrados MMC usando el método paramétrico con condiciones (Gemael, 1994).

La matriz A, será formada por los coeficientes de los parámetros, está constituida de  $n$  líneas y  $15+r+s$  columnas, donde  $n$  representa el número de observaciones de las falsas distancias, derivada de  $L_1$  y  $L_2$  simultáneamente. Considerando apenas una época, para efecto de mostrar el patrón de la matriz A para cada uno de los  $r$  receptores y  $s$  satélites involucrados, se tiene que:

$$A = \begin{matrix} & a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & \dots & a_{15} & r_1 & r_2 & \dots & r_r & s_1 & s_2 & \dots & s_r \\ \left. \begin{matrix} r_1 \\ \\ \\ \end{matrix} \right\} & \begin{matrix} SF^{S1} & SF^{S1} B^{S1} & SF^{S1} \cosh^{S1} & SF^{S1} \sinh^{S1} & \dots & SF^{S1} B^{S1} h^{S1} & F & 0 & \dots & 0 & F & 0 & \dots & 0 \\ SF^{S2} & SF^{S2} B^{S2} & SF^{S2} \cosh^{S2} & SF^{S2} \sinh^{S2} & \dots & SF^{S2} B^{S2} h^{S2} & F & 0 & \dots & 0 & F & 0 & \dots & 0 \\ : & : & : & : & \dots & : & : & : & \dots & : & : & : & \dots & : \\ SF^{Ss} & SF^{Ss} B^{Ss} & SF^{Ss} \cosh^{Ss} & SF^{Ss} \sinh^{Ss} & \dots & SF^{Ss} B^{Ss} h^{Ss} & F & 0 & \dots & 0 & F & 0 & \dots & 0 \\ : & : & : & : & \dots & : & : & : & \dots & : & : & : & \dots & : \end{matrix} \\ \left. \begin{matrix} r_2 \\ \\ \\ \end{matrix} \right\} & \begin{matrix} SF^{S1} & SF^{S1} B^{S1} & SF^{S1} \cosh^{S1} & SF^{S1} \sinh^{S1} & \dots & SF^{S1} B^{S1} h^{S1} & F & 0 & \dots & 0 & F & 0 & \dots & 0 \\ SF^{S2} & SF^{S2} B^{S2} & SF^{S2} \cosh^{S2} & SF^{S2} \sinh^{S2} & \dots & SF^{S2} B^{S2} h^{S2} & F & 0 & \dots & 0 & F & 0 & \dots & 0 \\ : & : & : & : & \dots & : & : & : & \dots & : & : & : & \dots & : \\ SF^{Ss} & SF^{Ss} B^{Ss} & SF^{Ss} \cosh^{Ss} & SF^{Ss} \sinh^{Ss} & \dots & SF^{Ss} B^{Ss} h^{Ss} & F & 0 & \dots & 0 & F & 0 & \dots & 0 \\ : & : & : & : & \dots & : & : & : & \dots & : & : & : & \dots & : \\ : & : & : & : & \dots & : & : & : & \dots & : & : & : & \dots & : \\ : & : & : & : & \dots & : & : & : & \dots & : & : & : & \dots & : \end{matrix} \\ \left. \begin{matrix} r_3 \\ \\ \\ \end{matrix} \right\} & \begin{matrix} SF^{S1} & SF^{S1} B^{S1} & SF^{S1} \cosh^{S1} & SF^{S1} \sinh^{S1} & \dots & SF^{S1} B^{S1} h^{S1} & F & 0 & \dots & 0 & F & 0 & \dots & 0 \\ SF^{S2} & SF^{S2} B^{S2} & SF^{S2} \cosh^{S2} & SF^{S2} \sinh^{S2} & \dots & SF^{S2} B^{S2} h^{S2} & F & 0 & \dots & 0 & F & 0 & \dots & 0 \\ : & : & : & : & \dots & : & : & : & \dots & : & : & : & \dots & : \\ SF^{Ss} & SF^{Ss} B^{Ss} & SF^{Ss} \cosh^{Ss} & SF^{Ss} \sinh^{Ss} & \dots & SF^{Ss} B^{Ss} h^{Ss} & F & 0 & \dots & 0 & F & 0 & \dots & 0 \\ : & : & : & : & \dots & : & : & : & \dots & : & : & : & \dots & : \end{matrix} \end{matrix}$$

El vector  $L$  será igual al vector de las observaciones  $L_b$ , que está compuesto de la combinación lineal de las observables del mismo tipo, de dimensión  $n \times 1$ . Para los diversos receptores y satélites, considerando apenas una época se tiene que:



$$L_b = \begin{bmatrix} F(P_2^{S1} - P_1^{S1})_{r_1} \\ F(P_2^{S2} - P_1^{S2})_{r_1} \\ \vdots \\ F(P_2^{Ss} - P_1^{Ss})_{r_1} \\ \vdots \\ F(P_2^{S1} - P_1^{S1})_{r_2} \\ F(P_2^{S2} - P_1^{S2})_{r_2} \\ \vdots \\ F(P_2^{Ss} - P_1^{Ss})_{r_2} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ F(P_2^{S1} - P_1^{S1})_{r_r} \\ F(P_2^{S2} - P_1^{S2})_{r_r} \\ \vdots \\ F(P_2^{Ss} - P_1^{Ss})_{r_r} \\ \vdots \end{bmatrix}$$

Considerando que la combinación lineal de las observaciones son independientes, la MVC resultante será diagonal. Tomándose como desviación típica para las falsas distancias (C/A y P<sub>2</sub>), respectivamente, los valores de 1 m y 1.5 m, resultando (Tiberius *et al.*, 1999), después de la propagación, que:

$$\sigma_{L_b} = F \cdot 1.80 \text{ m}$$

donde  $F$  es una constante igual a  $F = \frac{f_2^2}{(f_1^2 - f_2^2)} \cong 1.546$

Si el producto de la matriz A, por un vector B cualquiera, no nulo, resulta una matriz nula, la matriz A presenta deficiencia de característica (AB=0, para B≠0); y la matriz N, resultante del producto A<sup>T</sup>PA será singular. En nuestro estudio el modelo presenta deficiencia de característica. Y, conforme dicho, la matriz N, en este caso, será singular. Su singularidad será eliminada, con la introducción de un número de condiciones igual al número de deficiencias de característica de la matriz, que en nuestro caso, es una. Esto implica que la tendencia interfrecuencia de los receptores o de los satélites tiene que ser determinada en relación a uno de ellos.

La condición puede ser introducida, con respecto a las tendencias, en uno de los receptores o en uno de los satélites. En nuestro caso la condición fue impuesta en el receptor (r), la matriz C, de dimensión (15 + r + s x 1) tiene el siguiente formato:

$$C = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & \dots & a_{15} & r_1 & \dots & r_i & \dots & r_r & s_1 & s_2 & \dots & s_s \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

El vector C es un vector n-dimensional, que contiene elementos unitarios para las observaciones a ser probadas, y cero para las otras posiciones. Un valor fue atribuido al error sistemático (R<sub>p2</sub> - R<sub>p1</sub>)<sub>r<sub>i</sub></sub> del receptor (r), también como una varianza o desviación típica para la condición.

Por tratarse con una cantidad abundante de datos para el cálculo de los coeficientes del modelo, se realizó un programa realizado en lenguaje computacional (Matlab) con lo cual se logró reducir el tiempo de la estimación de estos coeficientes de forma significativa. El programa se basa en el ajuste por el MMC usando el método paramétrico con condición, para lo cual se debe tener definidas todas las matrices y vectores que intervienen en el proceso como se explico anteriormente.

#### 4. MODELO MATEMÁTICO

El objetivo de un modelo matemático es entender ampliamente el fenómeno que se desea representar y predecir su comportamiento en el futuro (Stewart, 2002). Es importante mencionar que un modelo matemático no representa completamente los problemas de la vida real, de hecho, se trata de una idealización.

##### 1.1 REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE

El análisis de regresión es un modelo matemático que relaciona las variables conocidas con las desconocidas, dentro del cual se dice que la Regresión Múltiple es el proceso por el cual se usan varias variables para predecir otra.

La variable conocida se llama la variable independiente y la variable que se intenta predecir es la variable dependiente. La regresión múltiple busca usar varias variables independientes para construir una mejor ecuación de predicción. Cada variable independiente puede ser responsable en algo de la variabilidad de la variable dependiente. A menudo cuando se añaden variables independientes se puede mejorar la estimación de la predicción (Levin & Rubin, 1996).

Se trata de predecir el valor de una variable dependiente ( $y_i$ ) como función lineal de una familia de ( $j$ ) variables independientes explicativas ( $x_1, x_2, \dots, x_j$ ), a partir de una muestra de tamaño ( $i$ ) cuyas observaciones se ordenan matricialmente de la siguiente forma (Levin & Rubin, 1996):

$$\begin{bmatrix} y_1, x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1j} \\ y_2, x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2j} \\ \dots \dots \dots \\ \dots \dots \dots \\ y_i, x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij} \end{bmatrix}$$

Siendo  $y_i$  la  $i$ -ésima variable dependiente y  $x_j$  la  $j$ -ésima variable independiente explicativa asociada a la observación ( $i$ ).

De esta manera se ajustan los datos a un modelo expresado de la siguiente manera:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_j x_{ij} + e_i \quad (11)$$

Donde:

- $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_j$ : Coeficientes de regresión estimados
- $e_i$ : Error Observado (Error aleatorio)

El modelo expuesto anteriormente presenta la característica que el número de ecuaciones mayor que el número de incógnitas  $i > j$ .

## 1.2 ERROR ESTÁNDAR MÚLTIPLE DE ESTIMACIÓN

El error estándar describe la variación con respecto a la línea de regresión. Un error estándar pequeño indica que los puntos están cerca de la recta, mientras que un valor grande señalaba que los puntos estaban esparcidos alrededor de ella. La fórmula para calcular el error estándar viene dada por:

$$S_{y \cdot 12 \dots K} = \sqrt{\frac{\sum (Y - Y')^2}{n - (k + 1)}} \quad (12)$$

Donde:

$Y$  es la observación

$Y'$  es el valor estimado a partir de la ecuación de regresión

$n$  es el número de observaciones en la muestra

$k$  es el número de variables independientes

## 1.3 PRUEBA DE HIPÓTESIS DEL MODELO AJUSTADO

En este caso la hipótesis nula es  $H_0 : \beta_0 = \beta_1 = \beta_2 \dots = \beta_j = 0$  o sea, que el modelo no se ajusta, versus la hipótesis alterna  $H_1$ : Al menos uno de los coeficientes es distinto de cero, o sea, al menos una de las variables del modelo se ajusta.

Si la hipótesis nula no se rechaza se podrá concluir que ninguna de las variables en conjunto pueden explicar la variación; esto significa que es un modelo muy pobre y que debiera de ser reformulado (Levin & Rubin, 1996).

## 5. RESULTADOS

Los resultados obtenidos en este proyecto fueron la estimación del retraso ionosférico vertical mediante un modelo con series de Fourier  $Iv$  ecuación (9), en las estaciones S061-CIE-ESPE a las 14, 16, 18, 20, 22 y 24 horas UTC durante 38 días GPS de estudio; y la generación de un modelo matemático mediante una regresión lineal múltiple a partir del modelo de series de Fourier.

### 1.1 RETRASO IONOSFÉRICO VERTICAL $I_v$

A continuación se presentan los resultados de los valores del retraso ionosférico vertical  $I_v$  obtenidos a partir del modelo de series de Fourier ecuación (9).

En la Tabla 1, se indican los valores máximos del retraso ionosférico vertical en cada una de las estaciones, para diferentes días GPS de estudio, esto se lo realizó sacando el promedio del  $I_v$  de cada uno de los satélites rastreados a las 14, 16, 18, 20, 22 y 24 horas UTC.

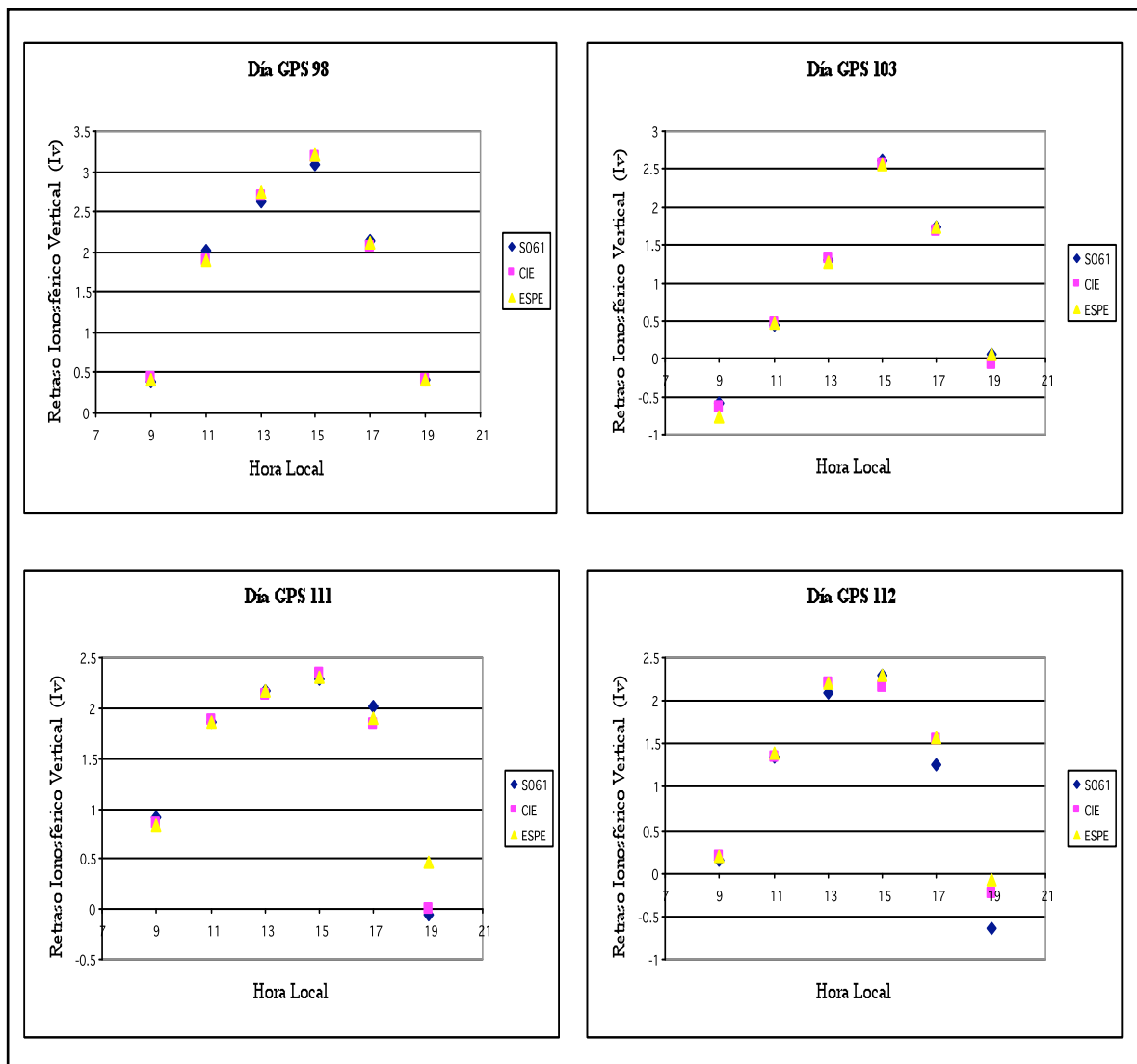
Tabla 1. Análisis de los valores máximos y mínimos de retraso ionosférico vertical ( $I_v$ ) de una muestra obtenida de una semana GPS en las Estaciones S061, CIE y ESPE.

Día GPS	Hora UTC	ESTACIONES		
		S061	CIE	ESPE
		$I_v$ (m)	$I_v$ (m)	$I_v$ (m)
41	14	-1.078	-1.149	-1.202
	16	1.005	0.967	0.986
	18	1.998	1.966	2.000
	20	<b>2.618</b>	<b>2.581</b>	<b>2.576</b>
	22	1.310	1.497	1.508
	24	0.056	0.276	0.465
42	14	-1.032	-1.714	-1.765
	16	0.656	0.756	0.651
	18	1.535	1.528	1.549
	20	1.766	1.781	1.812
	22	1.004	1.029	1.131
	24	-0.814	-0.829	-0.506
43	14	-0.129	-0.194	-0.234
	16	1.456	1.508	1.454
	18	2.087	1.983	2.027
	20	2.096	2.045	2.164
	22	0.992	0.821	0.961
	24	0.013	-0.226	-0.025
44	14	0.043	0.041	-0.067
	16	1.596	1.582	1.530
	18	1.558	1.540	1.599
	20	1.824	1.866	1.919
	22	0.652	0.540	0.584
	24	-0.879	-1.061	-0.835
<b>MAX</b>		2.618	2.581	2.576
<b>MIN</b>		-1.078	-1.715	-1.765

Como se puede observar en la Tabla 1. los valores máximos del  $I_v$  se dan a las 20 Horas UTC (15 Horas Locales), alcanzando valores de 2.62 metros en la estación S061, 2.58 metros en la estación CIE y ESPE, para el día GPS 41 en estudio.



En la Figura 2. se puede observar la relación entre el  $I_v$  y la Hora Local de Observación en las tres Estaciones, en diferentes días GPS de estudio.

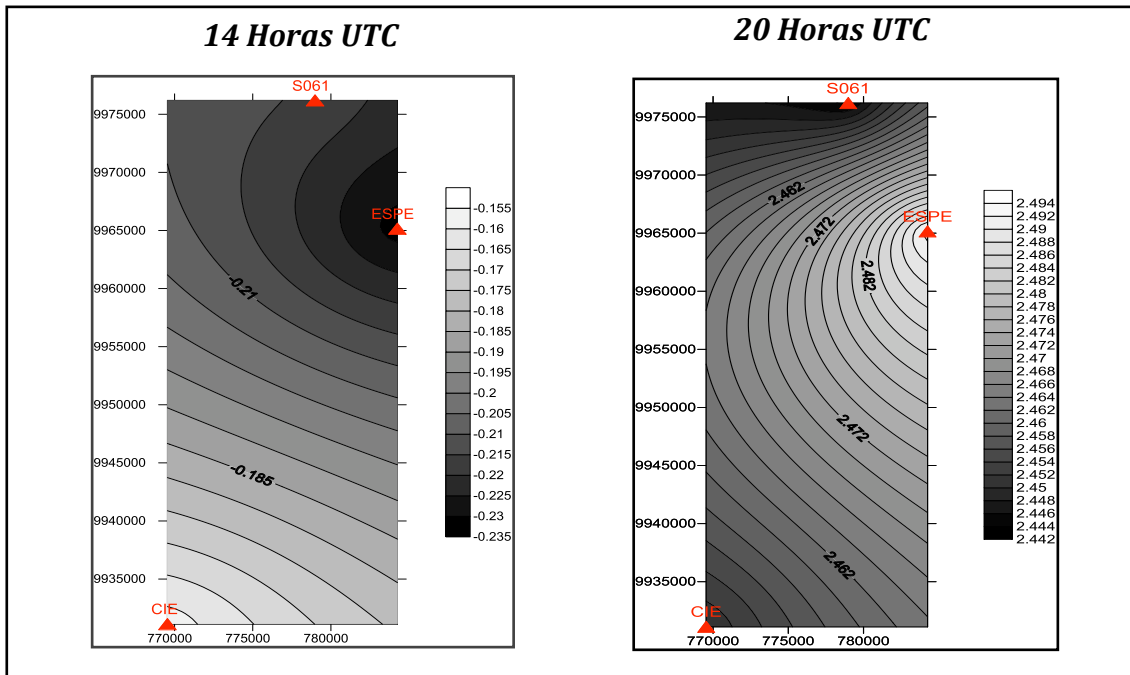


**Figura 2.** Relación entre el valor del Retraso Ionosférico Vertical ( $I_v$ ) y la Hora Local de observación en las Estaciones S061, CIE y ESPE.

Como se puede observar en las 4 gráficas se mantiene una misma tendencia en las tres estaciones, teniendo los valores máximos de  $I_v$  a las 15 Horas Locales (20 Horas UTC), alcanzando valores máximos hasta de 3 metros.

Usando los valores de las medias del retraso ionosférico vertical, para cada hora (14, 16, 18, 20, 22 y 24 Horas UTC) para todos los días de estudio (38 días), en las estaciones S061, CIE y ESPE se realizó una interpolación de Kriging tomado en cuenta las coordenadas (Este y Norte) de las estaciones de monitoreo continuo GPS, se realizó los mapas de retraso ionosférico vertical.

En la Figura 3 se indican los mapas de retraso ionosférico vertical a las 14 y 20 Horas UTC.



**Figura 3.** Mapa de Retraso Ionosférico Vertical (Iv) para las 14 y 20 Hora UTC en las Estaciones S061, CIE y ESPE.

Como se puede observar el valor máximo de retraso ionosférico vertical se da a las 20 horas UTC en la estación ESPE con un valor de 2.494 metros, seguida de la estación CIE con un valor de 2.45 metros y la estación S061 con un valor de 2.444 metros.

## 1.2 MODELO OBTENIDO DE LA REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE

Para el modelo matemático, lo primero que se hizo es una depuración de datos analizando y eliminando los datos atípicos o fuera de rango. Una vez depurada la base de datos se realizó un primer análisis ANOVA entre las variables Día GPS, Hora UTC y Estación, con un nivel de significancia al 5% ( $\alpha$ ) y un test de Duncan; dando como resultado que la variable Estación no interfiere en el cálculo del retraso ionosférico vertical.

Se procede a realizar un segundo análisis ANOVA, para determinar la existencia de alguna relación estadísticamente significativa entre el retraso ionosférico vertical con el día GPS y la hora UTC, con un nivel de significancia al 5% ( $\alpha$ ) y un test de Duncan; el mismo que permite realizar la comparación de las medias dentro del segmento de datos existentes; dando como resultado que sí existen diferencias significativas tanto en el Día GPS como en la hora UTC.

De esta manera, se procede a realizar una Regresión Lineal Múltiple, para determinar si existe alguna relación estadísticamente significativa entre el retraso ionosférico vertical con el día GPS, la hora UTC, el ángulo de elevación y el acimut, con un nivel de significancia al 1% ( $\alpha$ ); dando como resultado un modelo con un Coeficiente de Determinación de 0.0808 el cual es un valor muy bajo que indica que el modelo no se ajusta mucho a la realidad.

Es por esta razón que se procede a realizar una segunda regresión lineal múltiple de tercer orden para la hora. En este análisis se llega a establecer si existe relación estadísticamente significativa entre el retraso ionosférico vertical con el día GPS, la hora UTC, el ángulo de elevación y el acimut, con un nivel de significancia al 1% ( $\alpha$ ); dando como resultado que el Acimut no es significativo.

De esta manera se procede a realizar una tercera regresión lineal múltiple. En este análisis se llega a establecer si existe relación estadísticamente significativa entre el retraso ionosférico vertical con el día GPS, la hora UTC y el ángulo de elevación, con un nivel de significancia al 1% ( $\alpha$ ), ya no se considera al acimut ya que con el análisis anterior se demostró que esta variable no interfiere en el cálculo del retraso ionosférico vertical.

Dando como resultado la Tabla 2:

Tabla 2. Resultados Regresión Lineal Múltiple

<b>Estadísticas de la regresión</b>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.84307465
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.71077486
R <sup>2</sup> ajustado	0.71048575
Error típico	0.62424628
Observaciones	5008

<b>ANÁLISIS DE VARIANZA</b>					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	5	4790.17784	958.035568	2458.497104	0
Residuos	5002	1949.19648	0.38968342		
Total	5007	6739.37432			
	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	
Intercepción	19.6615269	2.19610426	8.95291142	4.79488E-19	
DÍA GPS	0.00621615	0.00033896	18.3386617	9.41005E-73	
HORA UTC	-5.04163852	0.35847004	-14.0643234	4.31266E-44	
H2	0.36957009	0.01917796	19.2705683	7.01027E-80	
H3	-0.00808378	0.00033646	-24.0256766	8.3123E-121	
ÁNGULO DE ELEVACIÓN	-0.14751882	0.02927435	-5.03918323	4.83989E-07	

Los  $p$ -valores indican que se rechaza  $H_0$ , es decir los coeficientes son diferentes de cero. Así este modelo se ajusta muy bien a las necesidades que requerimos, ya que el valor del Coeficiente de Determinación ( $R^2$ ) es de 0.7107 el cual es un valor que se ajusta mucho a la realidad. Por lo tanto el modelo de retraso ionosférico vertical  $Iv$ , obtenido es el siguiente:

$$Iv = 19.6615 + 0.006216 * \text{Día GPS} - 5.0416 * \text{Hora UTC} + 0.36957 * (\text{Hora UTC})^2 - 0.008083 * (\text{Hora UTC})^3 - 0.147518 * \text{Ángulo de elevación}$$

Por ejemplo para:

<b>Iv MODELO</b>	<b>2.158</b>
DÍA GPS	41
HORA UTC	20
ÁNGULO DE ELEV	0.562
<b>Iv serie Fourier</b>	<b>2.404</b>

El valor de 2.158 metros es el valor obtenido con el modelo de regresión lineal múltiple, el mismo que se acerca al valor obtenido con el modelo de serie de Fourier que es 2.404 metros, para el Día GPS 41, a las 20 Horas UTC de observación y con un ángulo de elevación de 0.562 rad. Con este modelo se logró estimar el  $Iv$  con un error estándar múltiple de  $\pm 0,781$  metros.

## 6. CONCLUSIONES

- Los valores máximos de retraso Ionosférico vertical  $Iv$  obtenido con el modelo de Georgiadiou fueron aproximadamente de 4 metros, los cuales están dentro de los parámetros establecidos.
- En los cálculos de los resultados del retraso ionosférico vertical  $Iv$  se obtienen valores negativos, debido a que existen fallas en los archivos Rinex tanto de la estación CIE como ESPE, como también a que en el modelo no se tomó en cuenta los errores interfrecuencias de los receptores y de los satélites.
- Se recolectaron datos de tres meses obteniendo una tendencia similar diaria y mensual en el comportamiento de la ionosfera, obteniendo resultados de  $Iv$  con mayor influencia a las 20 Horas UTC (15 horas locales).
- El modelo matemático generado mediante una regresión lineal múltiple se ajusta de manera adecuada a nuestros requerimientos, y nos permite estimar el valor de  $Iv$  en los puntos S061, CIE y ESPE con una precisión de  $\pm 0,781$  metros.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Escuela Politécnica del Ejército, a través del Centro de Investigaciones Espaciales y al Centro de Investigaciones Científicas por el apoyo técnico recibido para la ejecución de este proyecto.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Camargo, P., Modelo regional de la Ionosfera para uso en Posicionamiento con Receptores GPS de una Frecuencia, **Tesis de Doctorado**, p., 1999.
- Gemael, C.. **Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas**. Curitiba: Ed. UFPR, 1994.
- Georgiadiou, Y., kleusberg, A.. On the effects ionospheric delay on geodetic relative GPS positioning. **Manuscripta Geodaetica**, v. 13, n.1, p. 1-8, 1988.
- Georgiadiou, Y.. Modelling the ionosphere for an active control network of GPS stations. **LGR-Series\_Publications of the Delft Geodetic Computing Centre**, Delft University of Tecnology, n.7, Dec. 1994.
- Hofmann-wellenhof, B.; lichtenegger, H.; Collins, J.. **Global Positioning System Theory and Practice**. 2.ed. New York: Springer-Verlag, 1993.
- Klobuchar, J.A.. **Global Positioning System. Theory and Applications**, Volumen 1,P 504-506, 1995.
- Matsuoka, M.T, Avaliação de Funções para modelagem do efeito da refração ionosférica na propagação dos sinais GPS. Presidente Prudente, 2003. **Dissertação** (Mestre em Ciências Cartográficas), Universidad Estadual Paulista.
- Newby, S.P.; langley, R.B.. **Three alternative empirical ionospheric models – are they better than GPS broadcast model?**, In : Proceedings of the Sixth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Columbus, OH, USA, Mar. 16-2, v.1, p.240-244. 1992.
- Rodríguez C., Modelo Regional da Ionosfera (MOD\_ION): Implementação em tempo real. Presidente Prudente, 2005. **Dissertação** (Mestre em Ciências Cartográficas), Universidad Estadual Paulista.
- Sardon, E.; Ruis, A.; Zarraoa, N. Estimation of the transmitter and receiver differential biases and the ionospheric total electrón content from Global Positioning System observation. **Radio Science**, v.29, p.557-586,May/June, 1994.
- Seeber, G. **Satellite Geodesy : Foundations, Methods and Applications**. Berlin-New York : Walter de Gruyter, 1993.
- Tierra, A. **Sistema de Posicionamiento Global por Satélites GPS**. Facultad de Ingeniería Geográfica, Escuela Politécnica del Ejercito, p. 10-20, 1995.
- Webster, I. A Regional Model for Prediction of Ionospheric Delay for Single Frequency Users of the Global Positioning System. New Brunswick, 1993. M.Sc.E Thesis - Departament of Surveying Engineering, University of New Brunswick.



