

REVISTA
GEO CIENCIAS
& DATOS

INSTITUTO • GEOGRÁFICO • MILITAR



12ava. EDICIÓN | abril 2024



www.geograficomilitar.gob.ec / www.geoportaligm.gob.ec



MINISTERIO DE
DEFENSA
NACIONAL



INSTITUTO
GEOGRÁFICO
MILITAR







Presentación

Al conmemorar los 96 años de vida institucional, tiempo en el cual el Instituto Geográfico Militar del Ecuador, ha sido testigo y actor fundamental en la historia de nuestra nación, contribuyendo de manera significativa al desarrollo y la defensa de nuestros recursos geográficos y territoriales, es un momento propicio para reflexionar sobre nuestros logros, reconocer el esfuerzo de cada uno de nuestros colaboradores y renovar nuestro compromiso con la excelencia y la innovación en el ámbito geográfico y cartográfico, además del trabajo incansable en la producción de especies valoradas y documentos de seguridad y la difusión de las ciencias geoespaciales.

Nuestra institución ha sido un pilar fundamental en el avance de la cartografía, la geodesia y la geografía en el país, marcando hitos importantes en la producción de mapas, la generación de información geoespacial de calidad y la investigación científica en estas disciplinas.

A lo largo de nuestra historia, hemos enfrentado desafíos y superado obstáculos, siempre con la convicción de servir a la patria y contribuir al desarrollo sostenible del territorio nacional. En este nuevo ciclo que iniciamos, reafirmamos nuestro compromiso con la modernización, la tecnología de vanguardia y la formación continua de nuestro talento humano, con el firme propósito de seguir siendo referentes en el ámbito geoespacial a nivel nacional e internacional.

La presente revista recoge en sus páginas, nuestro compromiso en la promoción del conocimiento avanzado, la innovación y la colaboración interdisciplinaria, con el objetivo de contribuir al progreso y la excelencia en el campo de la geografía y cartografía, brindando la oportunidad de sumergirse en los análisis profundos y las investigaciones vanguardistas, recursos valiosos para trabajos técnicos y aportes importantes para el desarrollo profesional.

GRAB JAIME A. NAVARRETE B.
DIRECTOR DEL INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR

Editorial

La revista Geo Ciencias y Datos, editada de manera anual por el Instituto Geográfico Militar, tiene como objetivo principal, recopilar y difundir de manera sintetizada las diversas actividades técnicas y de innovación que se realizan en las diferentes Direcciones en beneficio de la seguridad, defensa y desarrollo del país.

Se invita al lector a sumergirse en el fascinante mundo de la geografía y cartografía a través de la lectura de esta revista especializada. Se explora temas claves como el análisis geográfico, la calidad de la producción cartográfica y la historia reciente de la elaboración de pasaportes electrónicos en el contexto actual.

Además, se aborda la teledetección aplicada a riesgos naturales, el mapeo rápido de inundaciones y la zonificación paisajista, ofreciendo perspectivas únicas sobre cómo estas tecnologías y metodologías están transformando la manera en que comprendemos nuestro entorno.

De igual forma se analiza en profundidad el uso de datos GNSS, la interpolación de la gravedad y el control horizontal, temas fundamentales para aquellos interesados en la precisión y la exactitud en temas específicos.

MAYO DE E WILMER GALARZA
PRESIDENTE DEL COMITÉ EDITORIAL

CRÉDITOS

Autoridades:

GRAB Jaime A. Navarrete B. / Director del IGM
CRNL DE CSM Humberto Parra / Subdirector del IGM

Comité Editorial:

MAYO DE E Wilmer Galarza
Dra. Rosa Cuesta
Dra. Martha Villagómez
Dra. Paulina Guerrón
PhD (c). Francisco Cabrera

Diseño y Diagramación:

Diseño Subproceso Mapas Temáticos:
Ing. Danny Lincango
Portada:
Ing. Daniel Padilla

Revista Geociencias & Geodatos, año 2024
Instituto Geográfico Militar – 12ava. Edición
ISSN: 2477-9040

Se autoriza su reproducción con mención de la fuente.

Las ideas y opiniones contenidas en los trabajos y artículos son de responsabilidad exclusiva de los autores y no expresan necesariamente el punto de vista del Instituto Geográfico Militar.

Impresión:

Dirección de Imprenta de Geoinformación y Seguridad Documentaria - IGM.

Disponible en:

<http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/revista-geografica-igm/>



ÍNDICE

■ Propuesta metodológica para evaluar la calidad de la cartografía base con fines catastrales urbanos _____	9
■ Teledetección aplicada a los desastres - El uso de Google Earth Engine como herramienta automatizada para determinar zonas de cambio y cálculo de población potencialmente afectada _____	19
■ Mapeo rápido de inundaciones y sus impactos en el territorio nacional utilizando datos SAR de Sentinel-1 con el software ENVI-SARscape _____	28
■ Metodología para el modelamiento de las variables biofísicas para la determinación de la capacidad de acogida del territorio _____	38
■ Geo-tecnologías aplicadas en la determinación de la aptitud física constructiva de la ciudad de Portoviejo _____	46
■ Zonificación paisajística con enfoque territorial del cantón La Libertad, provincia de Santa Elena _____	55
■ Estimación de velocidades funcionales durante el diseño de vehículos aéreos no tripulados de ala fija _____	66
■ Interpolación de gravedad sobre referencias de nivel para la compensación de la Red de Control Vertical de Ecuador _____	75
■ Soluciones y precisiones de posicionamiento de datos GNSS de estaciones REGME, con constelaciones GPS y GLONASS, empleando software científico GAMIT/GLOBK y Bernese _____	85
■ Evolución del pasaporte ecuatoriano: De la historia a la modernización _____	96



Propuesta metodológica para evaluar la calidad de la cartografía base con fines catastrales urbanos

Methodological proposal for the control and evaluation of the quality of base mapping for urban cadastral purposes

Amanda Chiriboga Becerra
gabriela.chiriboga@geograficomilitar.gob.ec

Washington Vinueza Burbano
washington.vinueza@geograficomilitar.gob.ec

Álvaro Dávila Granda
alvaro.davila@geograficomilitar.gob.ec

RESUMEN

La evaluación de la calidad que se realiza a la cartografía base, que posteriormente es utilizada en la cartografía catastral, es el proceso más importante dentro de la producción cartográfica; la cual, consiste en someter la cartografía a una serie de análisis, con el objeto de verificar si dicho producto cumple con las normas cartográficas aplicadas en su elaboración.

En este artículo se utiliza el método propuesto por Thomas L. Saaty, que corresponde al Proceso de Análisis Jerárquico, (AHP, por sus siglas en inglés); el cual, permite de una manera gráfica y eficiente organizar la información de un problema. Para este caso, se plantea la utilización de este método, como parte de la metodología para la determinación de las variables

ponderadas, considerando los factores más importantes en la evaluación de la calidad, de acuerdo a los elementos del Catálogo de Objetos con fines catastrales escala 1:1000 (IGM, 2022) y, los parámetros de calidad (Norma ISO 19157), los cuales se basan en juicios y/o criterios de expertos, manifestados a través de comparaciones por pares mediante una escala de preferencia.

Para la aplicación de la propuesta metodológica, se selecciona la cartografía fiscalizada y aprobada del cantón Pangua, Provincia de Cotopaxi, dando como resultado un porcentaje de aciertos del 90,45% en las variables ponderadas, concluyendo la aprobación de la cartografía con fines catastrales, que asegura la calidad de la cartografía evaluada y optimiza tiempos.

Palabras clave: Evaluación de la calidad, cartografía base, cartografía catastral, variables ponderadas, catálogo de objetos.

ABSTRACT

The quality evaluation carried out on the base cartography, which is subsequently used in cadastral cartography, is the most important process within cartographic production; which consists of subjecting the cartography to a series of analyses, in order to verify whether said product complies with the cartographic standards applied in its preparation.

This article uses the method proposed by Thomas L. Saaty, which corresponds to the Hierarchical Analysis Process, (AHP); which allows you to organize information about a problem in a graphic and efficient way. For this case, the use of this method is proposed, as part of the methodology, for determining the weighted variables, considering the most important factors in the evaluation of quality, according to the elements of the Catalog of Objects for cadastral purposes. scale 1:1000 (IGM, 2022) and the quality parameters (ISO 19157 Standard), which are based on ex-pert judgments and/or criteria, expressed through pairwise comparisons using a preference scale.

For the application of the methodological proposal, the audited and approved cartography of the Pangua canton, Province of Cotopaxi, is selected, resulting in a percentage of correctness of 90,45%, in the weighted variables, concluding the approval of the cartography for cadastral purposes, which ensures the optimal quality of the evaluated cartography and optimizes times.

Keywords: Quality evaluation, base cartography, cadastral cartography, weighted variable, catalog of objects.

INTRODUCCIÓN

La cartografía base constituye el insumo principal para la generación de la cartografía catastral (manzanas, predios, construcciones, bloques), la misma presenta errores e incertidumbres, por ejemplo: esquemas de clasificación, calidad de las imágenes, ejecución del control, clasificación de campo y escala del producto, etc. (Ariza-López, Francisco Javier, 2013), cuyos errores se clasifican en errores groseros, sistemáticos y aleatorios.

En términos de calidad, la validación de la cartografía debe ajustarse a normativas y estándares que permitan

una mejora continua, en la elaboración de productos cartográficos ajustados a los requerimientos de los usuarios. (Ariza-López, 2013).

En el presente trabajo, se utiliza el método multicriterio denominado: “Proceso Analítico Jerárquico” (AHP), publicado en 1980 por el matemático Thomas L. Saaty, que permite reflejar las prioridades de las variables consideradas en el control de la calidad de la cartografía básica con fines catastrales urbanos. (Hurtado T, Gérard B, 2019).

PERFIL DE LA PROBLEMÁTICA

La cartografía catastral se genera a partir de la digitalización de la cartografía base, obtenida mediante diferentes técnicas y/o métodos: restitución aerofotogramétrica, digitalización sobre ortofotos, levantamiento topográfico tradicional o LIDAR. Este insumo es fundamental para la elaboración e implementación de catastros masivos multifinalitarios de áreas urbanas, ya que la complejidad de los problemas territoriales acometidos y, el gran volumen de datos a tratar, aconsejan la utilización de las nuevas Tecnologías de la Información Geográfica (TIG), como procedimiento para automatizar y gestionar, de manera eficaz la información georreferenciada.

La evaluación de la calidad para el producto cartográfico con fines catastrales urbanos, permite verificar, que la cartografía elaborada se encuentre dentro de un nivel de calidad $\geq 90\%$.

En el campo del catastro, este porcentaje corresponde a una “Clase: A-1, Categoría: Excelente, Uso: Adecuado, de acuerdo a las especificaciones del IPGH (IPGH, 1978).

El Instituto Geográfico Militar (IGM), ejecuta este proceso a través de dos etapas, que abarcan los elementos de la calidad de la Norma ISO 19113:

- Primera etapa: corresponde la validación de exactitud posicional de la cartografía en campo.
- Segunda etapa: corresponde la evaluación de la compleción, consistencia lógica y la exactitud temática de la cartografía en gabinete.

Con la finalidad de mejorar este proceso y optimizar tiempos, se considera el requerimiento del cliente externo (consultores), respecto a la demora que existe en los plazos de validación de la información y, la rigurosidad

que utiliza el Instituto en el proceso de evaluación de la calidad, correspondiente a la compleción, consistencia lógica y la exactitud temática.

Al constituir un control no supervisado (realizado en gabinete) y, tomando en consideración la relación del tiempo con las fases del proyecto hasta obtener la cartografía catastral; se propone una propuesta metodológica en donde, se realiza una ponderación de variables que diferencie el grado de importancia de los objetos geográficos que intervienen en la evaluación de la calidad de la cartografía con fines catastrales urbanos.

OBJETIVO

Proponer una metodología efectiva, en la evaluación de la calidad de cartografía con fines catastrales urbanos

MATERIALES Y MÉTODOS

Fuentes de información

Para el desarrollo del presente trabajo, se utiliza los archivos cartográficos del repositorio del IGM y de los documentos normados para la fiscalización de proyectos catastrales urbanos, como se menciona a continuación

- Proyecto de fiscalización de la cartografía base con fines catastrales urbano.
- Memoria técnica, ortofotos, informes de aprobación, entre otros.

- Protocolo de fiscalización de cartografía base con fines catastrales urbanos, (IGM, 2022 versión 5.0).

- Catálogo de objetos para catastro urbano, (IGM, 2022 versión 5.0).

METODOLOGÍA

Método de Jerarquías Analíticas (AHP) como método de ponderación de variables cuantitativas

El AHP, es una herramienta de apoyo para la toma de decisiones multicriterio, está basado en el principio de la experiencia y el conocimiento de diferentes expertos, manifestados a través de comparaciones por pares mediante una escala de preferencia; para lo cual, es fundamental elegir los criterios, los cuales deben estar definidos, ser relevantes y mutuamente excluyentes (independencia entre ellos) (Saaty, 1980).

El resultado del AHP, es una jerarquización con prioridades que muestran la preferencia global para cada una de las alternativas de decisión.

Jerarquización de criterios

El AHP, se utiliza para realizar las comparaciones cuantitativas, basándose en escalas de razón en términos de preferencia, importancia o probabilidad, sobre la base de una escala numérica, que va desde uno hasta nueve (Tabla 1), para calificar las preferencias relativas del par de elementos.

ESCALA NUMÉRICA	ESCALA VERBAL
1	Igual importancia importante de un elemento con otro
3	Moderadamente mas importante un elemento que otro
5	Fuertemente mas importante un elemento que otro
7	Mucho más fuerte la importante de un elemento que otro
9	Extremadamente mas importante de un elemento que otro

Tabla 1.- Escala de comparaciones cuantitativas o cualitativas de Saaty.
 Fuente: Toskano - Hurtado, 2017.

Toma de decisiones multicriterio

La toma de decisiones multicriterio trabaja con un número finito (que generalmente es pequeño) de alternativas determinadas, $A = \{A1, A2...Am\}$, del cual se conoce además su evaluación sobre cada uno de las variables, $V1, V2, ... Vn$, de carácter cuantitativo o cualitativo y que se representa a través de la denominada matriz de decisión. (Ávila-Mogollón, 2000). Tabla 2. En donde:

- $V1...Vn$: Variables principales que integran el análisis.
- $a2, a3, b3...an, bn, cn$: valores numéricos asignados a las variables de acuerdo a la escala de Saaty.
- $P1...pn$: Pesos asignados a las variables, luego del proceso de jerarquización de las variables.

Consistencia de la matriz

Una consideración importante, en términos de la calidad de la decisión final, se refiere a la consistencia (la matriz no debe contener contradicciones en la valoración realizada) de los juicios que muestra el tomador de decisiones en el transcurso de la serie de comparaciones pareadas, lo que permite valorar la relación de los criterios entre sí.

La consistencia se obtiene mediante el índice de consistencia (IC) donde λ_{max} es el máximo autovalor y n es la dimensión de la matriz de decisión. Un índice de consistencia igual a cero significa que la consistencia es completa. Una vez obtenido IC, se obtiene la razón de consistencia (RC) siendo aceptado siempre que no supere los valores indicados en la Tabla 3. Si en una matriz se supera el RC máximo, hay que revisar las ponderaciones.

IC: Índice de consistencia

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

Razón de consistencia

$$RC = \frac{IC}{IA} \quad (2)$$

Si la razón de consistencia es inconsistente, quien toma las decisiones debe reconsiderar y posiblemente modificar sus juicios sobre las comparaciones pareadas antes de continuar el análisis.

Si $RC \leq 0,10$: Consistencia aceptable

Si $RC \geq 0,10$: Inconsistencia

VARIABLES	V1	V2	V3	.....	VN	PESOS
A1	1		a2	a3	an	P1
A2	1/a2	1		b3	bn	P2
A3	1/a3	1/b3	1		cn	P3
.....	.....	.....	.....	1	.....	.....
FVn	1/an	1/bn	1/cn	.....	1	Pn

Tabla 2.- Matriz de comparación por pares de Saaty.
Fuente: Saaty, 1980.

No. DE ELEMENTOS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice de consistencia Aleatorio (IA)	0	0	0,58	0,89	1,11	1,24	1,32	1,40	1,45	1,49

Tabla 3.- Índice Aleatorio.
Fuente: Saaty, 1980.

Agrupación de variables

Las variables que se consideran en la ponderación, pertenecen a los elementos geográficos que forman parte del Catálogo de Objetos de la cartografía base con fines catastrales urbanos (IGM, 2022 versión 5.0); en el cual, se realiza seis (6) agrupaciones de elementos (A – F), de acuerdo al orden de importancia que tienen en la elaboración de cartografía catastral, conforme los juicios y criterios de los expertos (Tabla 4).

No.	VARIABLE	AGRUPACION DE VARIABLES	JUSTIFICACION
1	Vía o ruta	A	La vialidad y la hidrografía constituyen el esqueleto de la cartografía
2	Parqueadero		
3	Paseo peatonal/Ciclovía		
4	Túnel		
5	Acequia		
6	Lago o Laguna		
7	Acueducto o Canal		
8	Rio		
9	Zanja		
10	Orilla		
11	Edificio	B	Los objetos cerca y muro delimitan los predios
12	Cerca		
13	Muro		
14	Escalinata		
15	Acera	C	Estos objetos se utilizan en la construcción de la unidad cartográfica de estudio que es la manzana catastral.
16	Bordillo		
17	Cuneta		
18	Gasolinera	D	Formar parte del equipamiento urbano para la elaboración de cartografía temática con fines valorativos.
19	Plaza pública		
20	Cancha		
21	Estadio		
22	Parque		
23	Piscina		
24	Plaza de toros		
25	Cementerio		
26	Aeropuerto		
27	Isla	E	Objetos secundarios
28	Puerto		
29	Granja acuática		
30	Invernadero		
31	Punto de control		
32	Puente	F	
33	Cuneta		
34	Ferrocarril		
35	Intercambiador vial		

Tabla 4.- Agrupación de variables de acuerdo a su importancia.
 Fuente: Elaboración autores.

Elaboración de matrices de ponderación

En primer lugar, se llena la matriz de jerarquización de variables, según la escala de Saaty (ver Tabla 5) por columnas, comparando las variables de las filas con las variables de cada columna.

Del análisis de la matriz de jerarquización de variables, se deduce que las variables que se encuentran en las filas, son menos importantes que las variables que se encuentran en la primera columna; es decir, las variables de los primeros grupos (A, B y C) se consideran más relevantes, para la elaboración de la cartografía catastral. Ante lo expuesto, se genera una matriz de “pesos” correspondientes a los juicios de los expertos.

Una vez obtenida la matriz de jerarquización de variables (pesos de las variables) de manera global, el siguiente paso es normalizar dicha matriz, mediante la ecuación de normalización $V_{ij} = a_{ij} / \sum a_{ij}$; en la cual, sumamos la primera columna y dividimos cada elemento de esta columna para su sumatoria total; y, así sucesivamente con el resto de columnas como se muestra en la Tabla 6.

Con la matriz normalizada de la Tabla 6, se calcula el vector promedio de cada variable; el cual, es el promedio de la suma de las filas de los valores normalizados de cada uno de los criterios, dividido por el número de variables, como se observa en la Tabla 7.

VARIABLE	GRUPO A	GRUPO B	GRUPO C	GRUPO D	GRUPO E	GRUPO F	SUMA	PESO PONDERADO
GRUPO A	1	3	5	7	9	9	34,00	0,40
GRUPO B	1/3	1	3	5	7	7	23,33	0,27
GRUPO C	1/5	1/3	1	3	5	5	14,53	0,17
GRUPO D	1/7	1/5	1/3	1	3	3	7,68	0,09
GRUPO E	1/9	1/7	1/5	1/3	1	1	2,79	0,03
GRUPO F	1/9	1/7	1/5	1/3	1	1	2,79	0,03
TOTAL	1,90	4,82	9,73	16,67	26,00	26,00	85,12	1

Tabla 5.- Matriz de jerarquización de las variables.
Fuente: Elaboración autores.

MATRIZ NORMALIZADA					
0,53	0,62	0,51	0,42	0,35	0,35
0,18	0,21	0,31	0,30	0,27	0,27
0,11	0,07	0,10	0,18	0,19	0,19
0,08	0,04	0,03	0,06	0,12	0,12
0,06	0,03	0,02	0,02	0,04	0,04
0,06	0,03	0,02	0,02	0,04	0,04
1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabla 6.- Matriz normalizada. Juicio del tomador de decisión 1.
Fuente: Chiriboga G, 2023.

VECTOR PROMEDIO	VECTOR FILA	COCIENTE
0,46	3,06	6,62
0,25	1,68	6,58
0,14	0,88	6,28
0,07	0,44	6,02
0,03	0,21	6,10
0,03	0,21	6,10
1,00	6,48	$\Lambda_{max} = 6,28$

Tabla 7.- Resultado de jerarquización de las variables.
Fuente: Chiriboga G, 2023.

La consistencia de la matriz de jerarquización de variables se obtiene de la fórmula 2; la cual indica que, los juicios de los tres tomadores de decisiones son consistentes, ya que los valores de la razón de consistencia no difieren a 0,10 (Tabla 8).

TOMADOR DE DECISIÓN 1	RC= 0,042 Consistencia aceptable
TOMADOR DE DECISIÓN 2	RC= 0,021 Consistencia aceptable
TOMADOR DE DECISIÓN 3	RC= 0,018 Consistencia aceptable

MATRIZ PROPIA			
VARIABLE	EXPERTO 1	EXPERTO 2	EXPERTO 3
GRUPO A	0,4750	0,4930	0,4610
GRUPO B	0,2570	0,2060	0,2270
GRUPO C	0,1350	0,1300	0,1350
GRUPO D	0,0680	0,0810	0,0860
GRUPO E	0,0330	0,0540	0,0550
GRUPO F	0,0330	0,0360	0,0360

Tabla 8.- Ponderación de los criterios de los expertos (IGM), en función de las variables.
Fuente: Chiriboga G, 2023.

Para obtener el juicio final de los expertos, se promedia los valores obtenidos en la matriz propia (Tabla 8); el cual, va a proporcionar una medida cuantitativa de los juicios de valor asignados a las variables de la matriz de comparación por pares, como se muestra en la Tabla 9.

VARIABLE	PONDERACIÓN FINAL	PORCENTAJE (%)
GRUPO A	0,4763	47,63
GRUPO B	0,2300	23,00
GRUPO C	0,1333	13,33
GRUPO D	0,0783	7,83
GRUPO E	0,0473	4,73
GRUPO F	0,0350	3,50

Tabla 9.- Promedio de las ponderaciones finales de los expertos (IGM).
Fuente: Chiriboga G, 2023.

CASO DE ESTUDIO

APLICACIÓN DE LA PROPUESTA DE EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LA CARTOGRAFIA BASE CON FINES CATASTRALES URBANOS.

El caso de estudio corresponde al proyecto de fiscalización del cantón Pangua validado y aprobado por este Instituto en segunda etapa de segunda revisión.

Unidad, tamaño y selección de la muestra

La cartografía a ser fiscalizada tiene un área de estudio de 385,34 Ha; la cual, es cortada en unidades o segmentos regulares según grillas (cuadrículas) para hojas a escalas 1: 1 000, divididas cada 15 segundos de longitud y latitud (0,21 km²), que representa una hoja que será considerada como la unidad espacial de la cartografía a esta escala (Figura 1).

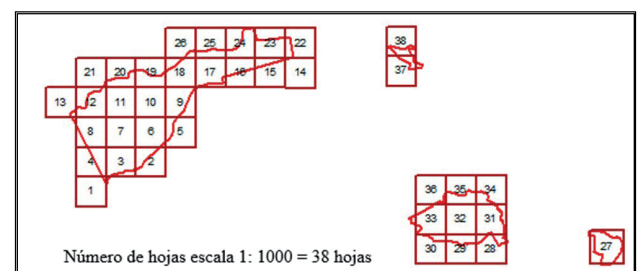


Figura 1.- Unidad espacial de la cartografía (hoja cartográfica).
Fuente: Chiriboga G, 2023.

La suma de todas las hojas cartográficas a escala 1: 1000, es 38 hojas (población), que conforme la norma INEN-ISO 2859-1:2009, nivel de inspección general I, inspección reducida, el código del tamaño de la muestra corresponde a la letra C, lo que equivale a validar (2) muestras (Tabla 10).

CÓDIGO ALFABÉTICO DEL TAMAÑO DE LA MUESTRA (VER 10.1 Y 10.2)							
TAMAÑO DE LOTE	NIVELES ESPECIALES DE INSPECCIÓN				NIVELES GENERALES DE INSPECCIÓN		
	S-1	S-2	S-3	S-4	I	II	III
2 a 8	A	A	A	A	A	A	B
9 a 15	A	A	A	A	A	B	C
16 a 25	A	A	B	B	B	C	D
26 a 50	A	B	B	C	C	D	E
51 a 90	B	B	C	C	C	E	F
91 a 150	B	B	C	D	D	F	G
151 a 280	B	C	D	E	E	G	H
281 a 500	B	C	D	E	F	H	J
501 a 1200	C	C	E	F	G	J	K
1 201 a 3200	C	D	E	G	H	K	L
3 201 a 10000	C	D	F	G	J	L	M
10 001 a 3500	C	D	F	H	K	M	N
35 001 a 150 000	D	E	G	J	L	N	P
150 001 a 500000	D	E	G	J	M	P	Q
500 00 y más	D	E	H	K	N	Q	R

Tabla 10.- Código alfabético del tamaño de la muestra. NORMA INEN-ISO 2859-1:2009.

RESULTADOS

En la matriz de calidad de los datos, se contabiliza el número total de errores por variable en cada una de las muestras, estos valores, son ingresados en la diagonal de la matriz de calidad de los datos en las muestras (Tabla 8); y, esta a su vez, genera de manera automática la matriz de porcentaje de calidad de los datos en las muestras. (ver Tabla 11).

El porcentaje de errores será evaluado mediante un sistema de aprobaciones y rechazos, a un nivel de calidad $\geq 90\%$; es decir, con el 10 % de error (Ariza Francisco- García José, 2008). En este caso de estudio, el proyecto será aprobado, cuando el valor calculado en la ponderación de las variables, sea mayor o igual al 90%.

Siendo que el porcentaje de errores se obtiene de la multiplicación de los errores por el 100%, dividido para el número de errores totales. El porcentaje de aciertos se obtiene, de la resta del 100% del porcentaje de errores y, el porcentaje de ponderación por variable se obtiene, de la multiplicación del porcentaje de aciertos por la ponderación final de cada variable.

Como resultado se muestra en la Tabla 12, los errores encontrados en la cartografía del cantón Pangua, de acuerdo al número de objetos geográficos evaluados en

las variables, el mismo que nos permite evidenciar cuál de las variables es la que requiere una revisión más exhaustiva (Grupo A y Grupo B), una revisión general (Grupo C, Grupo E y Grupo F), para el cumplimiento de la calidad de los datos con fines catastrales. En este caso, el porcentaje de calidad de los datos corresponde al 90,45%, como se observa a continuación.

Como consecuencia de la aplicación de la propuesta metodológica, el producto cartográfico del cantón Pangua, con un área de 385,34 Ha, ha sido aprobado, al tener un porcentaje de calidad del 90,45%, mayor al 90% requerido, asegurando la calidad óptima de la cartografía base con fines catastrales urbano.

Finalmente, se genera una matriz resumen de los errores por parámetros de calidad, en la cual; se evidencia el número de errores por cada parámetro de calidad de los datos, en cada una de las variables (Tabla 13), donde se observa los errores registrados de acuerdo al número de objetos geográficos evaluados, con el fin de evidenciar las variables que requieren mayor atención para el cumplimiento de la calidad de los datos.

CANTIDAD DE ELEMENTOS EN LA MUESTRA	MUESTRA	GRUPO A	GRUPO B	GRUPO C	GRUPO D	GRUPO E	GRUPO F	
233	GRUPO A	14						
30	GRUPO B		2					
4751	GRUPO C			2048				
210	GRUPO D				26			
2864	GRUPO E					462		
0	GRUPO F						0	
	TOTAL	14	0	0	0	0	0	2552

Tabla 11.- Matriz de calidad de los datos en las muestras.
Fuente: Chiriboga G, 2023.

VARIABLES	GRUPO A	GRUPO B	GRUPO C	GRUPO D	GRUPO E	GRUPO F	
Porcentaje ponderación final	47,63	23	13,33	7,83	5	3,5	
Porcentaje de errores	13,08	6,45	7,32	9,84	0,00	15,38	
Porcentaje de aciertos	86,92	93,55	92,68	90,16	100,00	84,62	
Porcentaje de calidad	41,37	21,52	12,35	7,06	4,73	2,96	90,45

Tabla 12.- Porcentaje de calidad de los datos en las muestras.
Fuente: Chiriboga G, 2023.

PARÁMETROS DE CALIDAD	COMPLETITUD	CONSISTENCIA LÓGICA	PRECISIÓN TEMÁTICA
GRUPO A	11	10	1
GRUPO B	1	0	0
GRUPO C	8	2048	0
GRUPO D	2	0	1
GRUPO E	3	649	0
GRUPO F	0	0	0
TOTAL	25	2707	2

Tabla 13.- Matriz de errores por parámetros de calidad.
Fuente: Chiriboga G, 2023.

CONCLUSIONES

- Es relevante y necesario la emisión de una metodología para la evaluación de calidad de la cartografía con fines catastrales, tomado en cuenta las normas de la familia ISO para información geográfica, con el objetivo de regular la emisión de esta cartografía y garantizar el uso de la misma.
- Cabe aclarar que el IGM, dispone de una metodología de control de calidad basada en la Norma INEN-ISO-2859, para cartografía básica multiusuario; sin embargo, en virtud que la finalidad de la evaluación de la calidad de este trabajo, es la elaboración de cartografía catastral, es permisible

proponer la metodología planteada, para optimizar el tiempo en el proceso de fiscalización, mediante una ponderación de variables, que aclaren el juicio del análisis cuantitativo y uso de esta cartografía en el catastro urbano.

- La propuesta planteada, permite realizar un control de calidad de manera imparcial y dinámica, ya que traslada la realidad percibida por uno o varios expertos a una escala de razón, en la que, se reflejen las prioridades relativas de las variables consideradas en el control de calidad de la cartografía básica con fines catastrales escala 1: 1000.

- El porcentaje de errores será evaluado mediante un sistema de aprobaciones y rechazos, asegurando la calidad mínima del 90% de la cartografía base con fines catastrales.

- El caso de estudio para la aplicación de la propuesta metodológica fue el proyecto de fiscalización del cantón Pangua, teniendo como resultado una cartografía aprobada, al haber obtenido un porcentaje de calidad del 90,45%, lo que asegura la calidad óptima de la cartografía evaluada.

BIBLIOGRAFÍA

Ávila Mogollón, Ruth Maritza (2000). "El AHP (Proceso Analítico Jerárquico) y su Aplicación para determinar los Usos de las Tierras". El caso de Brasil. Proyecto GCP/RLA/126/JPN

Ariza-López, Francisco Javier, García Balboa, José (2008). Normas sobre la calidad de la información geográfica (ISO 19113) https://www.researchgate.net/publication/28209111_Normas_sobre_la_calidad_en_informacion_geografica_ISO_19113_ISO_19114_ISO_19138_ISO_2859_e_ISO_3951

Ariza-López, Francisco Javier, (2013). Fundamentos de Evaluación de la Calidad de la Información Geográfica (Primera ed.). Jaén, España: Universidad de Jaén <https://doi.org/10.35424/rcarto.v0i100.647>

Catálogo de objetos para catastro urbano, IGM, 2022 versión 5.0. <https://www.geoportaligm.gob.ec/nextcloud/index.php/s/MyZSkNN556e34gi>

Hurtado T, Gérard B. (2019). El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) como Herramienta para la Toma de Decisiones en la Selección de Proveedores https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/tesis/basic/toskano_hg/cap3.PDF

IPGH, I. P. de G. e H. (1978). Especificaciones para mapas topográficos.

INEN. Servicio Ecuatoriano de Normalización. (2009). Procedimientos de Muestreo para Inspección por Atributos. Parte 1. Programas de Muestreo Clasificados por el Nivel Aceptable de Calidad

(AQL) para Inspección Lote a Lote. NTE INEN-ISO 2859-1:2009. Quito.

IGM, 2022. Catalogo de objetos de cartografía base con fines catastrales escala 1: 1000. Version 5. <https://www.geoportaligm.gob.ec/normativa/recursos1k.html>

ISO 19157: Calidad de datos geográficos

IGM, 2022. Protocolo de fiscalización de cartografía base con fines catastrales urbanos, versión 5.0 <https://www.geoportaligm.gob.ec/nextcloud/index.php/s/M843erHkGmXrjmE>

Saaty, T.L. (1980). The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation, McGraw-Hill.

Toskano-Hurtado, Gerard Bruno (2017). Proceso de análisis jerárquico (AHP), como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores. Tesis digitales UNMSM. https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/tesis/basic/toskano_hg/cap3.PDF



Teledetección aplicada a los desastres - El uso de Google Earth Engine como herramienta automatizada para determinar zonas de cambio y cálculo de población potencialmente afectada

Remote sensing applied to disasters The use of Google Earth Engine as an automated tool to determine areas of change and calculation of potentially affected population

César Buitrón Vinuesa
cesar.buitron@geograficomilitar.gob.ec

RESUMEN

El Ecuador, un país que, enfrenta numerosas amenazas naturales como inundaciones, deslizamientos, sismos, sequías y actividades volcánicas. Actualmente, uno de los eventos suscitados en la costa ecuatoriana es el Fenómeno El Niño (ENOS), el cual está causando falta de agua en la sierra ecuatoriana y a su vez, intensas lluvias en las estribaciones y el litoral desencadenando inundaciones y deslizamientos en masa. Eventos pasados de El Niño, como el de 1997-1998, demuestran el alto impacto de su ocurrencia en el país, con pérdidas humanas y económicas significativas.

Con base a esta problemática, el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se han convertido en un aliado importante al permitir generar modelos que

permitan determinar las zonas vulnerables a desastres a fin de generar productos que faciliten la toma de decisiones por el ente competente.

El objetivo principal del artículo es presentar la metodología desarrollada para identificar zonas de cambio por inundaciones y/o deslizamientos, utilizando imágenes satelitales radar y Google Earth Engine. El uso de la tecnología y su automatización facilita mitigar los efectos producidos por desastres y aumentar la resiliencia del país ante tales eventos.

Palabras claves: Sistemas de Información Geográfica, Google Earth Engine, Análisis Espacial, Desastres Naturales, Pronta Respuesta.

ABSTRACT

Ecuador, a country that faces numerous natural threats such as floods, landslides, earthquakes, droughts and volcanic activities. Currently, one of the events occurring on the Ecuadorian coast is the El Niño Phenomenon (ENSO), which is causing a lack of water in the Ecuadorian mountains and, in turn, intense rains in the foothills and the coast, triggering mass flooding and landslides. Past El Niño events, such as that of 1997-1998, demonstrate the high impact of its occurrence in the country, with significant human and economic losses.

Based on this problem, the use of Geographic Information Systems (GIS) has become an important ally by allowing the generation of models that allow determining areas vulnerable to disasters in order to generate products that facilitate decision-making by the entity. competent.

The main objective of the article is to present the methodology developed to identify areas of change due to floods and/or landslides, using radar satellite images and Google Earth Engine. The use of technology and its automation makes it easier to mitigate the effects of disasters and increase the country's resilience to such events.

Keywords: Geographic Information Systems, Google Earth Engine, Geographic Analysis, Natural Disasters, Rapid Response.

INTRODUCCIÓN

El Ecuador es un país expuesto a diversas amenazas de origen natural como son: inundaciones, deslizamientos, sismos, sequías y actividades volcánicas, lo que conlleva a tener problemas de diversa índole ambiental y social, por lo cual es indispensable contar con estrategias que permitan reducir el grado de vulnerabilidad y aumentar el nivel de resiliencia.

Al ser un país costero, es vulnerable a diversos fenómenos naturales hidrológicos como el ENOS (Fenómeno de El Niño Oscilación del Sur), el cual ocasiona una disminución hídrica en la sierra ecuatorial y produce lluvias intensas en las estribaciones y litoral lo que provoca inundaciones y deslizamientos en masa.

El Ecuador ha afrontado varias ocasiones este fenómeno, principalmente se recuerda lo ocurrido entre los años 1997-1998 considerado como el de mayor impacto provocando pérdidas humanas, así como también millonarias pérdidas económicas. Además,

se presentaron otros efectos secundarios producto de las lluvias tal cual enfermedades endémicas de las zonas costeras como el dengue, paludismo y Zika que agudizaron otros problemas ya existentes. Según la CEPAL, en 1998 se registraron un total de 18 745 familias (88 591 personas) afectadas por El Niño, 286 muertos, 162 heridos y 36 desaparecidos.

En la actualidad, el país se enfrenta nuevamente a un evento ENOS. A través del Gobierno Central mediante el decreto Nro. 784 del 23 de junio del 2023, se declaró como “prioridad nacional la ejecución de las acciones de prevención, preparación, respuesta y recuperación para enfrentar la posible materialización de la amenaza del fenómeno de El Niño”, en respuesta a los pronósticos de instituciones nacionales e internacionales meteorológicas en el que se preveía que los que los efectos más fuertes del fenómeno se sentirían en los meses de noviembre y diciembre del 2023, hasta el primer trimestre del 2024.

Como contestación a dicho decreto, las instituciones nacionales del país entre ellas el Instituto Geográfico Militar han trabajado por generar productos que permitan determinar el grado de afectación del ENOS en el país a nivel de pre evento, durante el evento y post evento; a fin de brindar documentos cartográficos que permitan la implementación de planes de contingencia y así, disminuir los daños ocasionados.

El uso de herramientas automatizadas permite una mejora en la entrega oportuna de productos geográficos de pronta respuesta. La plataforma Google Earth Engine (GEE) es un instrumento valioso en la identificación y monitoreo de desastres, incluyendo inundaciones, deslizamientos en masa, incendios, terremotos, entre otros.

A continuación se enlistan algunos de los productos en los que Google Earth Engine ha contribuido en la detección de este tipo de fenómenos: (Macis, 2022).

1. Análisis de series temporales de imágenes:

GEE permite acceder a grandes conjuntos de datos de imágenes satelitales, incluyendo datos de radar y ópticos, a lo largo del tiempo. Esto facilita el análisis de series temporales para identificar cambios en la superficie terrestre, incluyendo áreas inundadas.

2. Detección de cambios mediante índices de agua:

Se pueden utilizar índices específicos, como el NDWI (Normalized Difference Water Index), que compara las

bandas de infrarrojo cercano y verde, para detectar la presencia de agua en las imágenes. Esto es particularmente útil para la identificación de áreas inundadas.

3. Mapeo de inundaciones en tiempo real:

La capacidad de procesamiento en la nube de GEE permite el análisis en tiempo real de imágenes satelitales recién adquiridas. Esto significa que las inundaciones pueden ser monitoreadas y mapeadas rápidamente después de un evento.

4. Análisis de patrones de cambio espacial:

GEE proporciona herramientas para analizar patrones espaciales de cambio, lo que facilita la identificación de áreas afectadas por inundaciones y la evaluación de la extensión del desastre.

5. Comparación de imágenes antes y después del desastre:

Almacenando y accediendo a grandes conjuntos de datos de imágenes, GEE permite comparar fácilmente

imágenes antes y después de un evento de inundación, lo que ayuda en la evaluación de la magnitud del desastre. (Terán, 2022).

6. Visualización y difusión de información:

GEE proporciona herramientas de visualización que permiten compartir de manera efectiva la información sobre inundaciones con las autoridades de gestión de desastres y el público en general.

7. Modelos de inundación y simulaciones:

GEE también se utiliza para implementar modelos de inundación y simulaciones que pueden ayudar a prever áreas propensas a inundaciones, lo que es valioso para la planificación y la respuesta a desastres.

En este contexto, el objetivo principal de este artículo es la construcción de una metodología de pronta respuesta, mediante el uso de GEE, para determinar las zonas de cambio producto de las inundaciones a causa de la presencia del ENOS en el país.

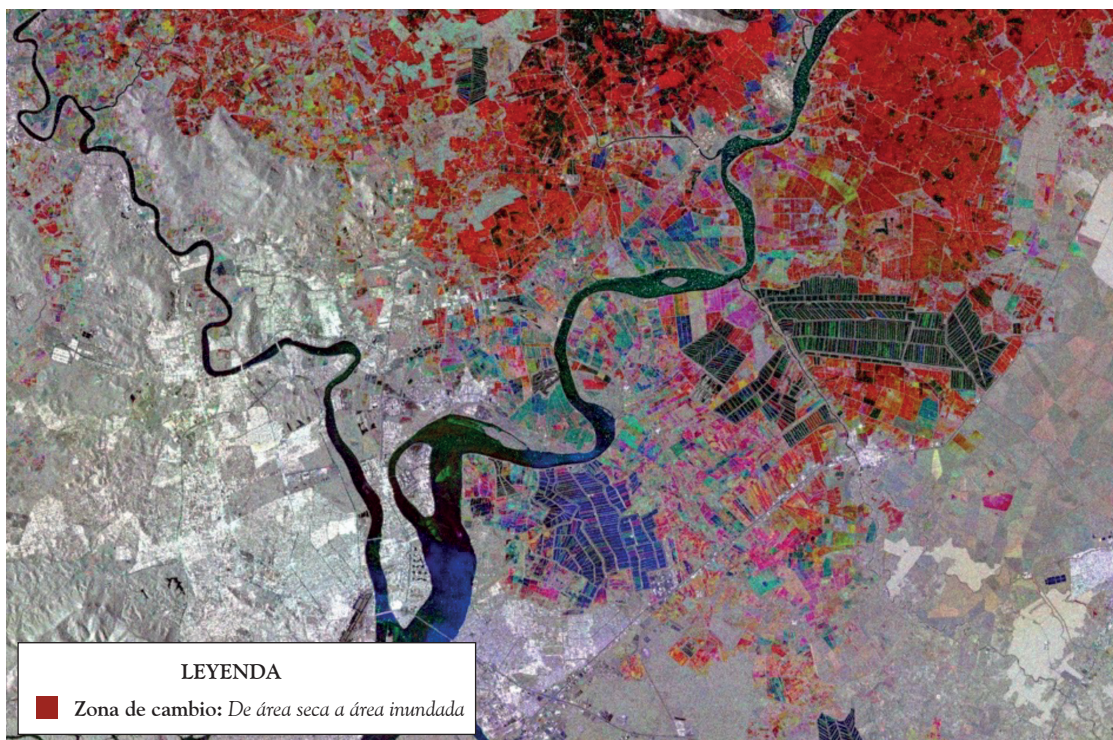


Figura 1.- Detección de Cambios en cuerpos de agua.
 Fuente: (GEE, 2024).

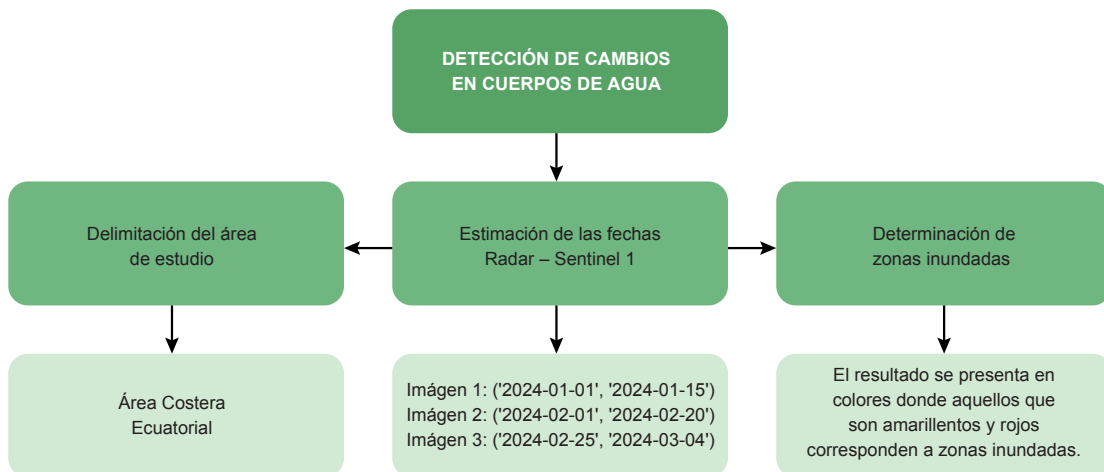
METODOLOGÍA

El procedimiento metodológico sigue un orden lógico de levantamiento temático y de información espacial sobre la afectación del ENOS en las costas ecuatorianas.

Para la generación del producto de identificación de zonas inundadas mediante la detección de cambios tiene la siguiente metodología: A partir de aquí, se programó el siguiente script de Google Earth Engine (GEE), el mismo que está diseñado para realizar un análisis de detección de cambios utilizando imágenes SAR (Synthetic Aperture Radar) de la misión Copernicus Sentinel-1.

a. Filtrado de la colección de imágenes SAR:

- Se utilizó la colección 'COPERNICUS/S1_GRD' que contiene datos Sentinel-1. Se filtró imágenes con polarización 'VV' y modo de instrumento 'IW'.
- Se aplicó un filtrado espacial usando la geometría especificada.
- Se seleccionó la banda 'VV' de cada imagen.
- Se aplicó una máscara para eliminar los valores por debajo de -30 dB.



Fuente: *Elaboración propia 2024.*

```

javascript
Copy code

var imgVV = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S1_GRD')
  .filter(ee.Filter.listContains('transmitterReceiverPolarisation', 'VV'))
  .filter(ee.Filter.eq('instrumentMode', 'IW'))
  .filterBounds(geometry)
  .select('VV')
  .map(function(image) {
    var edge = image.lt(-30.0);
    var maskedImage = image.mask().and(edge.not());
    return image.updateMask(maskedImage);
  });
    
```

Figura 2.- Adquisición de Imágenes Sentinel 1 GRD.
Fuente: (Copernicus, 2024).

b. Filtrado por órbita y fechas:

- Se filtraron las imágenes según si pertenecen a la órbita 'ASCENDING' o 'DESCENDING'.

Para la generación de la imagen satelital se utilizó imágenes con los siguientes lapsos de tiempo.

Imagen A – Enero 10 al 15

Imagen B – Enero 20 al 31

Imagen C – Febrero 10 al 26

c. Construcción de imágenes de cambio:

Se utilizaron las imágenes filtradas para crear dos imágenes compuestas, una para órbita ascendente (ascChange) y otra para órbita descendente (descChange). Cada imagen compuesta es la media de las imágenes dentro de un período de tiempo.

```
javascript Copy code
var desc = imgW.filter(ee.Filter.eq('orbitProperties_pass', 'DESCENDING'));
var asc = imgW.filter(ee.Filter.eq('orbitProperties_pass', 'ASCENDING'));

var first = ee.Filter.date('2024-01-01', '2024-01-15');
var second = ee.Filter.date('2024-01-20', '2024-01-31');
var third = ee.Filter.date('2024-02-10', '2024-02-26');
```

Figura 3.- Rangos de fechas - Orbitas.
Fuente: (Copernicus, 2024).

```
javascript Copy code
var descChange = ee.Image.cat(
  desc.filter(first).mean(),
  desc.filter(second).mean(),
  desc.filter(third).mean());

var ascChange = ee.Image.cat(
  asc.filter(first).mean(),
  asc.filter(second).mean(),
  asc.filter(third).mean());
```

Figura 4.- Filtro de media para imágenes radar.
Fuente: (Copernicus, 2024).

RESULTADO

El resultado el procesamiento del script es una imagen compuesta RGB en el que cada imagen radar corresponde a una fecha determinada:

R: Imagen A – (Pre evento)

G: Imagen B – (Durante el evento)

B: Imagen C – (Post evento)

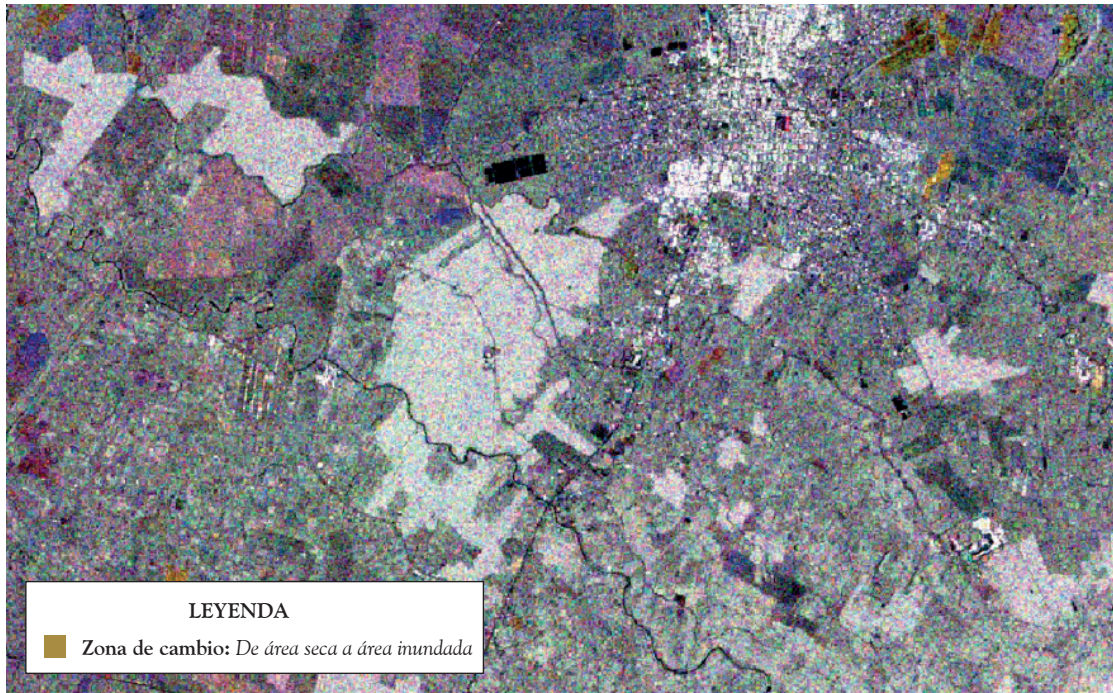


Figura 5.- Zonas inundadas en la Ciudad de Milagro – RGB.

Esta imagen corresponde a la ciudad de milagro y sus alrededores en el que se determinó las **zonas inundadas** a causa de las lluvias extremas por la presencia del ENOS en el país. De esta manera, se busca identificar las zonas con cambios que son representadas con colores descritos en la Figura 6.

La interpretación de los colores se ha realizado en función a la determinación de agua en la zona de estudio, mostrando los siguientes resultados:

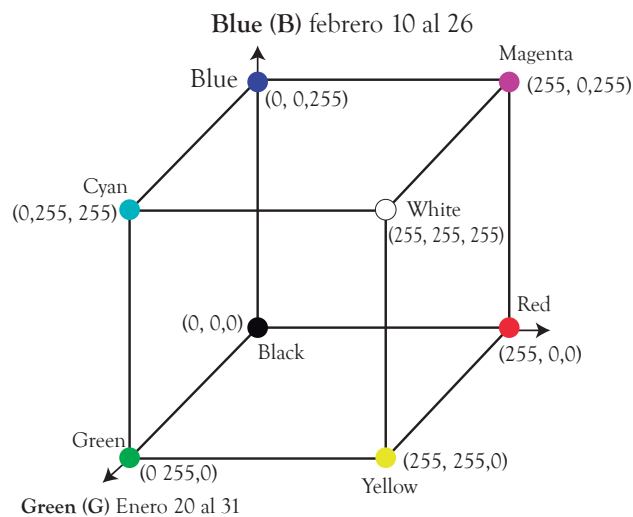


Figura 6.- Cubo RGB.

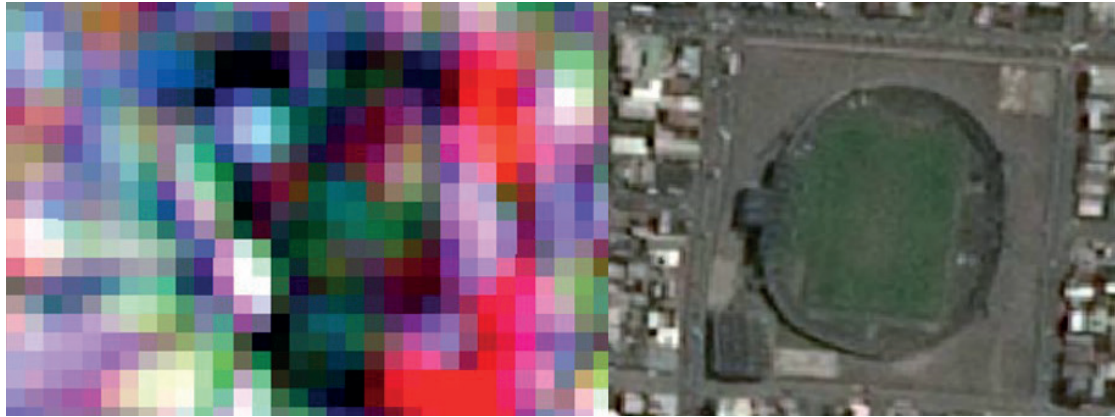


Figura 7 – Colores amarillos y rojos: Corresponden a áreas en las cuales se ha detectado un cambio relacionado a los índices de decibeles entre las imágenes pre evento (zona Seca), durante el evento (zona seca) y un post evento (Zona con presencia de agua). En este caso, representa una zona inundada.

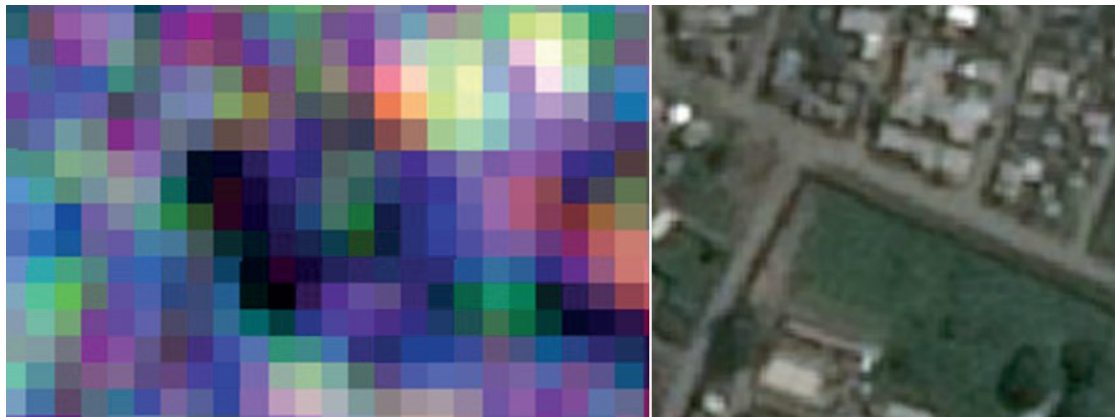


Figura 8 – Colores morados – azul: Corresponden a zonas que son propensas a ser inundadas y que actualmente no presentan cuerpos de agua. Es decir, que representan zonas donde en la imagen de durante el evento presente agua, pero actualmente no se encuentra inundada.

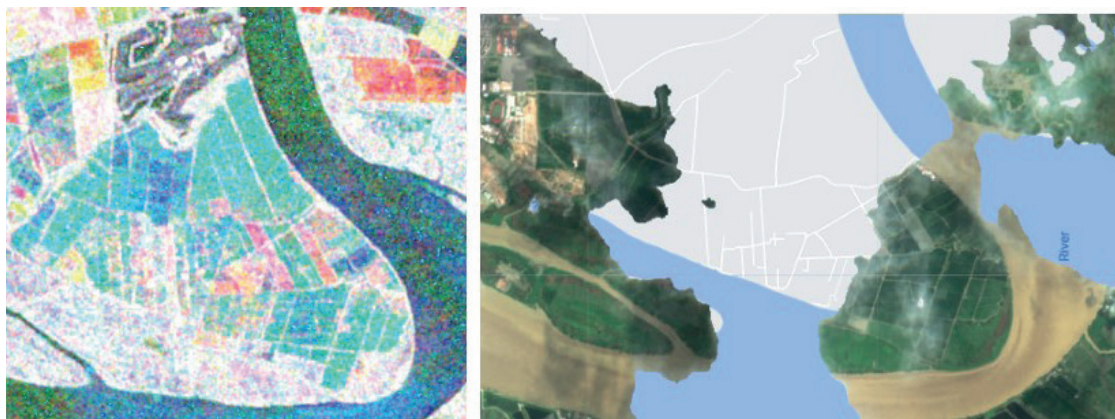


Figura 9 – Colores Cian: Corresponden a zonas donde en la imagen pre evento disponían de un cuerpo de agua y actualmente son áreas secas. Principalmente representan a cultivos de arroz en crecimiento.

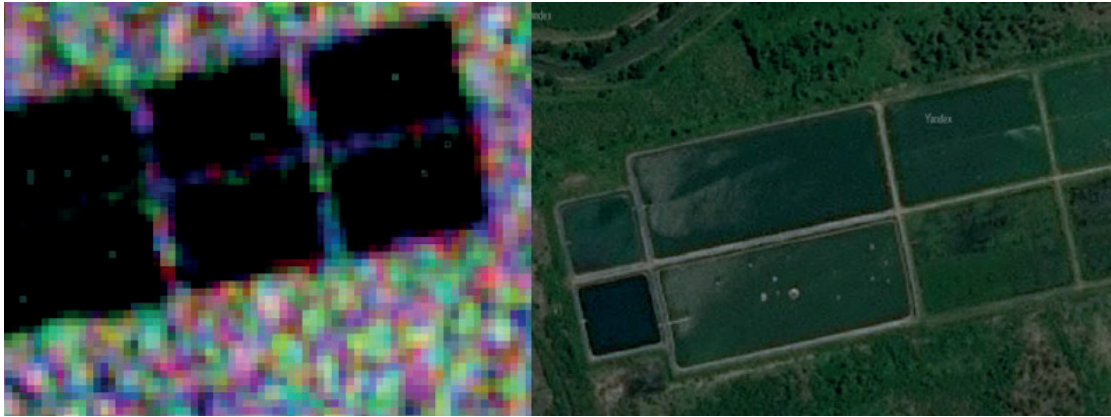
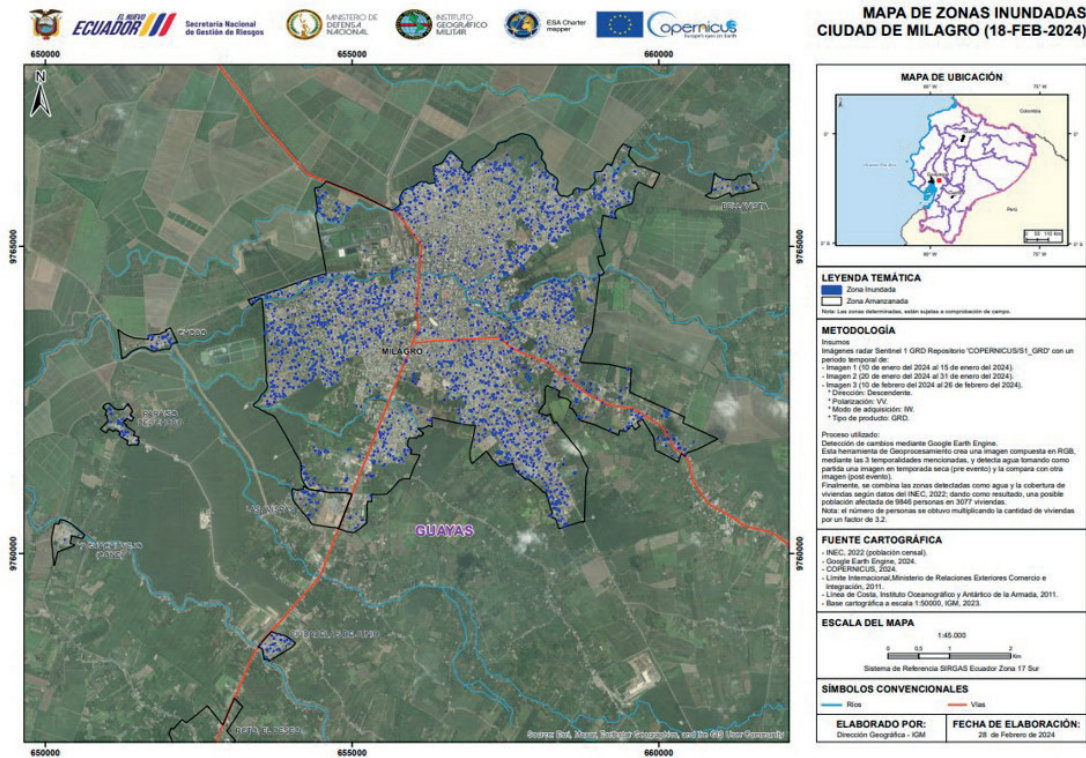


Figura 10 – Colores Negros: Corresponde a presencia de agua permanente.

El resultado final es las áreas con presencia de agua en las cuales, al intersecar con viviendas se obtiene como resultado una posible población afectada de 9 846 personas en 3 077 viviendas. El número de personas se obtuvo multiplicando la cantidad de viviendas por un factor.



Mapa 1.- Zonas inundadas - Ciudad de Milagro

CONCLUSIONES

La implementación de la metodología propuesta ha demostrado ser una herramienta valiosa para la detección y evaluación de zonas inundadas en el contexto del Fenómeno de El Niño (ENOS) en Ecuador a través del análisis de detección de cambios mediante el uso de imágenes radar Sentinel 1 y la automatización de los geoprocementos.

A continuación, se discuten algunos aspectos clave relacionados con la metodología y los resultados obtenidos:

- Utilizar Google Earth Engine para el análisis de imágenes satelitales ha demostrado ser que es una plataforma eficiente y potente para acceder, procesar y analizar grandes conjuntos de datos de manera rápida, eficaz y eficiente al reducir los tiempos de descarga y acondicionamiento de las imágenes

radar de forma inmediata. Esto resulta fundamental para abordar situaciones de emergencia, como las inundaciones causadas por el ENOS.

- La combinación de datos SAR de Sentinel-1 con información demográfica, como la cobertura de viviendas, agrega una dimensión importante al análisis. Esta integración permite no solo identificar las áreas inundadas, sino también evaluar el posible impacto en la población al estimar la cantidad de personas afectadas y las viviendas comprometidas.
- Aunque la metodología es robusta, es importante reconocer posibles limitaciones. La precisión de la clasificación de zonas inundadas podría estar sujeta a variaciones en las condiciones climáticas o algoritmos específicos utilizados en la clasificación no supervisada. Además, la precisión de la estimación de población afectada se basa en un factor de conversión, lo que podría introducir cierta incertidumbre.
- Los resultados proporcionan información valiosa para la planificación de respuestas y medidas de mitigación. La identificación de áreas propensas a inundaciones, así como la evaluación del impacto en la población, pueden ser fundamentales para la toma de decisiones y la asignación de recursos en situaciones de emergencia.
- La metodología desarrollada puede ser adaptada y aplicada en futuros eventos ENOS u otras situaciones de desastre. La capacidad para generar productos de identificación de zonas afectadas de manera rápida y eficiente es esencial para una respuesta efectiva a desastres recurrentes.
- Sería importante considerar la integración de datos históricos en el análisis. La comparación de eventos ENOS anteriores con la situación actual podría proporcionar información adicional sobre patrones de cambio y áreas propensas a inundaciones recurrentes.
- La visualización clara de los resultados, facilita la comunicación efectiva de la información a las autoridades y al público en general. La comprensión visual de las zonas afectadas contribuye a una respuesta rápida y coordinada.

BIBLIOGRAFÍA

- ONU, Equipo Humanitario de País Ecuador. (2023, 22 de agosto). Plan de Contingencia Fenómeno del Niño 2023. URL: <https://ecuador.un.org/sites/default/files/2023-11/EHP%20-%20ENOS%202023%20-%20Plan%20de%20Contingencia.pdf>
- Naciones Unidas, Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres, secretaría Las Américas (ONU/EIRD), MSP, (2007). El Fenómeno El Niño en Ecuador. URL: <https://www.eird.org/estrategias/pdf/spa/doc12863/doc12863-10.pdf>
- CEPAL. "Ecuador: Evaluación de los efectos socioeconómicos del Fenómeno El Niño en 1997-1998". 16 julio de 1998. Cuadro 1: Ecuador: Población afectada: Damnificados Primarios y Secundarios. Página 17
- Masís Aguilar, J. E. (2022). Evaluación de relaciones entre extensión de inundación e impactos en cultivos en la cuenca del Río Aguán en honduras, utilizando datos de tecnología radar de apertura sintética (SAR).
- Terán, O. H. E., i Perpinyá, A. B., & i Traveria, M. G. (2022). Google Earth Engine aplicado al monitoreo de superficies quemadas y cambios de coberturas y usos del suelo. *Geofocus: Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, (29), 89-113.



Mapeo rápido de inundaciones y sus impactos en el territorio nacional utilizando datos SAR de Sentinel-1 con el software ENVI-SARscape

Rapid mapping of floods and their impacts on the national territory using Sentinel-1 SAR data with ENVI-SARscape software

Stalin Cachimuel Paredes
 stalin.cachimuel@geograficomilitar.gob.ec

“A las catástrofes las llaman naturales como si la naturaleza fuera el verdugo y no la víctima”
 (Eduardo Galeano)

RESUMEN

Las inundaciones, como desastres naturales, generalmente son el resultado de tormentas y lluvias torrenciales o de lagos, ríos u océanos desbordados. Este tipo de evento es uno de los más comunes y afecta a casi todos los sectores demográficos y áreas en la Tierra. Al ser las inundaciones un tipo de desastre de gran alcance, los equipos de gestión de desastres tienen muchas preocupaciones al respecto, como por ejemplo, precautelar la vida humana y disponer de la infraestructura necesaria para ofrecer una respuesta de emergencia.

Las inundaciones pueden destruir puentes y edificios, sistemas eléctricos y hasta desconectar partes de las ciudades o áreas rurales de los equipos de respuesta inicial que necesitan comunicarse. Las preocupaciones a largo plazo causadas por inundaciones grandes

se centran en el daño sistémico, claros ejemplos y escenarios son: los alimentos, los cultivos destruidos y el ganado ahogado.

El mapeo de inundaciones basado en radar de apertura sintética (SAR, por sus siglas en inglés) es un método estándar y confiable para determinar la extensión de inundaciones. El SAR puede atravesar la cobertura de nubes, además, funciona en cualquier condición de tiempo y provee información crucial y oportuna sobre este tipo de eventos, uno de los desastres naturales más frecuentes y devastadores como las inundaciones (Affairs & UN-SPIDER Knowledge Portal, 2006).

Muchas veces, los tomadores de decisiones no disponen de la información necesaria debido a los conocimientos técnicos limitados. Esta metodología

se centra en un método simple de umbral para derivar la extensión de la inundación en las imágenes SAR, lo que permite obtener como resultados productos cartográficos para la atención oportuna.

En este sentido, el presente análisis geográfico no solo brinda una descripción útil y rápida de las inundaciones, sino también se constituye en base para otros análisis, a través del cruce de información esencial, estadística sobre población y cultivos afectados. De esta manera, se apoya a la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos y los GADs municipales con productos geográficos de pronta respuesta, los mismos que sirven de insumos para la toma de decisiones y atención de la emergencia.

Palabras clave: Inundación, Riesgo, Teledetección, Análisis Espacial, Radar de Apertura Sintética.

ABSTRACT

Floods, as natural disasters, generally result from storms and torrential rains or from overflowing lakes, rivers or oceans. This type of event is one of the most common and affects almost all demographics and areas on Earth. As floods are a type of far-reaching disaster, disaster management teams have many concerns about them, the most immediate of which during a disaster relate to protecting human life and having the necessary infrastructure to offer an emergency response.

Flooding can destroy bridges and buildings, electrical systems, and even disconnect parts of cities or rural areas from first responders who need to communicate. Long-term concerns caused by large floods focus on systemic damage, clear examples and scenarios are food, crops destroyed, and livestock drowned.

Synthetic aperture radar (SAR)-based flood mapping is a standard and reliable method for determining flood extent. SAR can penetrate cloud cover, works in any weather condition, and provides crucial and timely information about this type of event, one of the most frequent and devastating natural disasters such as floods (Affairs & UN-SPIDER Knowledge Portal, 2006).

Many times, decision makers do not have the necessary information due to limited technical knowledge. This methodology focuses on a simple threshold method to derive the extent of flooding in SAR images, resulting in cartographic products for timely attention.

In this sense, the present geographical analysis not only provides a useful and quick description

of the floods, but also constitutes the basis for other analyses, through the crossing of essential information, statistics on the population and affected crops. In this way, the National Secretariat for Risk Management and the municipal GADs are supported with geographic products for rapid response, which serve as inputs for decision-making and emergency response.

Keywords: Flood, Risk, Remote Sensing, Spatial Analysis, Synthetic Aperture Radar.

INTRODUCCIÓN

Objetivo

El objetivo principal es ofrecer a los usuarios mapas rápidos de inundación que permitan discriminar las zonas afectadas a través del uso de imágenes de satélite tipo SAR y herramientas tecnológicas, lo que constituye una solución viable, proporcionando información casi en tiempo real para los organismos de socorro. Además, los resultados pueden ser utilizados para la evaluación de daños y gestión de riesgos creando escenarios de riesgo que muestran población vulnerable expuesta, actividades económicas, y el medio ambiente.

Contexto

Ecuador, por medio de la SNGR, declaró la alerta naranja por el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), las intensas lluvias e inundaciones causadas por este peculiar patrón climático han afectado a diecisiete provincias desde el 20 de febrero de 2024 en Ecuador. Las provincias más afectadas incluyen Esmeraldas, Manabí, Santa Elena, Guayas, Santo Domingo de los Tsáchilas, Los Ríos y El Oro a lo largo del perfil costanero.

Aplicabilidad

Esta metodología puede ser utilizada para conocer el panorama completo de la inundación sobre un área de interés de cualquier extensión, desde pequeñas comunidades hasta cantones o provincias. Se pueden presentar detecciones falsas de agua debido a la sombra de radar por la topografía del terreno o también puede ocurrir en caso de objetos lisos, como carreteras y arena. La detección de inundaciones en zonas urbanas resulta difícil, y en cuanto a la detección de la vegetación inundada de imágenes SAR se utiliza un enfoque diferente, utilizando dos imágenes multitemporales. A continuación, se describen los requisitos, aplicaciones, fortalezas y limitaciones del modelo (Figuras 1, 2, 3 y 4).

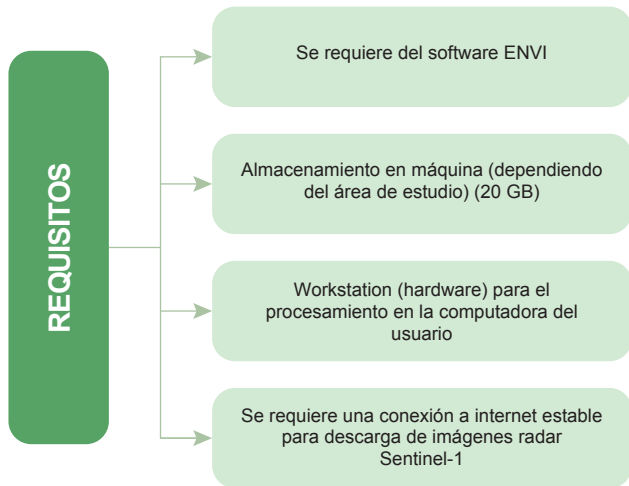


Figura 1.- Requisitos para el mapeo de aguas superficiales (inundaciones).
Fuente: Elaboración propia, 2024.

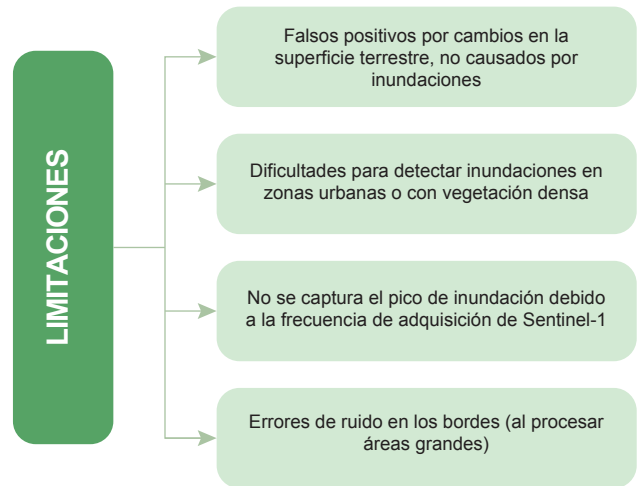


Figura 4.- Limitaciones para el mapeo de aguas superficiales (inundaciones).
Fuente: Elaboración propia, 2024.

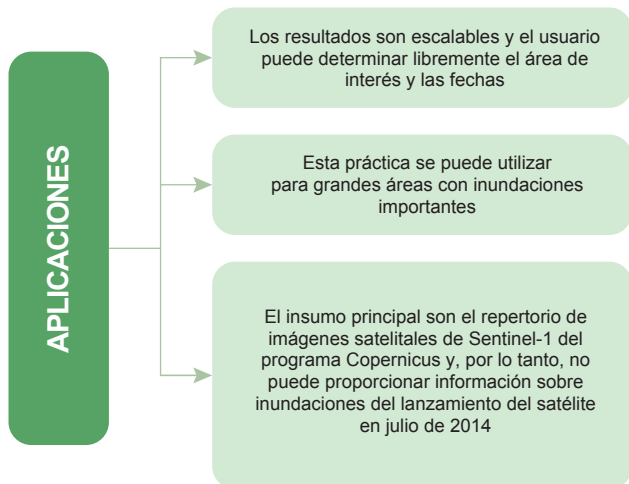


Figura 2.- Aplicaciones para el mapeo de aguas superficiales (inundaciones).
Fuente: Elaboración propia, 2024.

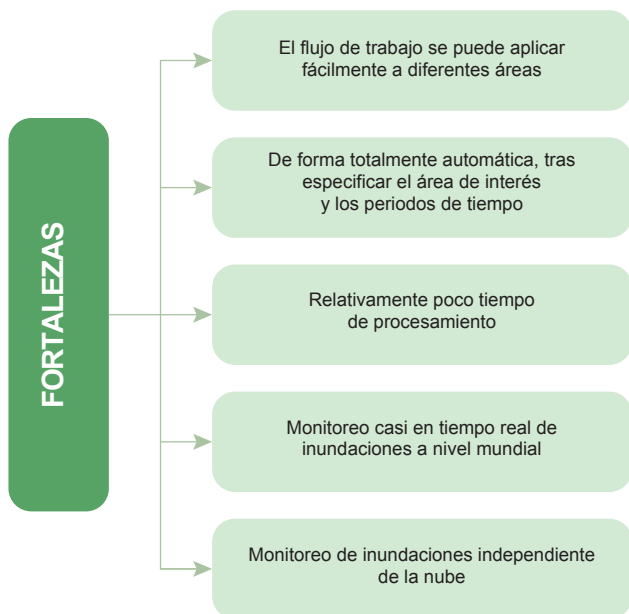


Figura 3.- Fortalezas para el mapeo de aguas superficiales (inundaciones).
Fuente: Elaboración propia, 2024.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde a los polígonos elaborados por la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos en base a los boletines, mapeo y monitoreo de amenazas de cuerpos hídricos de la Dirección de Monitoreo de Eventos Adversos. Para esta práctica nos enfocaremos en un caso de estudio específico como es la ciudad de Chone y sus zonas aledañas. (Ver Figura 5.)

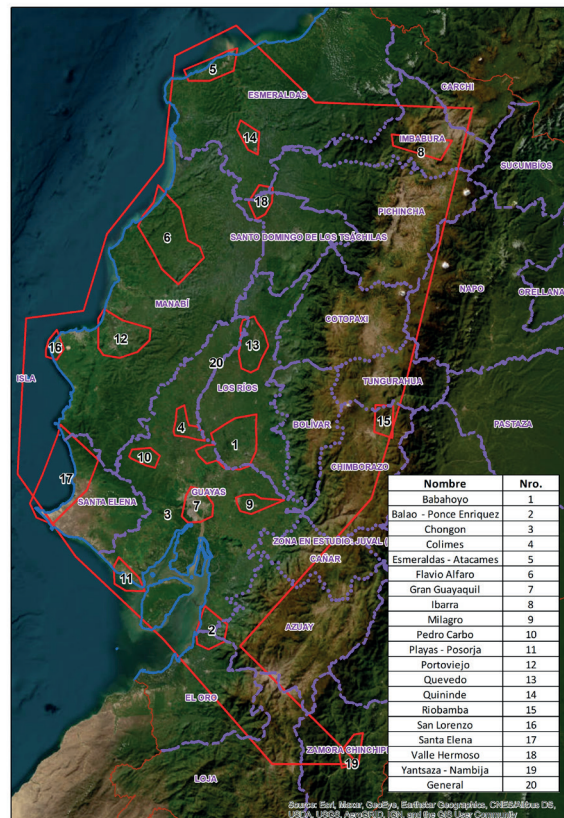


Figura 5.- Mapa de los polígonos con presencia de eventos adversos - SNGR.

METODOLOGÍA

El método de mapeo de aguas superficiales basado en umbrales sigue el diagrama de flujo de la Figura 6, ahí se describe los pasos principales de este método del umbral, el mismo que fue aplicado en el software ENVI a través de la herramienta Time Series.

RECOLECCIÓN DE DATOS

Los datos SAR de Sentinel-1, están disponibles de forma gratuita a través de la plataforma del Sentinel

Scientific DATA Hub o del Alaska Facility Vertex. Se utilizaron un total de 8 imágenes (escenas) distribuidas en 7 imágenes pre-evento y 1 imagen post-evento. Todas las imágenes tienen las siguientes condiciones indispensables para el correcto uso de la herramienta Time Series de ENVI; son de dirección ascendente, polarización VV, modo de adquisición IW y tipo de producto GRD (amplitud), además, se ha utilizado un modelo digital del terreno (MDT) de Alos World 3D-30 metros y la cobertura del área de interés (Tabla 1).

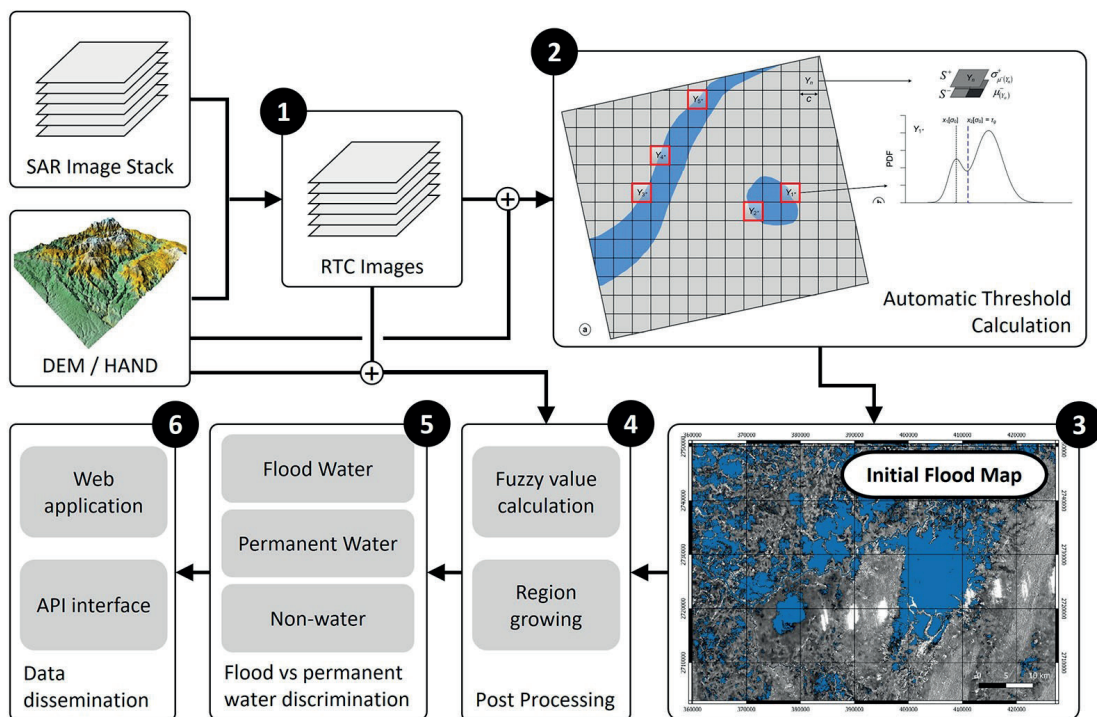


Figura 6.- Enfoque de mapeo de aguas superficiales basado en umbrales.
Fuente: AlaskaX SAR-401 Synthetic Aperture Radar Hazards.

DIRECCIÓN	POLARIZACIÓN	MODO DE ADQUISICIÓN	TIPO DE PRODUCTO	INSUMOS	CONDICIÓN
				IMÁGENES RADAR	
Ascendente	VV	IW	GRD (Amplitud)	20 de septiembre de 2022	pre-evento
				14 de octubre de 2022	
				07 de noviembre de 2022	
				13 de diciembre de 2022	
				18 de enero de 2023	
				23 de febrero de 2023	
				19 de marzo de 2023	post-evento
				12 de abril de 2023	

Tabla 1.- Características de los insumos del enfoque de mapeo de aguas superficiales.

Establecer preferencias en software

El software ENVI consiste en un paso fundamental, que nos permite concatenar los insumos con los parámetros de la herramienta Time Series del ENVI, las principales preferencias son:

- Determinar una cuenta activa del ALOS World 3D-30 username y password
- Preferencias de Sentinel TOPSAR (IW-EW)

Herramienta Intensity Time Series

ENVI SARscape proporciona muchas herramientas diferentes para importar y procesar varios formatos de radar. La carpeta SARscape en ENVI Toolbox contiene todas las opciones disponibles para procesar y analizar imágenes radar. La herramienta utilizada fue la “Intensity Time Series Workflow” la misma que analiza la intensidad de retrodispersión de las imágenes Sentinel-1 (Figura 7).

El enfoque del mapeo de aguas superficiales basado en umbrales consta de varios pasos: adecuación de las imágenes SAR, emplear el umbral óptimo, clasificar la extensión inicial del agua, realizar un posprocesamiento para eliminar el ruido e identificar detecciones falsas, distinguir entre agua de inundación y agua permanente y finalmente, difundir los datos a través de aplicaciones web. Este enfoque ha demostrado ser eficaz para mapear el agua con precisión y obtener productos de pronta respuesta.

El flujo de trabajo aplicado es el siguiente:

1) Ingreso de insumos:

- Las imágenes pre-evento y post evento en orden según la fecha
- El área de estudio definida
- El modelo digital del terreno (ALOS World 3D-30)

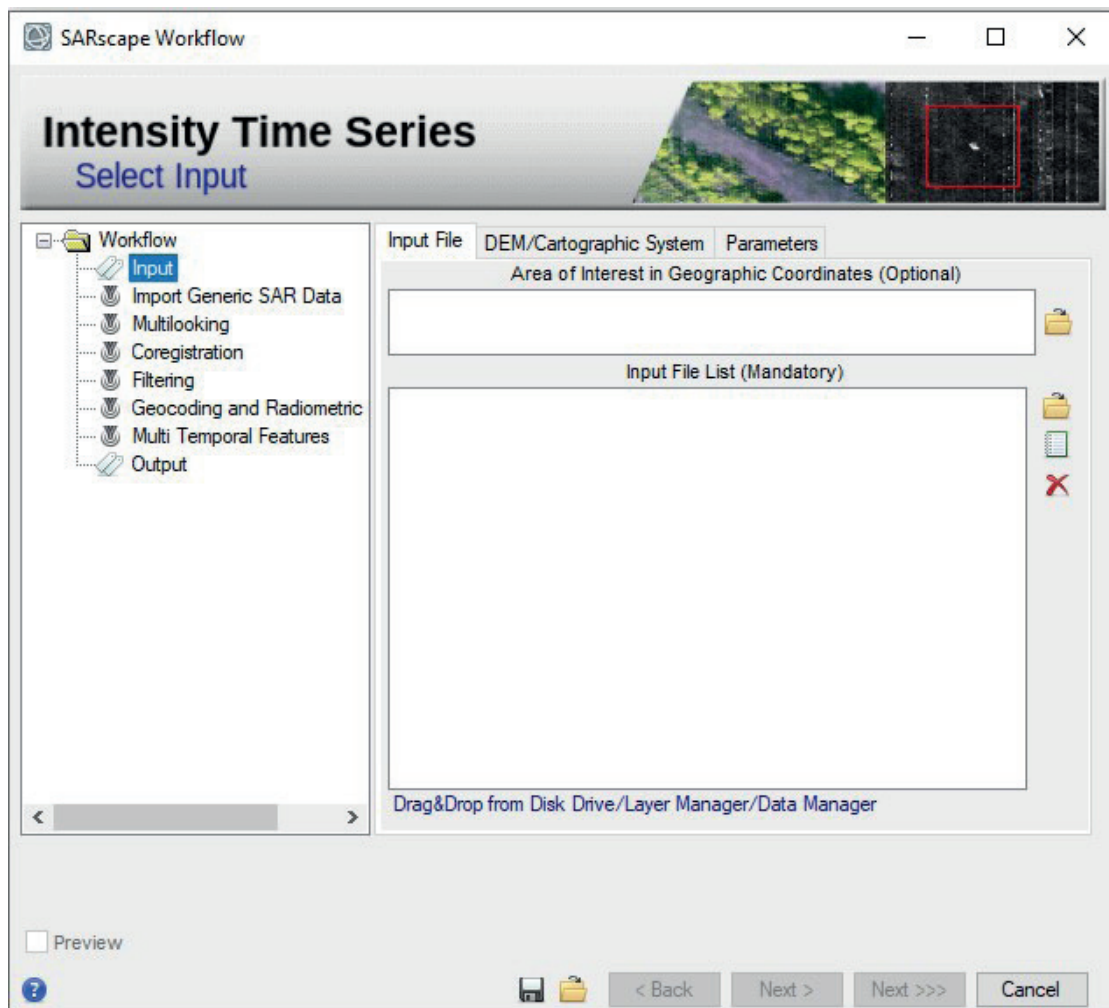


Figura 7.- Interfaz de la herramienta Intensity Time Series.

2) **Importación de archivos a formatos de ENVI:** mediante la herramienta Import Generic SAR Data se llevó a cabo la conversión de formatos, aquí se debe seleccionar en Sentinel Polarization la opción Copolarization only, es decir se trabaará con polarización VV.

3) **Filtrado de las imágenes para reducir el ruido (Multilooking):** este proceso consiste en reducir la señal de ruido en la imagen que puede dificultar la interpretación de los datos. En el flujo de trabajo, se deja las opciones por defecto.

4) **Creación de pilas de imágenes (Coregistration):** este proceso consiste en que todas las imágenes utilizadas se co-registran en un stack, para que cada pixel en el terreno sea el mismo en todas las imágenes. En el flujo de trabajo, se deja las opciones por defecto.

5) **Filtrado de las imágenes (Filtering):** este proceso consiste en suavizar las imágenes. En el flujo de trabajo, se selecciona el Filter Method Lee, sin embargo, se puede realizar pruebas con las demás opciones de filtrado.

6) **Corrección Geométrica y Radiométrica (Geocoding and Radiometric):** este proceso consiste en georreferenciar las imágenes a la superficie de la

Tierra y corregir los valores de brillo verdadero de las imágenes respectivamente. En el flujo de trabajo, se selecciona en Output type obtener tanto en valores lineares como en decibeles (dB).

7) **Multi Temporal Features:** este proceso consiste en obtener una serie de resultados estadísticos como: Mean, Std, Gradient, Max, Min, MuSigma, Coefficient of Variation, Generate Dates, etc.

8) **Salida de resultados:** (Output) finalmente se coloca un nombre y una dirección donde se guardarán los resultados.

ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS

El resultado es una serie de parámetros estadísticos que permiten analizar la superficie de agua detectada (Figura 8).

Con la ayuda de las herramientas de ENVI, se puede realizar las comparaciones de diferentes comportamientos dieléctricos de varias coberturas, como se muestra en la Figura 9.

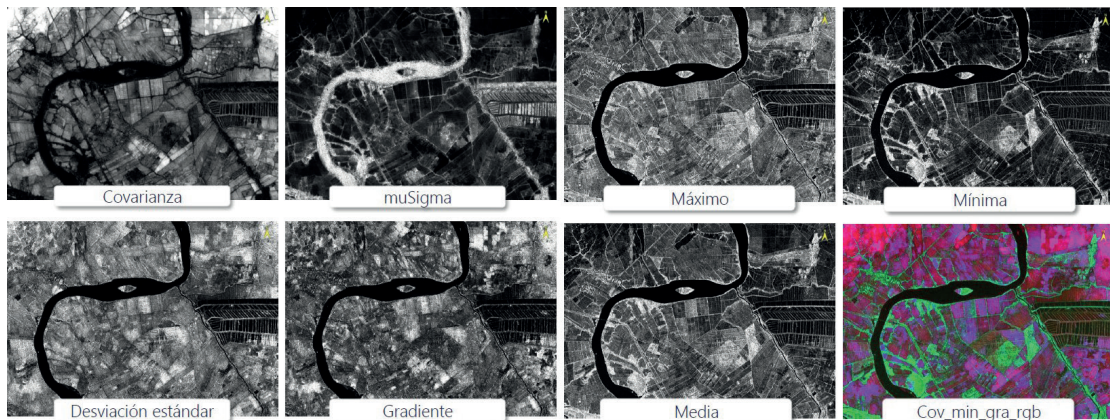
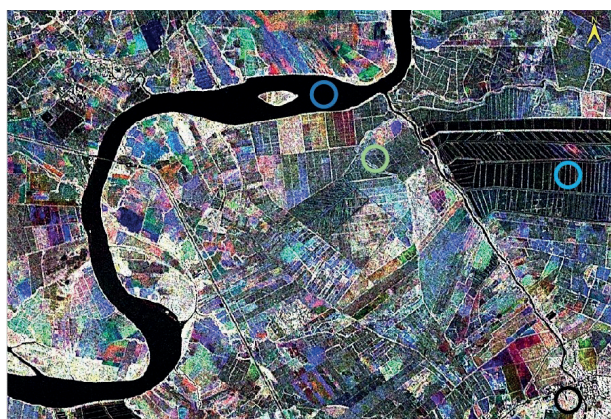


Figura 8.- Resultados estadísticos del proceso Intensity Time Series.



Con ayuda de las herramientas de ENVI, podemos realizar las comparaciones de diferentes comportamientos dieléctricos de varias coberturas, como se muestra en la figura de abajo.

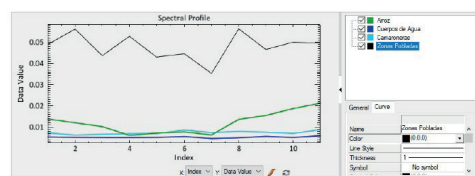


Figura 9.- Comportamientos dieléctricos de varias coberturas.

El mapeo de inundaciones utilizando técnicas del umbral permite identificar agua y posibles zonas de inundación. La Figura 10 indica que el gráfico de la izquierda muestra histogramas de brillo de radar de banda L típicos para aguas superficiales abiertas (\square), vegetación inundada (\diamond) y vegetación no inundada (\triangle). Estos datos de banda L se adquirieron en Wrangle Flats en la costa este del Reino Unido.

El gráfico los histogramas de brillo del SAR para la misma escena y las mismas clases, pero en la longitud de onda de la banda C. Las aguas superficiales abiertas muestran nuevamente un brillo de radar claramente más oscuro, lo que confirma que la determinación de umbrales es un enfoque útil para el mapeo de aguas superficiales.

En este caso práctico que se muestra la vegetación inundada es muy similar a la vegetación no inundada como se observa en el histograma, este es debido en gran parte a la naturaleza de la vegetación del lugar de estudio que posee pastizales bajos en lugar de árboles. Las áreas con una estructura de vegetación vertical más sustancial mostrarán más distinción, y la vegetación inundada mostrará firmas más brillantes en los datos del SAR.

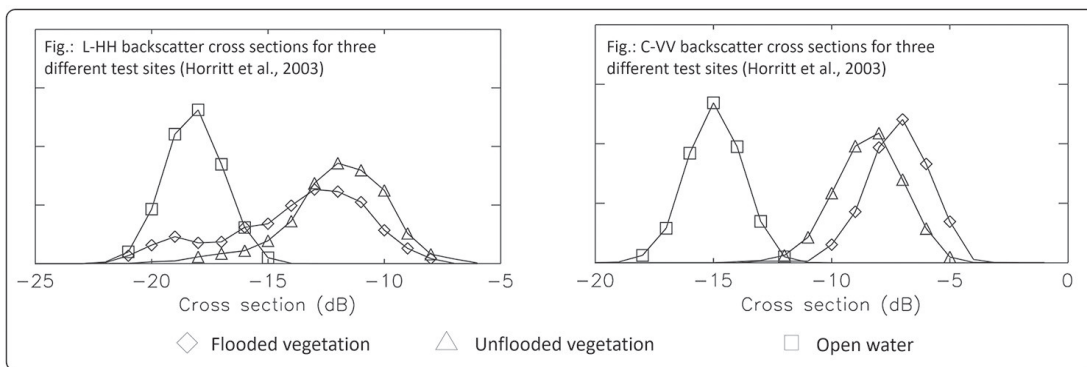
La determinación del umbral óptimo para el mapeo de aguas superficiales no es tan sencillo como la forma y ubicación relativa del “agua superficial” y la “tierra no inundada” porque los histogramas varían según una serie de factores:

- Parámetros del sensor: longitud de onda (λ), polarización, ángulo de visión (Θ).
- Parámetros ambientales: condiciones de viento, estructura de terrenos no inundables que definen su luminosidad.

Sin embargo, como se observa en la Figura 10, se toma como referencia al agua en un rango de -15 a -20 dB (Horritt, Mason, Cobby, Davenport, & Bates, 2003).

CLASIFICACIÓN - MACHINE LEARNING

La composición de imagen de radar, permitió crear mapas de coberturas, mediante métodos de clasificación convencionales dentro de ENVI. En la figura 11 se puede apreciar una pequeña porción del resultado de la clasificación por el método de Mini Batch K-Means.



Horritt, M. S., Mason, D. C., Cobby, D. M., Davenport, I. J., & Bates, P. D. (2003). Waterline mapping in flooded vegetation from airborne SAR imagery. *Remote Sensing of Environment*, 85(3), 271-281.

Figura 10.- Mapeo de inundaciones utilizando técnicas del umbral.

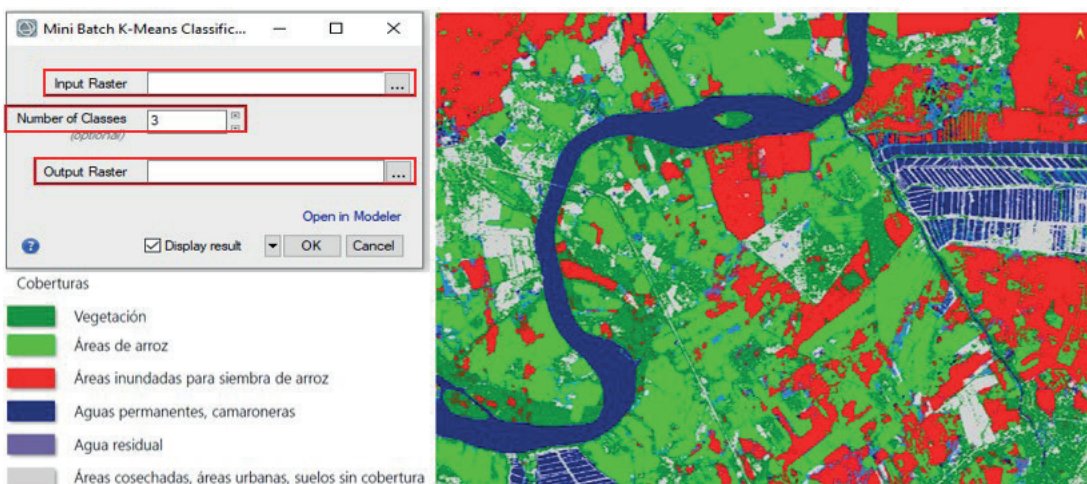


Figura 11.- Proceso de Machine Learning - Mini batch K-Means Classification.

Discriminación de la capa de inundación

Este proceso consiste en refinar la capa de inundación mediante una discriminación del agua detectada, es decir, eliminando posibles detecciones falsas eliminando lo siguiente:

- Agua permanente utilizando una máscara de agua externa para distinguir entre el agua permanente (ríos y lagos) de las aguas relacionadas con inundaciones. Cartografía Base 50 000 – Instituto geográfico Militar.
- Cultivos que pasan el mayor tiempo inundados (cultivos de arroz, teca, etc.). Sistemas Productivos IEE-MAG, 2015 Escala 1:25 000 – Instituto Geográfico Militar .
- Zonas de pendientes consideradas planas o llanas. MAG, 2015.

PUBLICACIÓN WEB - ACTIVACIÓN DE LA CARTA INTERNACIONAL - ECUADOR

El paso final es realizar la publicación y difusión de los datos, la cual se la puede efectuar a través de aplicaciones web o mediante una interfaz de programación de aplicaciones (API). Los productos fueron alojados en la página de Carta Internacional del Espacio y Desastres para su acceso y descarga al público (International

Charter Space & Major Disasters, 2024). Enlace de las activaciones Ecuador (<https://disasterscharter.org/web/guest/activations/-/article/flood-in-ecuador-activation-862->) (Figura 12).

En el caso del Fenómeno del Ciclón Yaku en el 2023 se elaboraron 22 productos, mientras que, para el Fenómeno de El Niño en el 2024 se elaboraron 8 productos, mediante el uso del ENVI y la ayuda complementaria de SNAP, Google Earth Engine y la plataforma del Charter Mapper (Mapas 1 y 2).

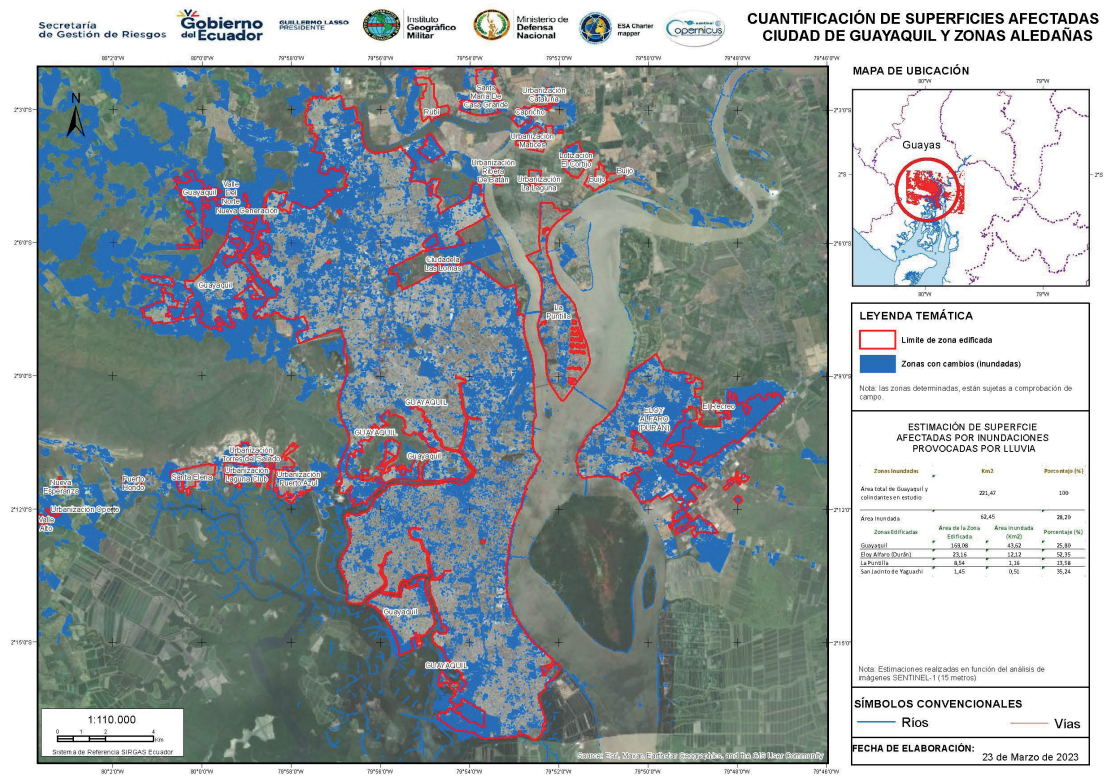
CONCLUSIONES

- El presente artículo se basa en el estudio y aplicación de técnicas del umbral óptimo, utilizando imágenes SAR Sentinel-1 y el software ENVI, lo que permitió cumplir con el objetivo de detectar zonas de inundación de pronta respuesta en las diferentes zonas de interés de la Costa ecuatoriana, y entregar productos al usuario final, la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos y demás instituciones interesadas.
- El valor del umbral seleccionado para el análisis en este estudio fue de -15 a -20 dB, este método permite identificar áreas inundadas utilizando como insumo imágenes radar SAR, estos datos pueden mostrar claras diferencias entre aguas abiertas, vegetación inundada y vegetación no inundada.

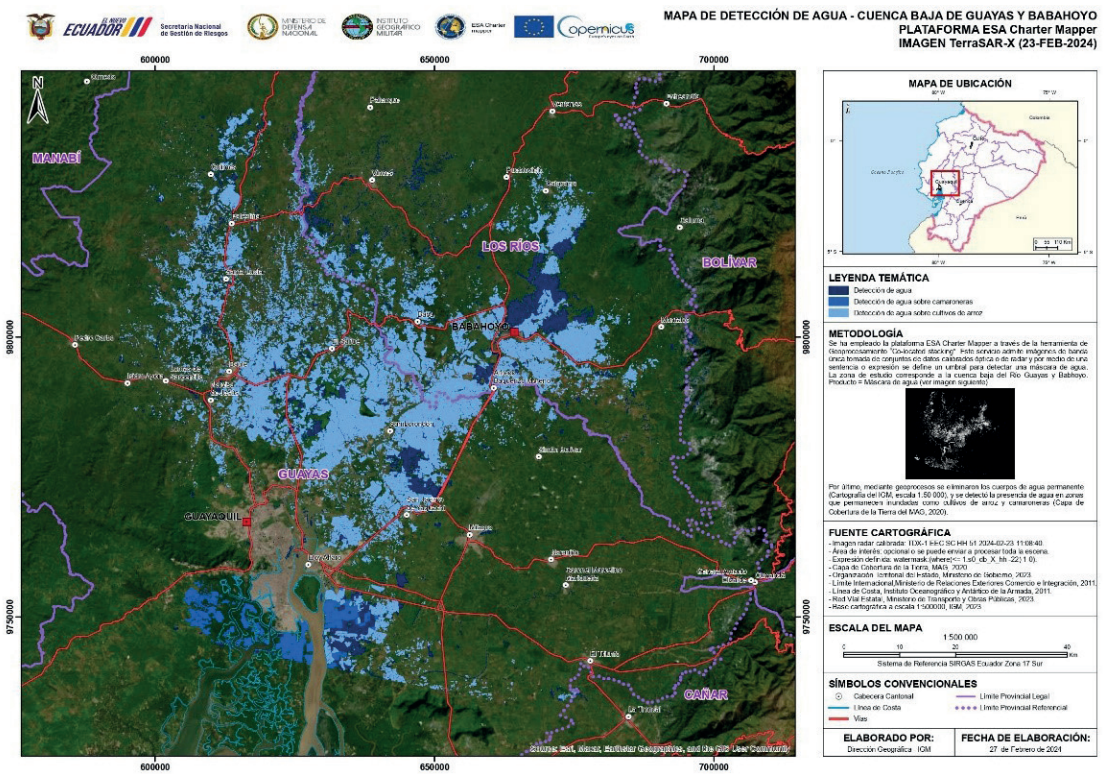


Type of Event:	Flood
Location of Event:	Ecuador
Date of Charter Activation:	2024-02-20
Time of Charter Activation:	15:09
Time zone of Charter Activation:	UTC-05:00
Charter Requestor:	SECRETARÍA DE GESTION DE RIESGOS (SGR)
Activation ID:	862
Project Management:	IGM (Military Geographic Institute)
Value Adding:	Instituto Geográfico Militar NOAA VA (NOAA)

Figura 12.- Datos de la carta de activación de las inundaciones de Ecuador.



Mapa 1.- Superficies afectadas de la Ciudad de Guayaquil y zonas aledañas.



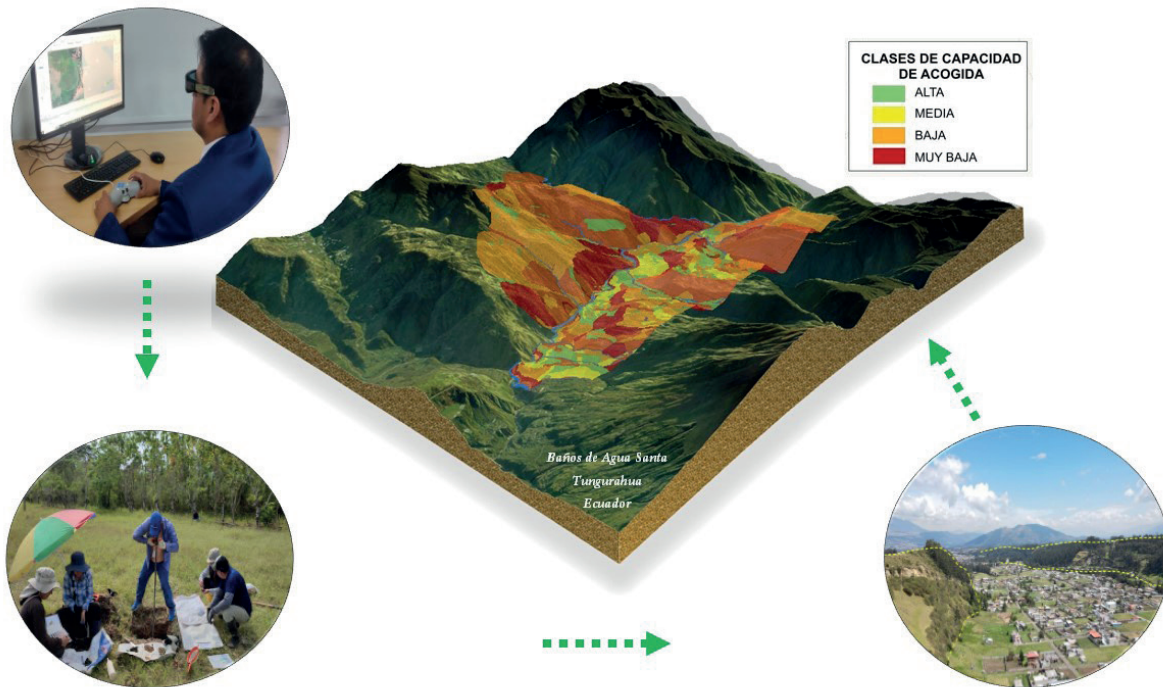
Mapa 2.- Mapa de detección de agua - Cuenca baja de Guayas y Babahoyo utilizando plataforma Charter Mapper.

BIBLIOGRAFÍA

Affairs, O. for O. S., & UN-SPIDER Knowledge Portal. (2006). En Detalle: Práctica Recomendada sobre Mapeo Rápido de Inundaciones y sus Impactos Utilizando Datos SAR de Sentinel-1 y Google Earth Engine.

Horritt, M. S., Mason, D. C., Cobby, D. M., Davenport, I., & Bates, P. D. (2003). Waterline mapping in flooded vegetation from airborne SAR imagery (Remote Sens). Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425703000063>

International Charter Space & Major Disasters. (2024). Charter activations. Recuperado de <https://disasterscharter.org/web/guest/activations/-/article/flood-in-ecuador-activation-862->



Metodología para el modelamiento de las variables biofísicas para la determinación de la capacidad de acogida del territorio

Methodology for modeling biophysical variabilities to determinate the carrying capacity of the territory

Paola López Barba
 paola.lopez@geograficomilitar.gob.ec

Mónica Cruz Naula
 monica.cruz@geograficomilitar.gob.ec

Alex Guamán Chiluisa
 alex.guaman@geograficomilitar.com.ec

Diego Quillupangui Toral
 diego.quillupangui@geograficomilitar.gob.ec

Jairo Cordero Carrión
 jairo.cordero@geograficomilitar.gob.ec

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es presentar la metodología para el modelamiento de las variables biofísicas que permiten determinar la capacidad de acogida del territorio, mediante parámetros geomorfológicos y variables físicas de suelos, sumado a las multiamenazas (deslizamientos, inundaciones y volcánicas) que presenta la zona. Las variables son obtenidas mediante el uso de geotecnologías, iniciando por el análisis de información secundaria que sirve como base para la fotointerpretación, conjuntamente con el trabajo multidisciplinario realizado en campo, insumos utilizados posteriormente para el modelamiento de la información generada, identificando las zonas compatibles con las actividades para construcción

mediante cinco categorías que van desde: muy alta (como la mejor zona) hasta muy baja (zonas incompatibles para este tipo de actividad). La capacidad de acogida del territorio generada mediante la aplicación de esta metodología es un insumo fundamental para la toma de decisiones acertadas a nivel de Gobiernos Autónomos Descentralizados (GAD), respecto a sus Planes de Desarrollo, Ordenamiento Territorial y Gestión del Riesgo, mitigando el peligro de la población a desastres naturales y evitando futuras pérdidas económicas.

Palabras clave: Capacidad de acogida, aptitud física constructiva, geoinformación.

ABSTRACT

The purpose of this study is to present the methodology for modeling biophysical variabilities that allowed the determination of the constructive compatibility through geomorphological and geopedological parameters, adding multithread (sledding, floods, and volcanic) that may appear in the area. These variabilities were obtained, by geo-technology first going by the analysis of secondary information to serve as a base for the photo interpretation together with the multidisciplinary fieldwork. This contributes to generating a model with the information, identifying compatible zones with construction activities through five categories ranging from very high as the best zone to very low to incompatible zones for this type of activity.

The land carrying capacity generated through the enforcement of this methodology is a fundamental input for making correct decisions at the Decentralized Autonomous Governments level, regarding their development plans, territorial planning, and, risk management, mitigating the danger of the population to natural disasters and avoiding future economic losses.

Keywords: carrying capacity, constructive physical suitability, geo-information.

INTRODUCCIÓN

La expansión de las ciudades ecuatorianas no se ha realizado de manera técnica y planificada, sin mencionar que el crecimiento acelerado de la población que para el año 1952 era 3,2 millones de habitantes, mientras que, al año 2024 son 17,9 millones y se estima que para el 2050 serán 23,3 millones, ha provocado que la población se asiente en zonas con alto riesgo a deslizamientos, inundaciones y amenazas volcánicas (INEC, 2022). Entre 1970 y 2010 el número de víctimas sobrepasaron las 1 800, mientras que más de cuarenta mil viviendas fueron afectadas y 2 869 millones de dólares se generaron en pérdidas. (SGR/ECHO/UNISDR, 2012).

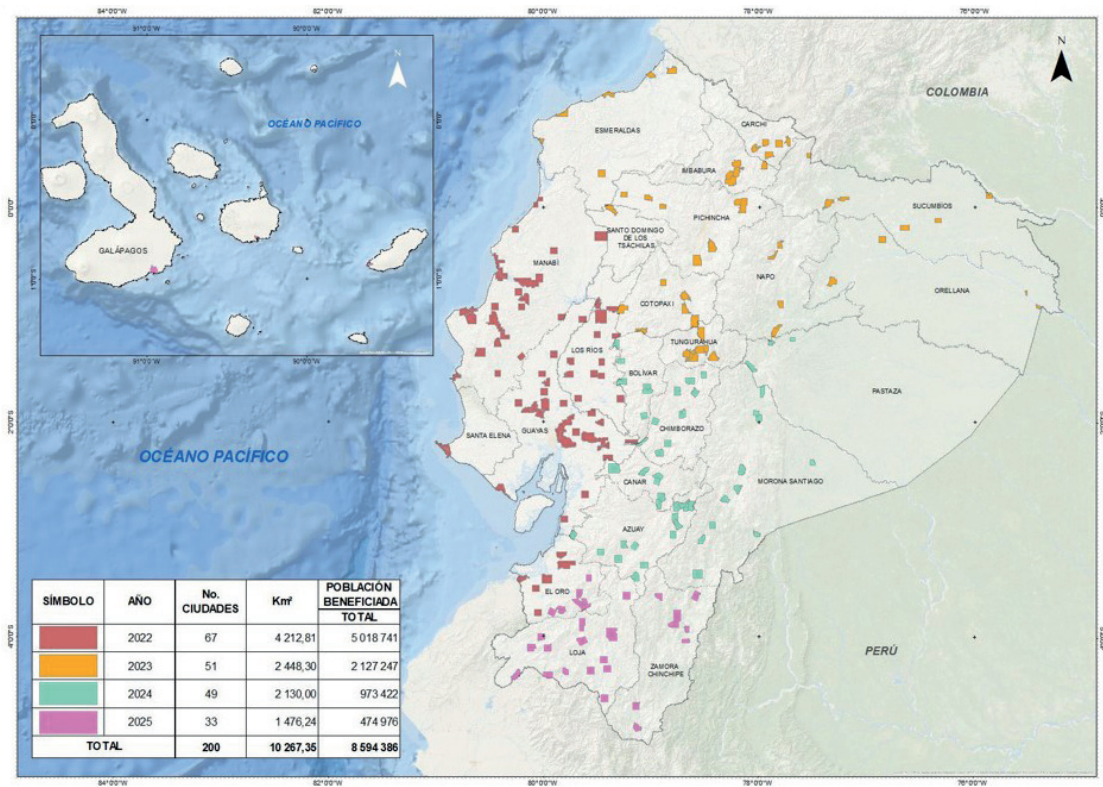
Por lo antes mencionado, el Instituto Geográfico Militar (IGM) ejecutó durante el periodo 2018 – 2019 el proyecto “Generación de información geoespacial

a escala 1: 5 000 para la determinación de la aptitud física del territorio y desarrollo urbano mediante el uso de geotecnologías”, en el cual se intervinieron 2 380,95 km²; a partir del año 2022 hasta el 2025 se ejecuta el proyecto “Determinación de la capacidad de acogida del territorio con fines de desarrollo urbano mediante la generación de geoinformación temática a escala 1: 5 000”, el cual abarcará 10 267,35 km² en 200 ciudades en todo el país y beneficiará a 8 594 387 personas. Este proyecto tiene la finalidad de generar información geoespacial multipropósito (varias temáticas) para la toma de decisiones, gestión de riesgo y fortalecimiento de Planes de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) además, cumplir con el objetivo once para el desarrollo sostenible de las Naciones Unidas, el cual busca lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles. Con el fin de prevenir pérdidas tanto económicas como de vidas por la falta de planeamiento, se ha propuesto el uso de geotecnologías que permiten manejar la información de manera eficiente, integrando varias temáticas (ej. geomorfológica, fotointerpretación de uso y cobertura y análisis de suelos) para el modelamiento de las variables que permitan determinar los mejores espacios para el crecimiento urbano.

El proceso descrito en este documento se basó en metodologías científicas como: Zonneveld (1989), Kwa (2018), Gómez (2007), que plantean la planificación y desarrollo territorial de manera sostenible, mediante el análisis de variables biofísicas y la mínima exposición a los riesgos naturales tomando en cuenta los más frecuentes y los que generan mayores pérdidas en el país (deslizamientos, inundaciones y volcánicas).

La Aptitud Física Constructiva (APFC) se analiza tomando en cuenta seis variables: pendiente, factor geológico, textura del suelo, drenaje y pedregosidad, se utiliza una matriz de decisión y mediante un análisis jerárquico se determina la categoría a la que pertenece cada unidad física identificada en el área de estudio.

Para la determinación de la Capacidad de Acogida (CA) se analiza la APFC junto con las multiamenazas (inundaciones, deslizamientos y volcánicas), mediante una matriz de doble entrada.



Mapa 1.- Intervención de ciudades desde el año 2022 al 2025.

GEOMORFOLOGÍA (FOTOINTERPRETACIÓN DIGITAL EN 3D)

La fotointerpretación inició con la revisión, análisis y evaluación de información referencial de geomorfología y geología, en este contexto y mediante el uso del software ArcGis 10 y la extensión StereoAnalyst se obtuvo una visión estereoscópica del bloque fotogramétrico, posteriormente, se realizó la fotointerpretación y digitalización de las unidades geomorfológicas en 3D con ayuda de un softmouse; dichas geotecnologías permitieron delimitar geoformas con gran precisión, definidas como una porción del paisaje constituida por una misma roca o material superficial y con características similares en cuanto a su génesis, morfología y morfometría (Van Zuidam, 1985; Gustavsson, 2006). Los parámetros utilizados para la fotointerpretación son: morfogenéticos, morfológicos, morfométricos, morfodinámicos, y variables geológicas (Villota, 2005; Pavlopoulos, 2009; Summerfield, 2013; Tricart, 1965).

EDAFOLOGÍA

La generación de información geopedológica, partió de la génesis, litología, depósitos superficiales, geoforma y pendiente (Zinck, 2012); además, se realizó un análisis climático para determinar los regímenes de temperatura y humedad del suelo.

En base a la metodología de la ecología del paisaje (Zonneveld, 1989) la relación suelo-paisaje (Zinck, Metternicht, Bocco y Valle, 2016), la interrelación de los factores formadores del suelo (Jenny, 1941) y antropogénicos (Dudal, 2004; Rossiter, 2007) se obtuvo la caracterización de unidades de paisaje.

APFC

El análisis de la Aptitud Física Constructiva se basó en un modelo empírico cualitativo (De La Rosa, 2008; Reyes et al., 2019; Suango et al., 2018) a través de la matriz, que permitió categorizar la información de dos variables geomorfológicas (pendiente y factor geológico) y cuatro variables de suelos (nivel freático, textura en el perfil, drenaje y pedregosidad en la superficie).

Pendiente

Los rangos de pendiente se modificaron según estudios realizados por el IEE (2013) y Galacho (2013). La Norma Ecuatoriana de la Construcción indica, que se deben realizar estudios geotécnicos en pendientes superiores al 30 % (MIDUVI, 2015), sin embargo, existen técnicas de construcción en pendientes mayores a este rango, con la desventaja de encontrarse en zonas con condiciones de alto riesgo y por otro lado los altos costos que esto genera.

Factor Geológico

Para la categorización del Factor Geológico se utilizaron tres criterios, a) características geotécnicas de las rocas como: resistencia, grado de meteorización, condiciones hidrogeológicas, etc. (Bieniawski, 1989); b) tipo de depósito superficial en función de la composición, grado de consolidación, espesor, grado de meteorización, humedad y estructura; y, c) tipos de erosión como: laminar, en surcos, antrópica, eólica.

Nivel Freático

El nivel freático influye de manera directa en la construcción, debido a que los suelos con evidencia de lámina de agua o indicios de esta a los 30 cm o menos, no son aptos para realizar actividades constructivas. Según el IEE (2018) se establecieron las siguientes categorías de nivel freático: superficial (0 a 30 cm), poco profundo (30 a 60 cm), medianamente profundo (60 a 90 cm), profundo (90 a 120 cm), muy profundo (> 120 cm) y sin evidencia.

Textura del perfil

Dependiendo del tipo de textura del suelo, ésta puede favorecer o perjudicar los procesos de construcción, debido a que, la composición granulométrica del suelo es importante para cualquier estudio, ya sea desde el punto de vista genético o aplicado (Jordán, 2005). En este análisis se ha considerado las siguientes características: permeabilidad baja, compacidad alta y mayor plasticidad; como las mejores condiciones para la construcción (Cortés, 1983; Aguiló, 2004).

Drenaje

Está determinado por las propiedades: estructura, textura, porosidad, existencia de capa permeable, permeabilidad, posición del suelo en el paisaje y pendiente (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, [SENPLADES], 2013). Se analizó esta variable porque permite identificar zonas inundables y húmedas (MAE, 1992). Las categorías establecidas son: excesivo, bueno, moderado y mal drenado.

Pedregosidad superficial

Expresa la presencia o ausencia de fragmentos gruesos que existen en la superficie de un suelo y que puede afectar en las actividades de construcción.

Las categorías son: nula, muy pocas, pocas, frecuentes, abundantes y pedregoso (rocoso). (SENPLADES, 2013).

Los rangos de las diferentes variables que se analizan para la APFC se indican en la Figura 1.

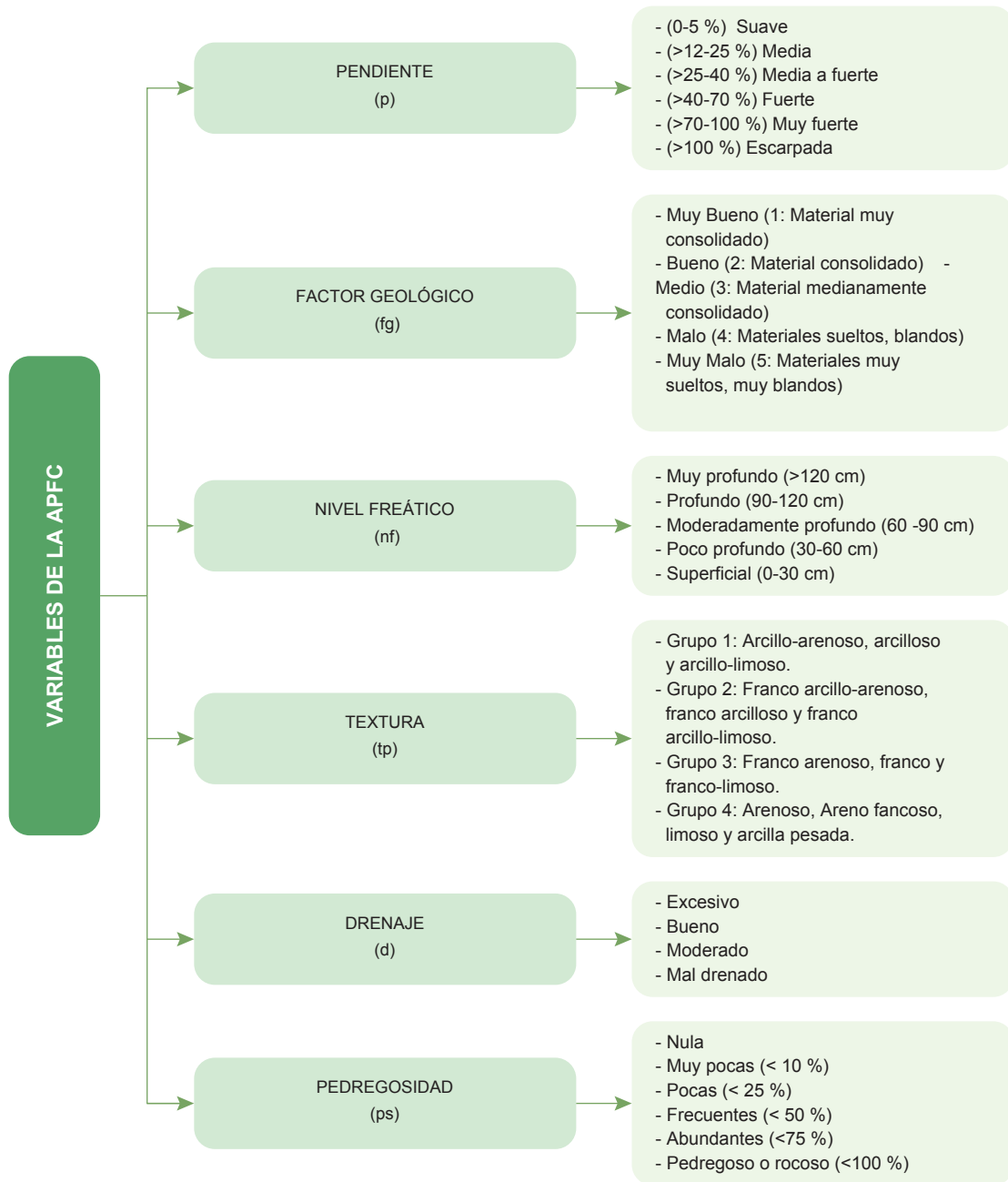


Figura 1.- Variables de la Aptitud Física Constructiva.
Fuente: Adaptado IGM, 2024.

Análisis de la matriz de APFC

El análisis de la matriz se da con la categorización de cada unidad de tierra, dependiendo sus características físicas y se las ubica en siete categorías que van desde muy alta a no apta; siendo muy alta las mejores zonas para la construcción y no apta para lugares no adecuados para asentamientos (Tabla 1). Esta metodología es una adaptación del modelo empírico cualitativo (De La Rosa, 2008; Suango et al., 2018; Reyes et al., 2019).

CAPACIDAD DE ACOGIDA (CA)

Para determinar la CA se analiza las multiamenazas (deslizamientos, inundaciones y volcánicas) aplicando el método aptitud/amenaza (Galacho y Arrebola, 2013). Para las consideraciones de riesgo natural se analizaron los deslizamientos, para lo cual se toma en cuenta la pendiente, litología, cobertura vegetal, profundidad del suelo y meteorización de la roca. Para las amenazas de inundación se utilizó información geoespacial, geomorfológica y de suelos, así como registros de intensidad de precipitaciones (máximas

en 24 horas, con periodos de retorno de 100 años) y, por último, para determinar las amenazas volcánicas se utiliza información de referencia IGEPN, IRD y SNGRE, adaptada a escala 1: 5 000 tomando en cuenta las características geológicas y el criterio técnico del equipo del componente de geomorfología.

Matriz de CA

La matriz de CA se construyó tomando en cuenta la evaluación de APFC y las multiamenazas (deslizamientos, inundaciones y volcánicas). La matriz de capacidad de acogida tiene cinco categorías: muy alta, alta, media, baja y muy baja (Tabla 2). Estas, nos permiten identificar las mejores y peores zonas para la construcción.

SISTEMATIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Se utilizó información secundaria oficial para la generación de bases preliminares a escala 1: 5 000, posteriormente un equipo multidisciplinario realizó trabajos de campo, efectuando la apertura de minicalcatas que permitieron la descripción de variables geomorfológicas y físicas del suelo. Por último, con la información recabada, se generaron los productos finales (geodatabases, mapas, memorias técnicas y reportes) que se encuentran disponibles para descarga en el Geoportal del IGM, dicha información además fue socializada en los respectivos GAD Municipales. www.geoportaligm.gov.ec

CATEGORÍA	MUY ALTA	ALTA	MEDIA ALTA	MEDIA	BAJA	MUY BAJA	NO APTA
LIMITACIONES VARIABLE	Sin	Ligeras	Ligeras a moderadas	Moderadas	Severas	Extremas	Excluyente
PENDIENTE -%-	Hasta 5	Hasta 12	Hasta 25	Hasta 40	Hasta 70	Hasta 100	Cualquiera
FACTOR GEOLÓGICO	Fg1	Fg1 y Fg2	Fg1, Fg2 y Fg3	Fg1, Fg2 y Fg3	Fg1, Fg2, Fg3 y Fg4	Fg1, Fg2, Fg3, Fg4 y Fg5	Cualquiera
NIVEL FREÁTICO -cm-	Sin evidencia	Muy profundo (>120)	Profundo (> 90)	Profundo (> 90)	Moderadamente profundo (> 60)	Poco profundo (> 30)	Cualquiera
TEXTURA DEL PERFIL	Grupo 1	Grupo 1 y 2	Grupo 1, 2 y 3	Grupo 1, 2 y 3	Grupo 1, 2, 3 y 4	Grupo 1, 2, 3 y 4	Cualquiera
DRENAJE	Bueno	Bueno y moderado	Bueno y moderado	Bueno y moderado	Excesivo, bueno y moderado	Mal drenado, excesivo, bueno y moderado	Cualquiera
PEDREGOSIDAD EN LA SUPERFICIE -%-	Sin	Menor a 10	Menor a 25	Menor a 50	Menor a 75	Menor a 100	Cualquiera

Tabla 1: Categorías de la Aptitud Física Constructiva.
Fuente: IGM, 2022.

APFC MULTIAMENAZAS	MUY ALTA	ALTA	MEDIA ALTA	MEDIA	BAJA	MUY BAJA	NO APTA
ALTA	Muy baja	Muy baja	Muy baja	Muy baja	Muy baja	Muy baja	Muy baja
MEDIO	Media	Media	Media	Media	Baja	Muy baja	Muy baja
BAJO	Alta	Alta	Media	Media	Baja	Baja	Muy baja
NULO	Muy alta	Alta	Alta	Media	Baja	Baja	Muy baja

Tabla 2: Categorías de la Capacidad de Acogida.
Fuente: IGM, 2022.

CONCLUSIONES

- La aplicación de esta metodología permitió conocer la compatibilidad de las características físicas del terreno con las amenazas naturales del sector, determinando la capacidad de acogida en 22 capitales provinciales del Ecuador en los años 2018-2019 y 118 ciudades hasta el 2023, beneficiando a 7,1 millones de personas (IGM, 2022).
- La información obtenida y socializada a los diferentes GAD municipales, servirá como una herramienta para la planificación y gestión del territorio. Además, la generación de geoinformación detallada, alimenta la data de variables como geomorfología, suelos, entre otros, generando un inventario temático de gran importancia y utilidad a corto y largo plazo para el país.
- Es importante señalar que dicho trabajo se lo realizó mediante el uso geotecnologías como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), los que permitieron la recopilación, gestión y análisis de diferentes tipos de datos; así como también el desarrollo simultáneo de los diferentes productos de síntesis lo que permitió optimizar recursos, tiempo y costos.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguiló, M., Aramburu, M., Blanco, A., Calatayud, T., Carrasco, R., Castilla, G., & Yoldi, L. (2004). Guía para la elaboración de estudios del medio físico: contenido y metodología. Secretaría General Técnica.
- Bieniawski, Z. (1989). Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. New York: Wiley.
- Cortés, A., & Malagón, D. (1983). Los levantamientos de suelos y sus aplicaciones multidisciplinarias. Centro Interamericano de desarrollo integral de agua y tierras.
- De La Rosa, D. (2008). Evaluación agro-ecológica de suelos. Madrid, España: Ediciones .
- Dudal, R. (2004). The sixth factor of soil formation. Eurasian Soil Science C/C of Pochvovedenie.
- Espinoza, J., Moreno, J., & Bernal, G. (2022). Suelos del Ecuador: clasificación, uso y manejo. Quito, Ecuador: Instituto Geográfico Militar (IGM).
- Galacho, B., & Arrebola, J. (2013). Modelo de evaluación de la capacidad de acogida del territorio con SIG y técnicas de decisión multicriterio respecto a la implantación de edificaciones en espacios rurales. Investigaciones Geográficas, 69-85.
- Gómez, D. (2007). Ordenación territorial. Madrid: Mundi-Prensa.
- Gustavsson, M., Kolstrup, E., & Seijmonsbergen, A. (2006). A new symbol-and-GIS. Science Direct, 90-111.
- IEE. (2013). Memoria técnica de Capacidad de Uso de las Tierras de la ciudad de Quito. Instituto Espacial Ecuatoriano.
- IEE. (2018). Memoria técnica de la ciudad de Machala. Quito: IEE. Disponible en: <https://bit.ly/3Fa2kOL>
- IGM. (2019). Geoportal Instituto Geográfico Militar. Obtenido de https://www.geoportaligm.gob.ec/catalogo/srv/spa/resources.get?uuid=01dde837-d5eb-42fc-8743-3ca72330d86c&fname=mt_sintesis_ambato.pdf&access=public
- IGM. (2022). Geoportal Instituto Geográfico Militar. Obtenido de <https://www.geoportaligm.gob.ec/nextcloud/index.php/s/22%2FMANABI%2FCHONE%2FMEMORIA%20T%C3%89CNICA&openfile=416868>
- INEC. (2010). Sistema Integrado de Consultas. Obtenido de <https://bit.ly/3EMXmXV>
- Jenny, H. (1941). Factors of soil formation. A system of quantitative Pedology. California, Berkley: McGraw-Hill Publications in the Agricultural Sciences.
- Jordán, A. (2005). Manual de edafología. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química. Agrícola de la Universidad de Sevilla. .

- Kwa, C. (2018). 2018. Historical Studies en the Natural Sciences, 180-222.
- MAE. (1992). Guía para la elaboración de estudios del medio físico. Madrid, España.
- MAE. (2013). Sistema de Clasificación de los Ecosistemas del Ecuador Continental. Quito: Subsecretaría de Patriminio Natural. Ministerio del Ambiente del Ecuador. Quito, Ecuador. Obtenido de <http://ide.ambiente.gob.ec/mapainteractivo/>
- MIDUVI. (2015). Norma Ecuatoriana de la Construcción: Viviendas hasta de 2 pisos con luces de hasta 5m. Norma Ecuatoriana de la Construcción. Quito, Ecuador.
- Pavlopoulos, K., Evelpidou, N., & Vassalopoulos, A. (2009). Mapping Geomorphological. Springerlink.
- Reyes, M., Avilés, L., Gómez, E., Galarza, J., & Jácome, P. (2019). Zonificación de capacidad de acogida de la ciudad de Riobamba mediante el enfoque de ecología de paisaje a partir de fotorinterpretación geomorfológica en 3D. Pro Science, 18.
- Rossiter, D. (2007). Classification of urban and industrial soils in the world reference base. Springer, 5.
- SENPLADES. (2013). Catálogo de objetos geográfico versión 2. Quito: SENPLADES.
- SGR/ECHO/UNISDR. (2012). Ecuador: Referencias básicas para la gestión de riesgos 2013-2014. FLACSO. Obtenido de <https://biblio.flacsoandes.edu.ec/libros/digital/54768.pdf>
- Suango, V., Andrade, M., Yopez, J., Avilés, L., & López, A. (2018). Análisis de variables físicas del territorio para el estudio de la expansión del área urbana de la ciudad de Babahoyo, Ecuador. Pro Science, 12.
- Summerfield, M. (2013). Global Geomorphology. Routledge Taylor & Francis Group.
- Tricart, J. (1965). Principes et méthodes de la Géomorphologie. Masson et Cie. Paris: Parcourir les collections.
- Van Zuidam, R. (1985). Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphic. En I. I. (ITC), Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping (pág. 442). Standford: The Hague : Smits Publishers.
- Villota, H. (2005). Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos y zonificación. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Zinck, A. (2012). Geopedología. Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales. Netherlands: ITC, Enschede.
- Zinck, A., Metternicht, G., Bocco, G., & Valle, H. D. (2016). Geopedology. Switzerland: Springer.
- Zonneveld, I. (1989). he land unit - A fundamental concept in landscape ecology, and. SPRINGER Link, 67-86.



Geotecnologías aplicadas en la determinación de la aptitud física constructiva de la ciudad de Portoviejo

Geotechnologies applied to analysis geomorphological and edaphological to determinate the constructive physical suitability in Portoviejo city

Dayana Villacis Jaramillo
dayana.villacis@geograficomilitar.gob.ec

Karol Cuvi Quintana
karol.cuvi@geograficomilitar.gob.ec

RESUMEN

Los sistemas de información geográfica, han evolucionado a través de los años, esto se ve reflejado en el desarrollo de nuevas herramientas tecnológicas para el análisis de los territorios que permiten realizar estudios cartográficos temáticos interdisciplinarios, con mayor detalle y precisión.

Este estudio tiene como objetivo establecer las zonas más aptas para el desarrollo urbano constructivo, basado metodológicamente en la ecología de paisaje, digitalizando unidades geomorfológicas (geoformas) en un área de 147,10 km² de la ciudad de Portoviejo, mediante la fotointerpretación en tres dimensiones, asignando parámetros cuantitativos y cualitativos, además de establecer un factor geológico que

representa las características de las rocas o depósitos superficiales que las componen. El análisis edafológico de la zona de estudio se lo llevó a cabo en campo, donde se determinó las características y clases de los suelos.

Para ello fue necesario determinar la Aptitud Física Constructiva (APFC), y se analizó seis categorías, representadas principalmente por la categoría media alta. La geoforma que predomina es la terraza media, de origen deposicional, con pendientes menores a 5 %, factor geológico medio, texturas franco arcillosas, sin presencia de nivel freático y drenaje bueno.

La información obtenida se destaca por proporcionar datos a escala 1: 5 000, que pueden servir como

guía para la realización de planes de ordenamiento territorial, así como planes de uso y gestión del suelo.

Palabras clave: *Aptitud física constructiva, geotecnologías, geoforma, edafología.*

ABSTRACT

Geographic Information Systems have evolved over the years, this is reflected in development of new technological tools for the analysis of territories that allow interdisciplinary thematic-cartographic studies to be carried out, with greater detail and precision.

This study aims to establish the most suitable areas for constructive urban development, methodologically based on landscape ecology, digitizing geomorphological units (geoforms) in an area of 147.10 km² within Portoviejo city, through photointerpretation in three dimensions, assigning quantitative and qualitative parameters, in addition to establishing a geological factor which represents the characteristics of the rocks or surface deposits that compose them. The edaphic analysis of the study area was carried out in field, where characteristics and classes of the soils were determined. For this, it was necessary to determine the Constructive Physical Aptitude (APFC) [six categories were analyzed], represented mainly by the category medium high. The geoform that predominates is the medium terrace, of depositional origin, with slopes less than 5%, medium geological factor, clay loam textures, without presence of water table and good drainage.

The information obtained stands out for providing data at a scale of 1:5 000, which can serve as a guide for the implementation of territorial planning plans, as well as land use and management plans.

Keywords: *Constructive physical Aptitude, geotechnologies, geoform, edaphic studies.*

INTRODUCCIÓN

En el Ecuador, para el año 1952 se registraron 3,7 millones de habitantes, al año 2023 un total de 18,2 millones¹, y se estima que para el 2050

habrá un total de 22,3 millones². Lo que trae como consecuencia que la población se vaya asentado en las ciudades y sus periferias. A pesar que existen planes de ordenamiento territorial, se han extendido hacia zonas cuyas características no son las más adecuadas, como por ejemplo las llanuras aluviales, que presentan una alta amenaza a inundaciones, o en laderas cuyas pendientes generan una alta amenaza a deslizamientos. Estas amenazas, entre los años 1970 y 2010, han cobrado 1800 víctimas y de 35 a 40 mil viviendas afectadas (SGR, 2012).

Al analizar esta problemática, se plantea la necesidad de la generación de información temática en escala a detalle 1: 5 000; mediante el uso y aplicación de geotecnologías, como Sistemas de Información Geográfica (SIG), que permiten manejar geoinformación del territorio, mediante la generación de productos de apoyo para el Gobierno Autónomo Descentralizado de Portoviejo, por lo antes mencionado, es importante destacar que este estudio se encuentra alineado al Plan Nacional de Desarrollo, específicamente al Objetivo Nro. 10: “Garantizar la soberanía nacional, integridad territorial y seguridad del Estado, el cual contempla al Eje Seguridad Integral, con respecto a la reducción de riesgos ante amenazas naturales o antrópicas”, y el Reglamento a la Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial, Uso y Gestión de Suelo, donde se podrá actualizar planes de desarrollo y ordenamiento territorial, planes de uso y gestión, mediante la realización de una delimitación objetiva del suelo, y así impulsar el desarrollo hacia una ciudad inclusiva, segura, resiliente y sostenible en este caso beneficiando a 280,029³ de habitantes.

La metodología utilizada para la obtención del mapa de APFC, se fundamenta en estudios científicos de ecología de paisaje (Zonneveld, 1989); (Kwa, 2018), se analizaron seis variables, donde se toma como base el método sistemático y holístico del territorio, en función de las características de la unidad básica de análisis territorial (geoforma) (Zinck, 2012), el cuál a través de un modelo empírico cualitativo, define las unidades homogéneas, que se utilizarán para analizar el sitio de muestreo en la fase de campo y por medio de matrices de decisión se determinaron las categorías de APFC.

¹Fuente: <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas/>

²Fuente: <https://www.populationpyramid.net/>

³Fuente: <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/censo-de-poblacion-y-vivienda/>

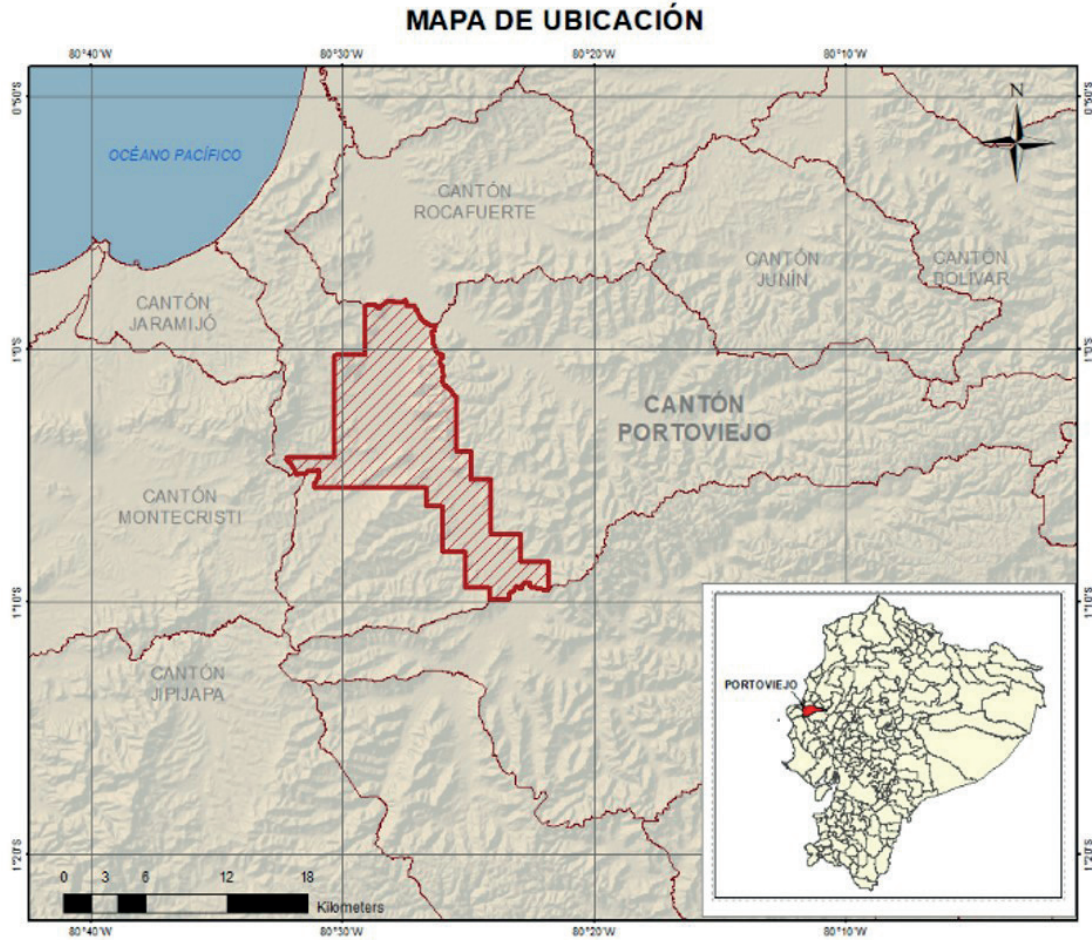


Figura 1.- Mapa de ubicación.
 Fuente: Autores, 2023.

METODOLOGÍA

El área de intervención de la ciudad de Portoviejo (Figura 1), ocupa una superficie de 147,10 km², para la cual se implementó 3 fases de desarrollo: 1) Precampo, que comprende la revisión, análisis y evaluación de la información disponible; 2) Campo, donde se realiza principalmente la validación de la pendiente y el factor geológico (equipo de geomorfología), así como el levantamiento de información del equipo de suelos; y, 3) Poscampo, donde se realizan ciertos ajustes según lo determinado en campo y se evalúa el modelo APFC aplicado en precampo.

Aplicación de geo-tecnologías para la interpretación geomorfológica en 3D

La obtención de unidades geomorfológicas se realizó a través de la fotointerpretación digital en tres dimensiones, se utilizó información geoespacial. El proceso inicia con la obtención y ajuste de bloques fotogramétricos (en formato. blk), sobre el cual se realizó la espacialización de las geoformas, por medio

de la extensión Stereo Analyst del software ArcGIS, que permite obtener una visión estereoscópica del bloque fotogramétrico, apoyándose también de Modelos Digitales de Terreno (MDT).

Para el proceso de digitalización a escala 1: 5 000, se utilizaron pares estereoscópicos, con un total de 118 fotografías aéreas obtenidas en 8 líneas de vuelo, distancia de la muestra en el suelo que es la representación que separa los centros de dos píxeles adyacentes de una fotografía aérea (GSD, por sus siglas en inglés) de 30 cm, y un MDT con una resolución de 5 m. Estos insumos corresponden al año 2 020, proporcionados por el Instituto Geográfico Militar (IGM). Debido a la escala de trabajo, se realizó el análisis de cinco parámetros: 1) morfogenéticos, 2) morfológicos, 3) morfométricos, 4) morfodinámicos y 5) geología (Pavlopoulos, Evelpidou, & Vassilopoulos, 2009). Estos aspectos describen lo que se concibe como la forma de la geoforma, que es un cuerpo natural, constituido por diferente material, volumen, construido sobre un sustrato, resultado tanto de la erosión como de

la acumulación de sedimentos (Morláns , 2005); (Martinez , Samacá, López, & Vargas, 2015), permitiendo la obtención de unidades constituidas por una misma roca o material superficial o que compartan características similares en cuanto a los parámetros geomorfológicos (Van Zuidam, 1986).

Dentro de las unidades geomorfológicas, se utilizó:

1) la pendiente, que es la representación del ángulo existente entre la superficie del terreno y la horizontal. Su valor se expresa en grados de 0° a 90° o en porcentaje (Servicio Geológico Colombiano, 2013). Cabe mencionar que no se imposibilita la construcción en lugares con pendientes fuertes, hoy en día existen técnicas de construcción que solventan estas limitaciones, pero si aumenta el costo económico y los riesgos que se pueden producir (Orellana, 2015); y,

2) el factor geológico, para su análisis se establecieron tres criterios:

Ponderación de la litología (PL), son características geotécnicas de la roca, determinadas con base al estudio del macizo rocoso establecido por (Bieniawski, 1989). Se asigna valores del 1 al 5 (Muy bueno a muy malo).

Ponderación del tipo de depósito superficial (PTDS), se analiza el tipo de depósito y en función de su composición, grado de consolidación, espesor, grado de meteorización, humedad y estructura, de igual manera valores del 1 al 5 (Muy bueno a muy malo).

Con ello se analiza una primera matriz de doble entrada para obtener la susceptibilidad litológica (SL), aplicando la fórmula 1.

$$SL = PL_{vs} PTDS \quad [1]$$

Ponderación del tipo de erosión (PTERO), de acuerdo al grado de erosión, desde sin evidencia (1); laminar (2); en surcos (3); antrópica (4); y siendo las más severas las erosiones del cauce, cárcavas y marina (5).

Para la obtención del factor geológico se aplicó la fórmula 2 se relaciona mediante la matriz de doble entrada entre la susceptibilidad litológica y la ponderación del tipo de erosión.

$$FG = SL_{vs} PTERO \quad [2]$$

Los parámetros geomorfológicos, están almacenados dentro de una geodatabase (GDB), que sirve de insumo para el análisis edafológico.

Desarrollo edafológico

En función de la cartografía geomorfológica generada, se realiza el levantamiento de información, caracterización y evaluación edafológica (Gobin, Campling, Deckers, & Feyen, 2000). Teniendo como base la relación suelo-paisaje, es decir, como contribuye el paisaje para la formación y evolución del suelo (Zinck, Metternicht, Bocco, & Del Valle, 2016), además de la interrelación de los factores formadores del suelo como son material parental que se desarrolla en función del clima, relieve, biota y su interacción en un determinado tiempo (Jenny, 1941), así como también el factor antropogénico (Dudal, 2004); (Rossiter, 2007).

Obtención de la APFC

La APFC es la capacidad que tiene un territorio para albergar un crecimiento constructivo o una expansión urbana (Suango, y otros, 2018), la metodología aplicada se acopla a un modelo empírico cualitativo (De La Rosa, 2008); (Suango, Andrade, Yépez, Avilés, & López, 2018); (Reyes, Avilés, Gómez, Galarza, & Jácome, 2019), mediante la aplicación de matrices de doble entrada; donde se analizan dos variables geomorfológicas como son pendiente y factor geológico; y, cuatro variables de suelos como son nivel freático, textura en el perfil, drenaje y pedregosidad en la superficie, descritas a continuación

Nivel freático. - Según (IGAC, 2010a) el nivel freático es una lámina de agua que satura transitoria o permanentemente los poros del suelo en una sección determinada. Con ello se pudo determinar que para la categoría APFC muy alta no existe evidencia de nivel freático, así como en la categoría muy baja el nivel freático es superficial.

Drenaje. - El drenaje de un suelo expresa la rapidez con que se elimina el agua sobrante en relación con las aportaciones (SENPLADES, 2013a). Un drenaje bueno se encuentra en la categoría apto y apto con ligeras limitaciones mientras que los suelos mal drenados se encuentran en la categoría apto con extremas limitaciones.

Pedregosidad en la superficie. - Se refiere a la presencia o ausencia de fragmentos gruesos superficiales que

afectan el desarrollo de actividades constructivas. También incluyen aquellos que se exponen parcialmente (Aguiló, y otros, 2004). Dónde la categoría muy alta no posee pedregosidad o la categoría muy baja posee una pedregosidad menor al 100 %.

Textura en el perfil. - La textura indica el contenido relativo de las partículas de diferente tamaño como la arena, el limo y la arcilla (IGAC, 2010a); (Soil Survery Staff, 2014). La clasificación de los suelos se realizó con el triángulo de la textura (González , Leal, Lillo, De Bustamante, & Palacios, 2012).

Los grupos texturales (Tabla 1) se dividen en cuatro, en función al porcentaje de arcilla (Aguiló, y otros, 2004), y se relacionan con la matriz de APFC, en donde, por ejemplo, en la categoría muy alta se encuentran las texturas del grupo A y en la categoría muy baja se encuentran las texturas del grupo D.

El proceso final de obtención de APFC se refleja en la Tabla 2, donde se indican las variables para definir sus clases, obteniendo siete categorías las cuales reflejan las zonas con mayores o menores limitaciones para el establecimiento de edificaciones. De tal manera que las variables o limitantes tiene una relación inversamente proporcional a las categorías de APFC, es decir mientras menos limitantes presenta la zona, posee una categoría muy alta o viceversa.

Evaluación del modelo de APFC

Se lo realizó mediante un muestreo no probabilístico (Chuviego , 2010); (Otzen & Manterola , 2017), para lo cual se determina el tamaño de la población, con base en la metodología de la ecología de paisaje, relacionando, regímenes de humedad y temperatura del suelo, génesis, descripción litológica, geoforma, pendiente.

GRUPO A	GRUPO B	GRUPO C	GRUPO D
Arcillo-arenoso	Franco-arcillo-arenoso	Franco-arenoso	Arenoso
Arcilloso	Franco-arcilloso	Franco	Areno-francoso
Arcillo-limoso	Franco-arcillo-limoso	Franco-limoso	Limoso Arcilla pesada

Tabla 1: Agrupación de grupos texturales.
Fuente: Autores, 2023.

CATEGORÍA	MUY ALTA	ALTA	MEDIA ALTA	MEDIA	BAJA	MUY BAJA	NO APTA
LIMITANTES VARIABLES	SIN	LIGERAS	LIGERAS A MODERADAS	MODERADAS	SEVERAS	EXTREMAS	EXCLUYENTES
PENDIENTE	plana a muy suave	suave	media	media fuerte	fuerte	muy fuerte	cualquiera
(pte) %	pte 0-5	pte 5-12	pte 12-25	pte 25-40	pte 40-70	pte 70-100	pte 0- >200
FACTOR GEOLOGICO (FG)	muy bueno	muy bueno, bueno	muy bueno, bueno, medio	muy bueno, bueno, medio	muy bueno, bueno, medio, malo	cualquiera	cualquiera
NIVEL FREÁTICO (nf) cm	sin evidencia	muy profundo	profundo	profundo	moderadamente profundo	poco profundo	cualquiera
TEXTURA DEL PERFIL (text p)	grupo A	grupo A-B	grupo A-B- C	grupo A-B- C	grupo A-B- C- D	grupo A-B- C- D	cualquiera
DRENAJE (dr)	bueno	bueno, moderado	bueno, moderado	bueno, moderado	bueno, moderado, excesivo	moderado, excesivo, mal drenado	cualquiera
PEDREGOSIDAD SUPERFICIAL (ps) %	sin ps	< 10	< 25	< 50	< 75	< 100	cualquiera

Tabla 2: Matriz para definir las categorías de APFC.
Fuente: Autores, 2023.

Posteriormente, se determinó el tamaño de la muestra mediante la aplicación de la fórmula 3 para variables cualitativas con población finita (Aguilar, 2005). Con el tamaño de la muestra, se aplicó la técnica por conveniencia para la determinación de los sitios de muestreo (Otzen & Manterola, 2017), que consiste en una selección previa de los lugares a muestrear, definiendo aleatoriamente los mismo donde se realizarán las minicalcatas y barrenaciones.

$$n = (N Z^2 pq) / (d^2(N-1) + Z^2 pq) \quad [3]$$

n	=	Tamaño de muestra
N	=	Tamaño de la población
Z	=	Nivel de confianza.
d	=	Exactitud absoluta.
p	=	Proporción aproximada del fenómeno en estudio en la población de referencia
q	=	Proporción de la población de referencia que no presenta el fenómeno en estudio (1 - p).
		<i>Probabilidad de éxito.</i>
		<i>Probabilidad de fracaso.</i>

RESULTADOS

La morfoedafología de la zona de estudio se caracteriza por asentarse sobre los paisajes: 1) colinas muy arcillosas sobre arcillas y lutitas; y, 2) valles fluviales, con complejos de terrazas indiferenciadas, concordando con los estudios realizados por (Winckell, Zebrowski, & Sourdat, 1997).

Se generaron 25 geoformas diferentes, donde las predominantes son dos: terrazas medias de origen deposicional, que representan 4 985,24 ha (33,89 % respecto al área total de estudio), con pendientes menores al 5 %, asociadas a depósitos aluviales, compuestos principalmente por arcillas, limos y arenas de grano fino a medio, depósitos medianamente consolidados; seguido de relieves colinados medios de origen tectónico erosivo, abarca un área de 2 364,81 ha (16,08 %), con pendientes mayores al 12 %, asociados en su mayoría a la Formación Villingota, constituida por una secuencia sedimentaria subhorizontal de areniscas, limolitas y lutitas, rocas moderadamente meteorizadas. Ambos representados por un factor geológico medio.

En Portoviejo se encontró tres tipos de niveles freáticos (sin evidencia, profundo y superficial), donde se pudo determinar que no hay mayor limitación de la línea de agua en los suelos, es decir, no existe evidencia de nivel freático.

De igual manera se pudo apreciar tres tipos de drenajes (bueno, moderado y mal drenado), predomina el bueno, es decir, la eliminación del agua de precipitación es fácil, aunque no rápida, por lo general son suelos sin o mínimo porcentaje de moteados.

En cuanto a la pedregosidad superficial se clasificó tres tipos (muy poca, poca y nula), siendo la nula la más representativa, es decir, que no existen fragmentos gruesos en los perfiles.

De acuerdo al análisis de campo se evaluó nueve tipos de texturas. Donde la textura franco arcilloso es la más representativa, está distribuida, principalmente, en los relieves colinados, con un régimen climático del suelo de temperatura isohipertérmico y régimen de humedad ústico.

Las categorías que se determinaron de APFC fueron seis: 1) alta; 2) media alta; 3) media; 4) baja; 5) muy baja; y 6) no apta para fines constructivos (Figura 2). Donde la APFC predominante es la categoría media – alta (color verde pastel), con 5 177,03 ha. Cuyas principales limitantes que presentan son pendientes hasta el 25 %, factor geológico medio, poca pedregosidad en la superficie, representando el 35,19 % de una zona apta para la construcción.

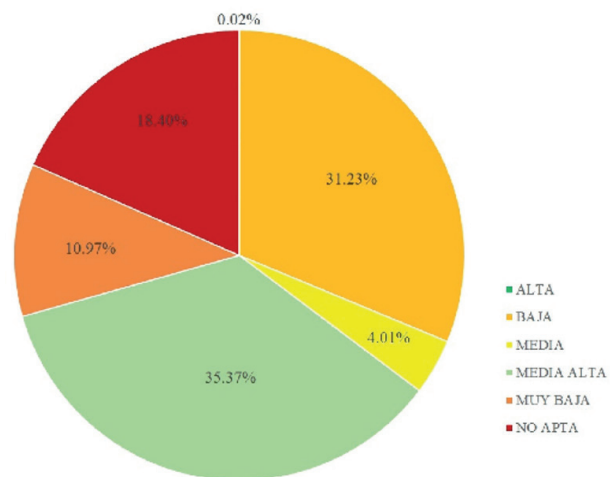
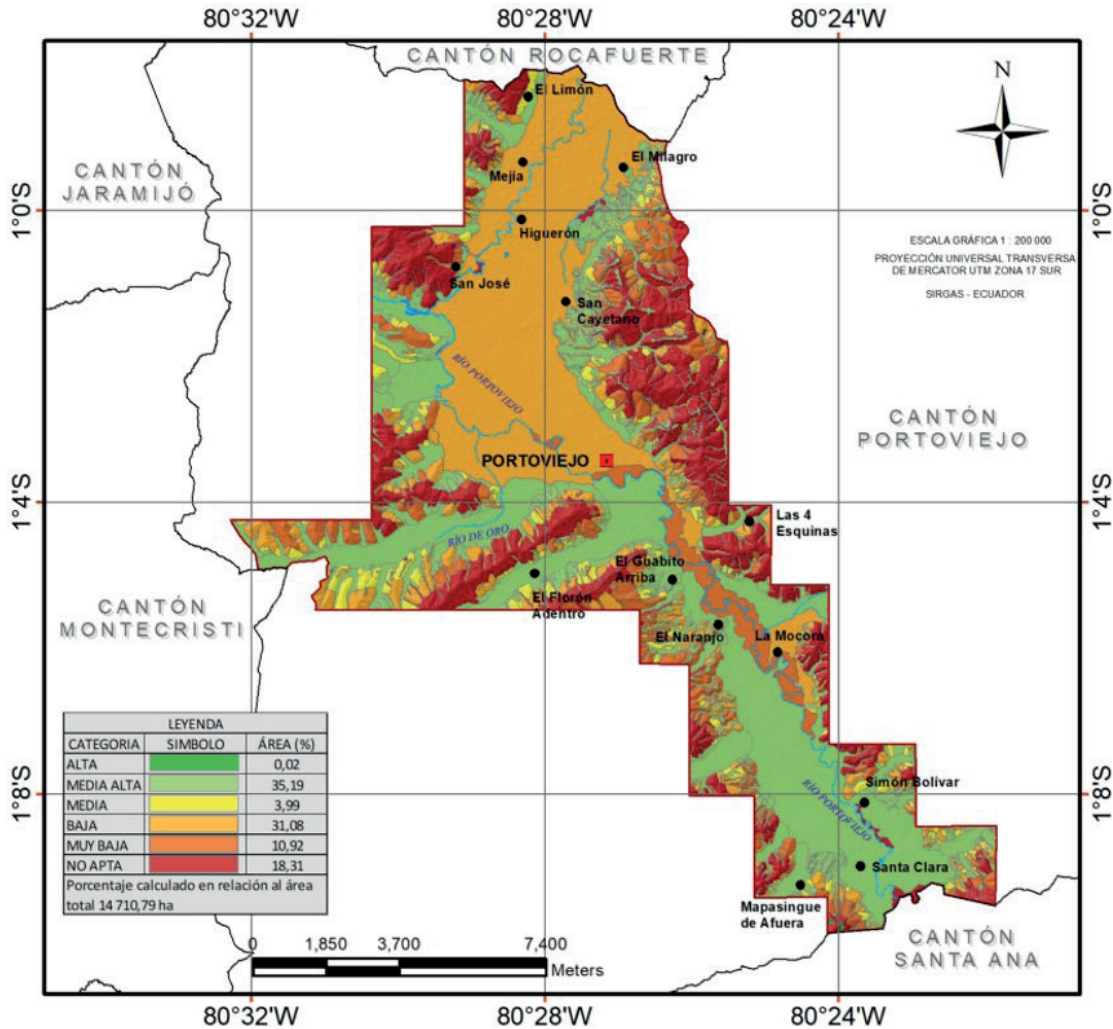


Figura 2: Distribución de APFC.
Fuente: Autores, 2023.

En la Mapa 1, se puede observar el mapa de categorización final de la APFC, y también se evidencia que la zona consolidada se encuentra sobre una categoría baja (color mostaza), principalmente por el tipo de textura arenosa. En Portoviejo se determinaron 627 unidades paisajísticas, de las cuales se estableció un tamaño de muestra de 35 calcatas para realizar el muestreo en campo; el porcentaje de acierto fue de

77%, existiendo una concordancia sustancial o considerable entre los datos obtenidos en campo y los generados en gabinete, el 23% que no coincidió se debe principalmente a la modificación de los rangos de pendientes.

Las áreas coloreadas de rojo en el Mapa 1 que representan el 18,40%, determinan las zonas no aptas para fines constructivos, donde la principal limitante es la pendiente mayor a 100 %, factor geológico muy malo y texturas arenosas.



Mapa 1.- Clases de APFC de acuerdo a sus limitaciones.
Fuente: Autores, 2023.

CONCLUSIONES

- El producto generado a escala 1: 5 000, es un insumo de gran utilidad para el GAD de Portoviejo, ya que le permitirá implementar planes de desarrollo y ordenamiento territorial, planes de uso y gestión, así como también delimitar técnicamente el suelo.
- Mediante la aplicación de los SIG se pudo interpretar digitalmente, dando una clasificación a las formas del terreno, y con el uso de geotecnologías se pudo realizar desde gabinete un análisis cercano a la realidad de la ciudad optimizando tiempo y costos, validando esta información en campo minimizando esfuerzos y recursos; determinando los lugares que presentan menores limitaciones para la construcción.
- La geoinformación obtenida en el presente estudio, permitió definir si un espacio de terreno es óptimo para construir o si se requiere algún tratamiento para mejorar su condición, salvo el caso de obras de mayor envergadura que implicarían estudios y ensayos específicos geológicos/geotécnicos, representando mayores costos.
- Al sintetizar variables geomorfológicas y edafológicas se determinó la APFC y su zonificación en la ciudad de Portoviejo, estableciendo que las categorías que presentan un mejor nivel para el desarrollo urbano constructivo son las categorías alta, media alta y

media, zonas caracterizadas por pendientes muy suaves, de textura franco arcilloso, mientras que las áreas que muestran las categorías baja, muy baja y no aptas, donde se evidencian pendientes fuertes, podrían ser aprovechadas para realizar actividades de tipo conservación de bosque nativo.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, S. (2005). Fórmulas para el cálculo de la muestra en investigaciones de salud. *Salud en Tabasco*, 11, 333-338. Obtenido de <https://bit.ly/2PY4Fm5>
- Aguiló, M., Aramburu, M., Blanco, A., Calatayud, T., Carrasco, R., Castilla, G., & Yoldi, L. (2004). Guía para la elaboración de estudios del medio físico. Contenido y metodología. Ministerio de Medio Ambiente. Obtenido de <https://bit.ly/2FPLTZ5>
- Bieniawski, Z. (1989). Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. New York: Wiley. Obtenido de <https://bit.ly/2YYx8fM>
- Chuviego, E. (2010). Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio. Obtenido de <https://bit.ly/2Py6QOm>
- De La Rosa, D. (2008). Evaluación agro-ecológica de suelos. Madrid, ES: Ediciones Mundi-Prensa. Obtenido de <https://bit.ly/2CNKXUw>
- Dudal, R. (2004). THE SIXTH FACTOR OF SOIL FORMATION. *Eurasian Soil Science C/C of Pochvovedenie*, 38, S60.
- Galacho, F., & Arrebola, J. (2013). Modelo de evaluación de la capacidad de acogida del territorio con SIG y técnicas de decisión multicriterio respecto a la implantación de edificaciones en espacios rurales. *Investigaciones Geográficas*(60), 69-85. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.14198/INGEO2013.60.04>
- Gobin, A., Campling, P., Deckers, J., & Feyen, J. (Agosto de 2000). Integrated Toposequence Analyses to combine local and scientific knowledge systems. *Geoderma*, 97(1-2), 103-123. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(00\)00029-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(00)00029-X)
- González, V., Leal, M., Lillo, J., De Bustamante, I., & Palacios, P. (2012). Guía de caracterización edáfica para actividades de regeneración de aguas residuales en usos ambientales. España: Consolider Tragua. Obtenido de <https://acortar.link/NmqzZb>
- IEE. (2013). Memoria técnica de Capacidad de Uso de las Tierras de la ciudad de Quito. Instituto Espacial Ecuatoriano, 1- 45. Obtenido de <https://cutt.ly/9rwf7qj>
- IEE. (2018b). Memoria técnica de la ciudad de Machala generada durante el proyecto: "Aptitud física constructiva del territorio escala 1: 5000". Instituto Espacial Ecuatoriano. Obtenido de <https://bit.ly/3Fa2kOL>
- IGAC. (2010a). El ABC de los suelos para no expertos. Bogotá. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Jenny, H. (1941). Factors of soil formation. A system of quantitative Pedology. Berkeley: McGraw-Hill Publications in the Agricultural Sciences. University of California,. Obtenido de <https://amzn.to/2WF2RAf>
- Kwa, C. (01 de Abril de 2018). The Visual Grasp of the Fragmented Landscape: Plant Geographers vs. Plant Sociologists. *Historical Studies in the Natural Sciences*, 48(2), 180-222. Obtenido de <https://doi.org/10.1525/hsns.2018.48.2.180>
- Martinez, N., Samacá, W., López, H., & Vargas, S. (2015). Sistema de clasificación geomorfológica aplicado a los levantamientos de suelos. Colombia: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).
- Morláns, M. C. (2005). Introducción a la Ecología del Paisaje. Catamarca: Editorial Científica Universitaria - Universidad Nacional de Catamarca. Obtenido de <https://acortar.link/BxLIwA>
- Narro, E. (1994). Física de suelos: con enfoque agrícola. México, D.F., Trillas. Obtenido de <https://bit.ly/2GdrNIB>
- Orellana, M. (2015). Evaluación de la capacidad de acogida del territorio para usos urbanos mediante el uso de SIG y técnicas de evaluación multicriterio. El caso de la urbanización difusa en la Axarquía (Málaga).

- España: Tesis de pregrado. Universidad de Málaga. Obtenido de <https://bit.ly/2w0ZDth>
- Otzen, T., & Manterola, C. (2017). Técnicas de Muestreo sobre una Población a Estudio. *International Journal of Morphology*, 35(1), 227-232. Obtenido de <https://cutt.ly/yrgwEBC>
- Pavlopoulos, K., Evelpidou, N., & Vassilopoulos, A. (2009). Mapping Geomorphological Environments. Obtenido de <https://bit.ly/34qWpB6>
- Reyes, M., Avilés, L., Gómez, E., Galarza, J., & Jácome, P. (Enero de 2019). Zonificación de capacidad de acogida de la ciudad de Riobamba mediante el enfoque de ecología de paisaje a partir de fotointerpretación geomorfológica en 3D. *PRO-SCIENCES: REVISTA DE PRODUCCIÓN, CIENCIAS E INVESTIGACIÓN*, 3(18), 10-18. Obtenido de <https://cutt.ly/qrgwAm9>
- Rositer, D. (17 de Febrero de 2007). Classification of Urban and Industrial Soils in the World Reference Base for Soil Resources (5pp). 7, 96-100. Obtenido de <https://bit.ly/2UdKp03>
- SENPLADES. (2013a). Catálogo Nacional de Objetos Geográficos Versión 2.0. 1-466. Obtenido de <https://bit.ly/2UhVnFI>
- Servicio Geológico Colombiano. (2013). Susceptibilidad por Geomorfología. Universidad Industrial de Santander.
- SGR. (2012). Referencias básicas para la gestión de riesgos 2013-2014. Secretaría de Gestión del Riesgo, 62-63. Obtenido de <https://bit.ly/2CajoYf>
- Soil Survey Staff. (2014). Claves para la Taxonomía de suelos (Décima segunda ed.). (N. R. Service, Ed.) U.S. Department of Agriculture. Obtenido de <https://bit.ly/2LxcRts>
- Suango, V., Andrade, M., Yépez, J., Avilés, L., & López, A. (2018). Análisis de variables físicas del territorio para el estudio de la expansión del área urbana de la ciudad de Babahoyo, Ecuador. *Pro Sciences*, 2(14), 3-12.
- Suango, V., Rodríguez, K., Moreno, J., Andrade, S., Díaz, J., & Yépez, J. (2018). Aptitud física constructiva. Caso de estudio: Ciudad de Pedernales. Polo de Conocimiento, 381-400. Obtenido de <https://n9.cl/7334f>
- Van Zuidam, R. (1986). Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping. Obtenido de <https://stanford.io/2HXepv8>
- Winckell, A., Zebrowski, C., & Sourdat, M. (1997). Los paisajes naturales del Ecuador. Quito: IGM. Obtenido de <https://bit.ly/2PpojIH>
- Zinck. (2012). GEOPEDOLOGIA. Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales. ITC Special Lecture Notes Series. Obtenido de <https://bit.ly/2OMm9AJ>
- Zinck, J., Metternicht, G., Bocco, G., & Del Valle, H. (2016). Geopedology. Springer International Publishing Switzerland. Obtenido de <https://n9.cl/vxzs5>
- Zonneveld, I. (1989). The land unit - A fundamental concept in landscape ecology, and. *Landscape Ecology*, 67-86. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/BF00131171>



Zonificación paisajística con enfoque territorial del cantón La Libertad, provincia de Santa Elena

Landscape zoning with territorial approach in La Libertad, Santa Elena province

Gandhy Pérez García
gandhy.perez@geograficomilitar.gob.ec

Patricio Guayaquil Albarracín
sebastian.guayaquil@geograficomilitar.gob.ec

Cristian Marín Cajamarca
cristian.cajamarca@geograficomilitar.gob.ec

RESUMEN

Esta investigación se fundamenta en el uso aplicado de los Sistemas de Información Geográfica [SIG], dentro del proceso de zonificación paisajística para el acertado aprovechamiento de los recursos naturales y antrópicos en función de problemas y potencialidades del cantón La Libertad en Ecuador. La metodología utilizada se basó en la interpretación de unidades geomorfológicas, que permitió la caracterización del medio físico, además se realizó la interpretación del uso y cobertura de la tierra con la finalidad de describir el medio biótico; generando geoinformación que refleja 37 unidades de paisaje y además de la información estructurada temática de geomorfología, suelos y capacidad de uso de las tierras del cantón. Las conclusiones de esta investigación reflejan la estrecha relación existente entre la información primaria y

secundaria, la potencialidad del uso de los SIG para el análisis territorial y la consecuente toma de decisiones adecuadas en la zonificación territorial.

Palabras clave: Zonificación, Paisaje, Suelos, Capacidad de uso de las tierras.

ABSTRACT

This research is based on the applied use of Geographic Information Systems [GIS], within the landscape zoning process for the correct use of natural and anthropic resources according to problems and potentialities in La Libertad, Ecuador. For the methodology, physical environment was characterized

by the interpretation of geomorphological units, in addition to the interpretation of land use and land cover in order to describe the biotic environment; generating geoinformation that shows 37 landscape units and structured thematic structured information on geomorphology, soils and land use capacity. The conclusions of this research shows the close relationship between primary and secondary information, the potential of the use of GIS for territorial analysis and the consequent adequate decision-making in territorial zoning.

Keywords: Zoning, Landscape, Soils, Land use capacity.

INTRODUCCIÓN

La gestión del ordenamiento territorial y el uso del suelo vincula sistemas interdependientes como dinámica poblacional, productiva, recursos naturales y servicios ambientales que permite enriquecer los Planes de Ordenamiento Territorial desde un enfoque de concepción holística, vinculando dentro del cumplimiento de los mismos un análisis integral tanto de variables físicas y bióticas como instrumentos de planificación indispensables a implementar por parte de los Gobiernos Autónomos Descentralizados [GAD] (Acosta et al., 2016).

Como herramientas esenciales para el análisis territorial, se debe enfatizar en el fortalecimiento tanto de los sistemas de información geográfica como en las instituciones técnicas que producen información temática oficial, con mira a la mejora continua de los estándares técnicos de manejo de la información espacial que permite el intercambio y uso eficiente de la información (Acosta et al., 2016).

La información temática que a continuación se presente es resultado de la ejecución del proyecto “Determinación de la capacidad de acogida del territorio con fines de desarrollo urbano mediante la generación de geoinformación temática a escala 1: 5 000”, elaborado por el Instituto Geográfico Militar de Ecuador y financiado por la Secretaría de Planificación y Desarrollo (SENPLADES). En este proyecto se tiene planificado intervenir 221 cabeceras cantonales a nivel nacional entre los años 2022 y 2025, con el fin de definir la aptitud física del territorio para

desarrollo urbano mediante el procesamiento y análisis de información geoespacial multipropósito para toma de decisiones, gestión de riesgo y fortalecimiento de los Planes de Ordenamiento Territorial a nivel nacional (Instituto Geográfico Militar [IGM], 2022a).

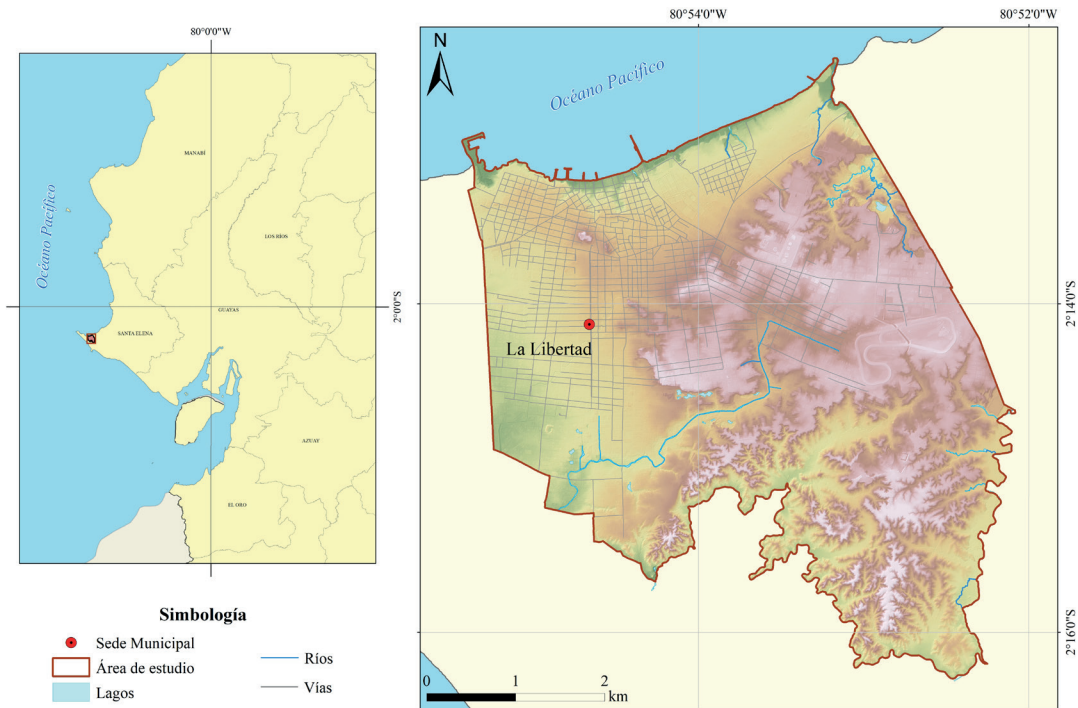
Basados en la problemática analizada se puede llegar al cuestionamiento: ¿La interacción de los SIG y el estudio de la zonificación paisajística involucrando unidades como geomorfología, cobertura y uso del suelo, síntesis del suelo y factores socioeconómicos, permiten realizar un análisis integral territorial?

Para responder dicha interrogante se plantea la ejecución de las siguientes actividades:

- a) Zonificar las unidades paisajísticas mediante la identificación de las variables físicas (geomorfología, suelos, clima) y bióticas (uso y cobertura de la tierra).
- b) Generar mapas temáticos de síntesis en función de las variables analizadas y la generación de cartografía básica de la ciudad de La Libertad.

ÁREA DE ESTUDIO

Para la presente investigación se estableció al cantón La Libertad como área de estudio, cuyo límite político es el propuesto por el Comité Nacional de Límites Internos [CONALI]; la ciudad de La Libertad es su cabecera cantonal, siendo la urbe con mayor densidad poblacional ubicada en la provincia de Santa Elena (Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC], 2022). Se encuentra en el extremo occidental del Ecuador continental y posee una geografía irregular caracterizada por formaciones montañosas de bajo relieve. La ciudad es un punto importante como vía de conexión terrestre para los cantones de Salinas al oeste y Santa Elena al este (Mapa 1).



Mapa 1.- Ubicación del cantón La Libertad.
Fuente: Elaboración autores.

METODOLOGÍA

Con base a la separación y segregación del área de estudio se realiza un proceso de zonificación o agrupación de una parte de elementos que lo diversifican; a partir de unidades geo-ecológicas y su relación con el entorno es posible identificar, definir y caracterizar las diversas zonas o paisajes que corresponden a diferentes usos de suelo y cobertura natural en un espacio físico-geográfico determinado a partir de las características de su paisaje local (Martínez y Bollo, 2016). Dichas unidades son el resultado de la relación entre el paisaje natural (geomorfología y cobertura natural de la tierra) y la ocupación de las actividades antrópicas (uso de la tierra) (Martínez y Bollo, 2017).

El cantón La Libertad fue dividido en unidades homogéneas de paisaje a una escala de trabajo 1: 5 000, las cuales van a compartir características singulares que las diferencian de otras zonas (Mazzoni, 2014). En primera instancia se recopiló información disponible en el Instituto Geográfico Militar (IGM), principalmente fotografías aéreas con una resolución espacial de 0,40 metros; ortofotos con resolución de 0,15 metros; modelo digital de elevación de 1 metro de resolución; cartografía base a escala 1: 5 000 (IGM, 2019); y, otra información disponible del Ministerio de Ambiente [MAE], y del Ministerio

de Agricultura y Ganadería [MAG], tales como: Sistema de Clasificación de Ecosistemas del Ecuador Continental (MAE, 2013); Estimaciones de cultivos anuales, permanentes, plantaciones forestales y Registros administrativos agropecuarios (MAG, 2020; 2021), respectivamente.

La metodología utilizada se fundamentó en tres pilares: síntesis del medio físico, síntesis del medio biótico y comprobación en campo (Suango, 2016).

SÍNTESIS DEL MEDIO FÍSICO

Se realizó mediante una identificación de unidades geomorfológicas del suelo y determinación de la Capacidad de Uso de las Tierras [CUT], dichas variables analizadas son la base de la zonificación del paisaje.

FOTOINTERPRETACIÓN

Se utiliza la herramienta StereoAnalyst perteneciente al software ArcMAP 10.0, la cual permite revisión, análisis y evaluación de insumos; el principal insumo es el bloque fotogramétrico obtenido del proyecto de Capacidad de Acogida (IGM, 2022a). Con el uso de geo-tecnologías se logra obtener una visión estereoscópica del bloque fotogramétrico ajustado, lo que permite la interpretación y digitalización de unidades geomorfológicas en tres dimensiones.

La interpretación permite agrupar áreas homogéneas con base a sus características físicas y sus procesos morfológicos, para su descripción se tomó como referencia el catálogo de objetos geográficos V2.0 de la Secretaría Nacional de Planificación [SENPLADES], con su respectiva leyenda.

Los niveles geomorfológicos analizados fueron; formación geológica, unidad genética y geoforma. A continuación, se presenta un ejemplo de la jerarquización de la información geomorfológica (Tabla 1).

Objeto	Unidad geomorfológica
Formación geológica	Grupo Azúcar
Unidad geológica	Tectónico Erosivo
Geoforma	Relieve colinado muy bajo

Tabla 1.- Ejemplo de jerarquización de la información geomorfológica.
Fuente: Elaboración autores.

Una vez que se determinan las unidades geomorfológicas se procede a la interpretación del tipo de suelo, mediante la interrelación entre los factores formadores de suelo; principalmente se analizan las texturas y se asigna los nombres de unidades de mapeo de la Taxonomía de Suelo del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos [USDA] (Jenny, 1941).

Con esta información se procede a la evaluación del CUT en base a una metodología acoplada a un modelo empírico cualitativo, utilizando una matriz de doble entrada, la cual permite modificar las clases de capacidad de uso por cada una de las variables estudiadas; además se incluyó una tabla de parámetros medibles de cada variable, la que permite controlar la clasificación de las combinaciones (Acosta et al., 2016). Según De la Rosa (2008), este procedimiento permite definir las clases agrológicas como lo indica la (Tabla 2).

CLASE	DESCRIPCIÓN
Clase I	Tierras con muy ligeras limitaciones
Clase II	Tierras con algunas limitaciones
Clase II	Tierras con limitaciones de ligeras a moderadas
Clase IV	Tierras con moderadas limitaciones
Clase V	Tierras con limitaciones fuertes
Clase VI, VII y VIII	Tierras con muy fuertes limitaciones para cualquier uso

Tabla 2.- Clases agrológicas.
Fuente: De la Rosa (2008).

SÍNTESIS DEL MEDIO BIÓTICO

En esta etapa las unidades de uso y cobertura de la tierra son identificadas mediante una fotointerpretación visual de imágenes satelitales, imágenes aéreas y ortofotos, las cuales previamente se sometieron a procesos de mejora visual mediante combinaciones de bandas y realce de colores, complementándose con insumos secundarios como información de ecosistemas, estimaciones agropecuarias de cultivos anuales, permanentes, plantaciones forestales y registros administrativos agropecuarios; por medio de la identificación de colores, formas, patrones y texturas, el intérprete determina cada tipo de cobertura (Lillesand et al., 2015), la cual se va registrando en una base de datos geográfica (GDB por sus siglas en inglés), se realiza una edición topológica utilizando la herramienta CutPolygon del software ArcGIS 10.0.

Posterior a la interpretación, se obtienen áreas homogéneas, que generalmente contienen un mismo uso, así como la cobertura natural vegetal con sus diferentes grados de alteración, los cuales se identifican por el grado de presión antrópica que estos reciben.

Para la catalogación de estas unidades se tomó como base la leyenda de cobertura y uso de la tierra presentada por el Instituto Espacial Ecuatoriano [IEE] y del Sistema de Información Geográfica Agropecuaria [SIGAGRO] (IGM, 2022b), del año 2009, la cual ha sido ajustada debido a que nuevos cultivos han sido identificados con el pasar de los años en diversas zonas agrícolas. Se caracterizó cuatro niveles, se presenta un ejemplo de la jerarquización (Tabla 3).

Subcategoría	Tierras agropecuarias
Uso	Agrícola
Otmp (Objeto + temporalidad)	Cultivo anual
Cobertura	Maíz

Tabla 3.- Ejemplo de jerarquización de información.
Fuente: Elaboración autores.

En resumen, se muestra el proceso de la obtención de la zonificación del cantón La Libertad (Figura 1).

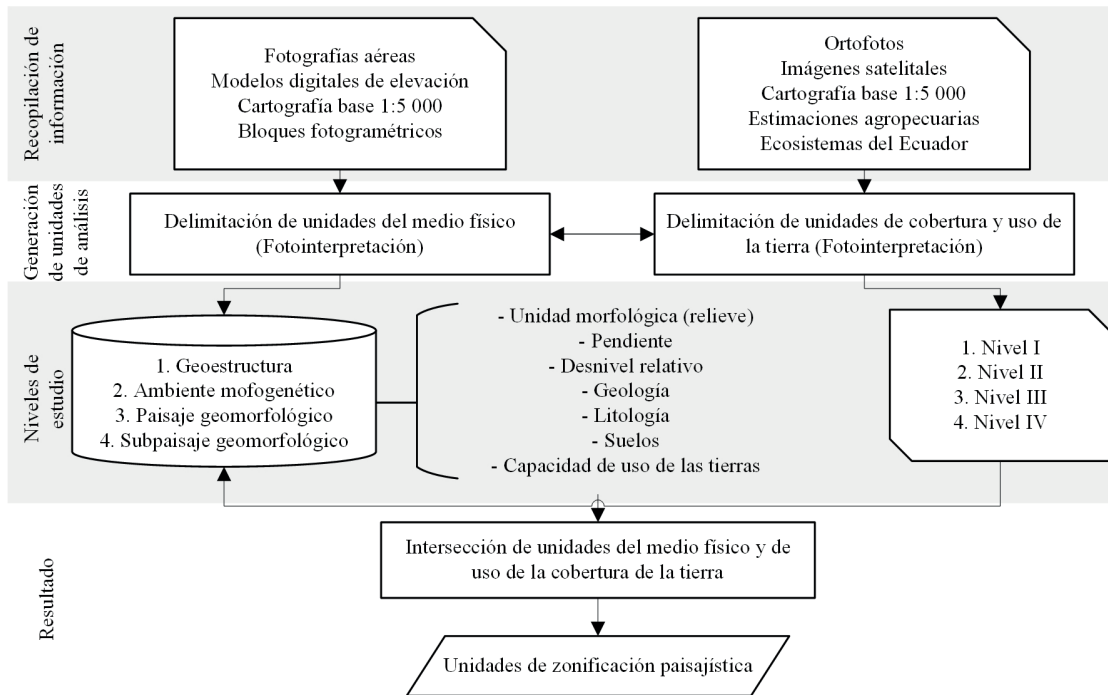


Figura 1.- Proceso para la obtención de la zonificación del paisaje del cantón La Libertad.
Fuente: Modificado de Suango (2019).

TRABAJOS DE CAMPO

Se realizó una visita al área de estudio con la intervención de un equipo multidisciplinario para recabar datos del criptosistema, así como validar la información y productos generados en gabinete del fenosistema mediante el empleo de una ficha de campo, se resume el proceso en la Figura 2.

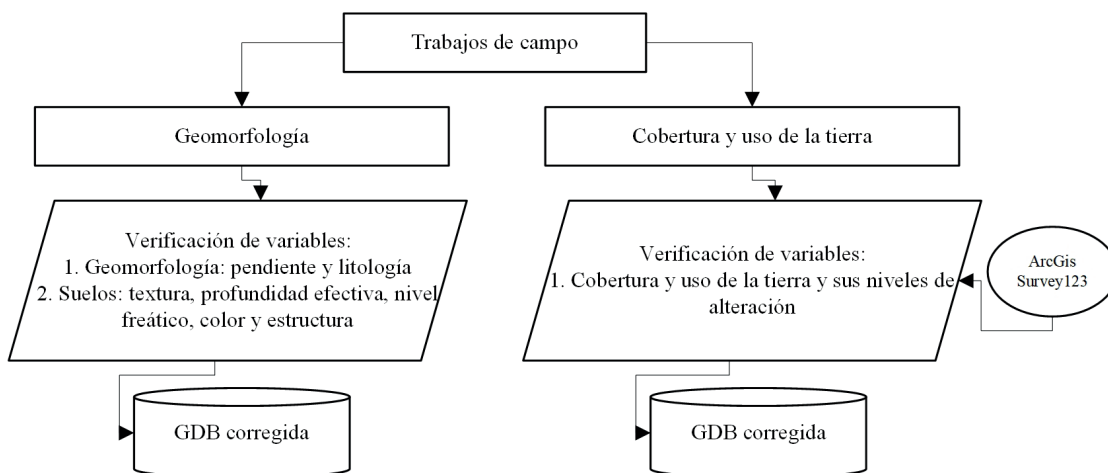


Figura 2.- Proceso de trabajos en campo.
Fuente: Elaboración autores.

Una vez recolectada la información en campo, la cual sirve para la validación y ajuste de los datos generados en gabinete del medio físico y de uso y cobertura de la tierra, se validaron las unidades homogéneas, donde sus elementos físicos se relacionan e interactúan entre sí. Una de las características de la información obtenida es que se puede analizar y trabajar a escalas más pequeñas, lo que permite un mejor manejo de datos geográficos, partiendo desde un detalle macro (escala regional) a un nivel micro (escala cantonal).

Mediante el SIG se realizó algebra de mapas para intersección de datos categorizando los paisajes en base a la clasificación propuesta por Suango (2019), modificada de la clasificación fisiográfica CIAF, obteniendo las siguientes categorías:

Ecorregiones (E): Son unidades de paisajes con características de geofomas a nivel macro, se representa por geoestructuras, clima a nivel regional y subregional y grandes categorías de cobertura de la tierra.

Grandes paisajes (GP): Estas unidades de paisaje se caracterizan por una homogeneidad en cuanto a sus ambientes morfogenéticos, conjugados con las clases de cobertura natural o antrópica.

Paisajes (P): Se representan por geoformas específicas y se relacionan con formaciones geológicas o depósitos superficiales y subclases de cobertura vegetal natural o antrópica.

Subpaisajes (SP): Son paisajes los cuales se dividen por el relieve y los diferentes tipos de cobertura vegetal, las características para su clasificación son: litología, suelos, pendiente, desnivel relativo y la capacidad del uso de las tierras.

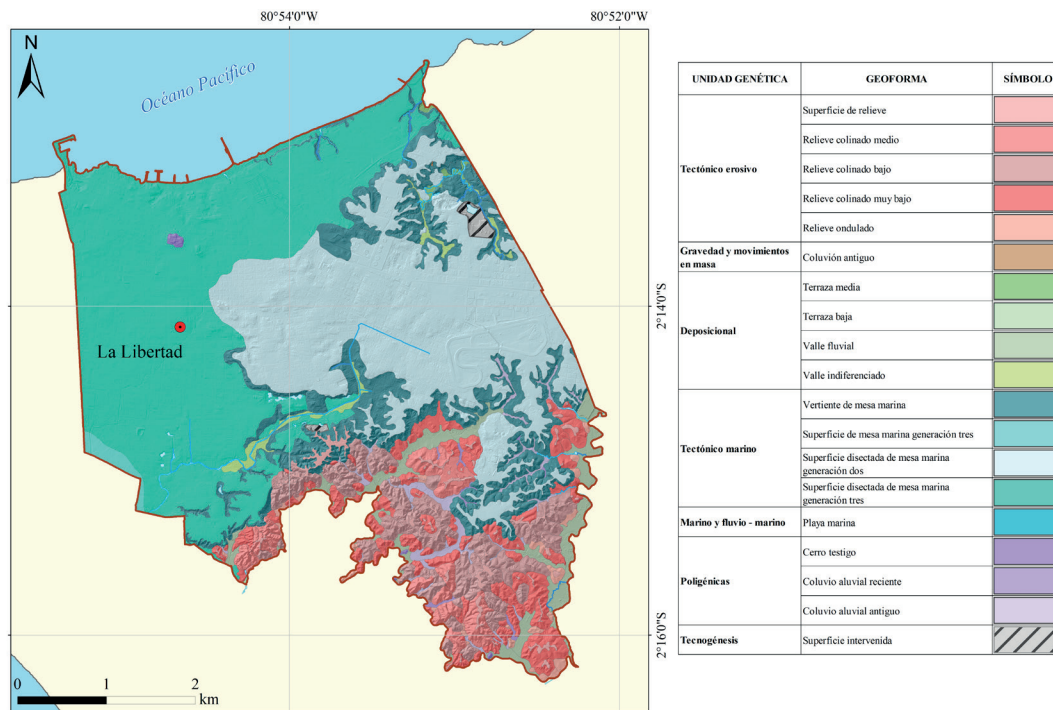
Debido a la naturaleza de la catalogación de datos se realizó un ajuste a las categorías de zonificación paisajística, la cual se muestra a continuación (Tabla 4).

RESULTADOS

La información presentada en esta investigación se realizó a una escala de trabajo 1: 5 000 y se obtuvo como resultado la presencia de dos paisajes geomorfológicos: clinas arcillosas sobre limolitas, arcillas y arenas más o menos cementadas; y formas heredadas de origen marino – erosivo; divididos en siete ambientes morfogenéticos: 1) deposicional, 2) gravedad y movimientos de masa, 3) marino y fluvio-marino, 4) poligénicas, 5) tecnogénesis, 6) tectónico marino, 7) tectónico erosivo (Mapa 2).

Nivel I	Ecorregión	Objeto	Subcategoría
Nivel II	Grandes paisajes	Formación Geológica	Uso
Nivel III	Paisajes	Unidad geológica	Otmp (Objeto + temporalidad)
Nivel IV	Subpaisaje	Geoforma	Cobertura

Tabla 4.- Detalle de unidades paisajísticas.
Fuente: Elaboración autores.

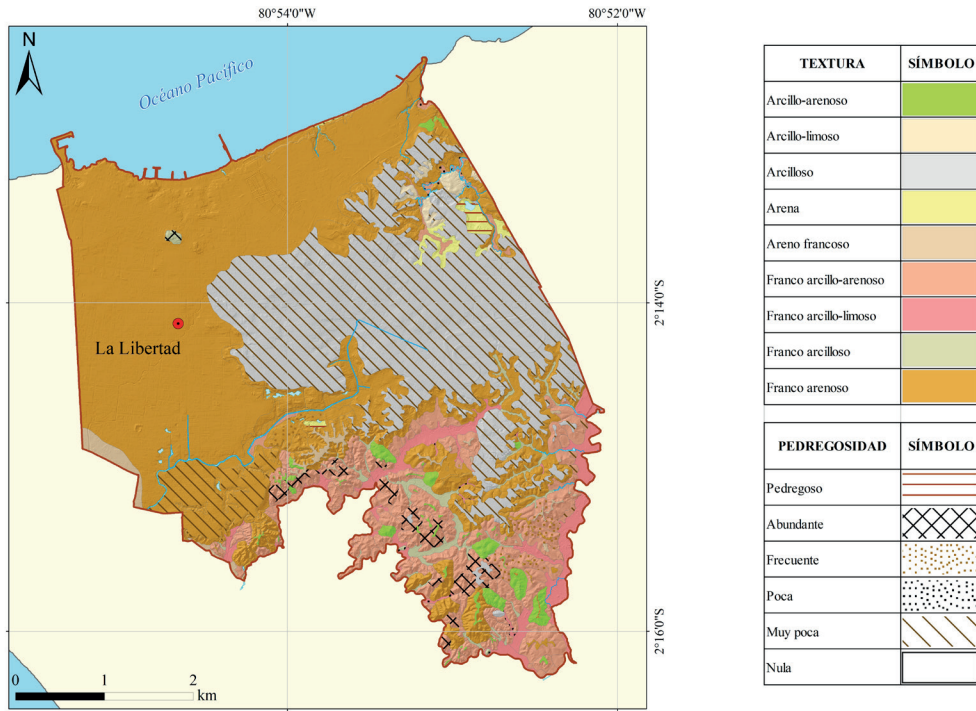


Mapa 2.- Paisajes Geomorfológicos del cantón La Libertad.
Fuente: Elaboración autores.

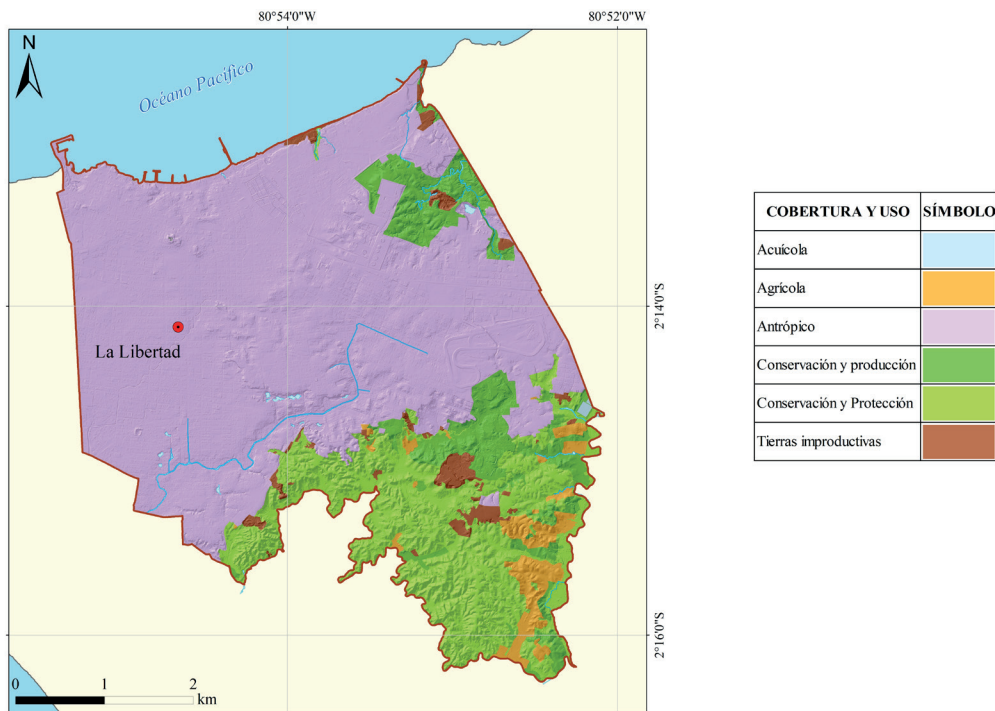
En el análisis de los suelos de la ciudad de La Libertad se determinaron nueve variedades en función de sus clases texturales a profundidad (Mapa 3): a) franco-arenoso, distribuidos sobre superficies disectadas de mesa marina generación tres y vertiente de mesa marina; b) suelos arcillo presentes sobre superficies disectadas de mesa marina generación dos; c) franco arcillo arenosos ubicados en relieves colinados muy bajos y relieves colinados bajos; d) franco arcillo limoso, localizados mayoritariamente en valles fluviales; e) arcillo arenoso, encontrándose mayoritariamente sobre relieves colinados bajos; f)

franco arcilloso, distribuidos en coluvios aluviales antiguos; g) areno francoso, encontrándose principalmente en superficie de mesa marina generación tres y superficies de relieve; h) arena, encontrándose sobre vertiente de mesa marina y superficie intervenida; i) arcillo limoso localizado sobre vertientes de mesa marina.

El uso del suelo predominante es la zona edificada tanto consolidada como dispersa en el cantón La Libertad, determinando el uso antrópico como el predominante dentro del área de estudio (Mapa 4).



Mapa 3.- Textura de los suelos del cantón La Libertad.
Fuente: Elaboración autores.

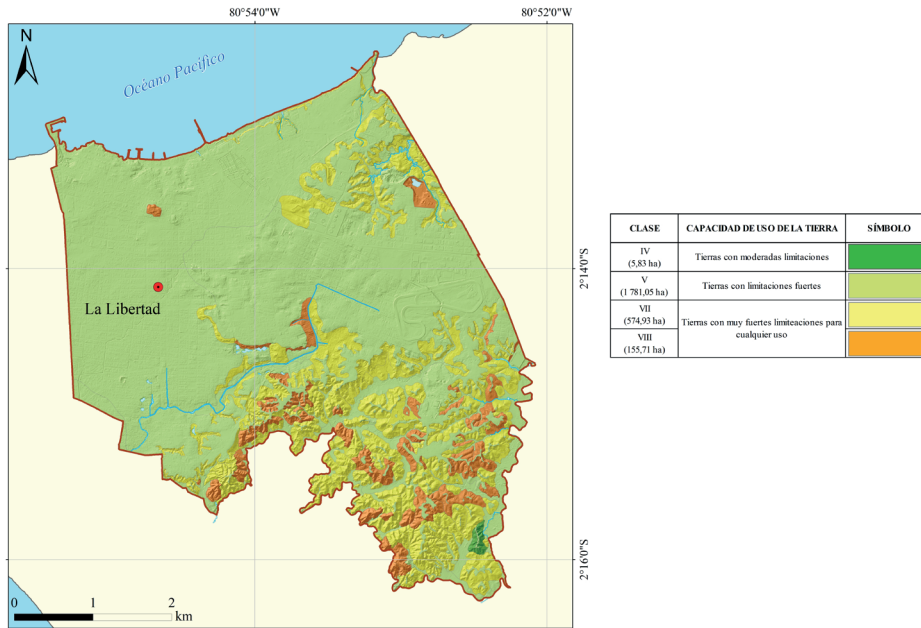


Mapa 4.- Cobertura y uso de la tierra en el cantón La Libertad.
Fuente: Elaboración autores.

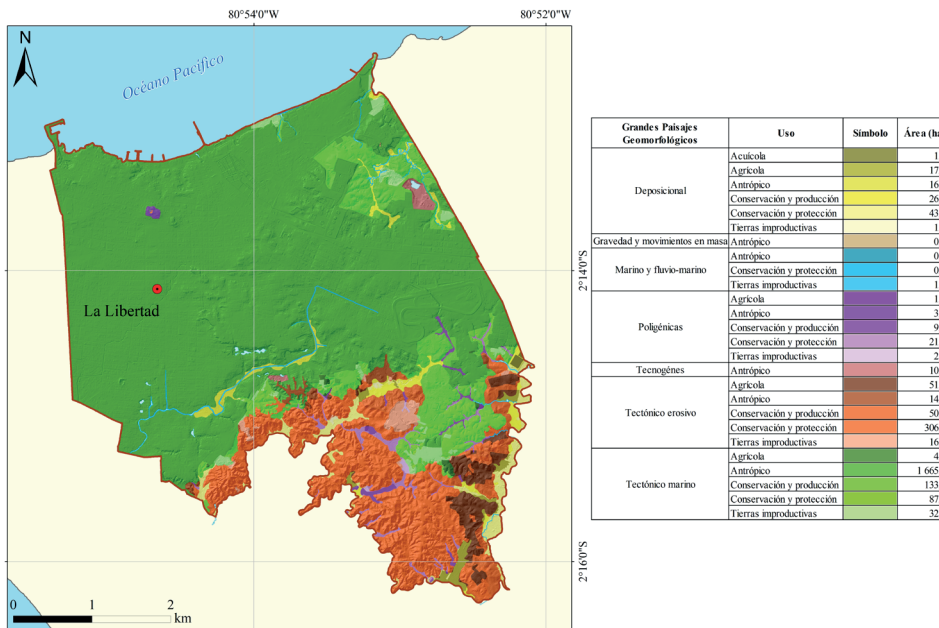
Desde el enfoque de la Capacidad de Uso de las Tierras (CUT) (Mapa 5), en el cantón La Libertad predominan tierras con limitaciones fuertes, específicamente clasificadas como tierras de clase V debido a sus características de suelos con profundidades efectivas superficiales (< 20 cm) y régimen de humedad arídico.

La combinación del paisaje geomorfológico con el OTMP del Uso y Cobertura de la tierra dio como resultado la existencia de treinta y siete paisajes geomorfológicos en el cantón La Libertad (Tabla 5).

La distribución espacial de los grandes paisajes identificados en el cantón La Libertad se muestran en la Mapa 6.



Mapa 5.- Capacidad de Uso de las Tierras del Cantón La Libertad.
Fuente: Elaboración autores.



Mapa 6.- Distribución espacial de grandes paisajes en el cantón La Libertad.
Fuente: Elaboración autores.

PAISAJE GEOMORFOLÓGICO		OTMP (USO + TEMPORALIDAD)
FORMACIÓN GEOLÓGICA	Formación Tablazo	Antrópico
		Cultivo anual
		Erial
		Tierras en transición
		Vegetación arbustiva
		Vegetación herbácea
	Grupo Ancón	Antrópico
		Cultivo anual
		Cultivo permanente
		Erial
		Tierras en transición
		Vegetación arbustiva
	Grupo Azúcar	Antrópico
		Cultivo anual
		Cultivo permanente
		Cultivo semipermanente
		Erial
		Vegetación arbustiva
DEPÓSITOS SUPERFICIALES	Aluvial	Antrópico
		Cultivo anual
		Cultivo permanente
		Erial
		Granja acuática
		Tierras en transición
		Vegetación arbustiva
		Vegetación herbácea
	Coluvial (movimientos en masa)	Antrópico
	Coluvio aluvial	Antrópico
		Cultivo anual
		Cultivo permanente
		Erial
		Vegetación arbustiva
		Vegetación herbácea
	Marino	Antrópico
		Erial
		Vegetación arbustiva

Tabla 5.- Paisajes Geomorfológicos del cantón La Libertad.
Fuente: Elaboración autores.

CONCLUSIONES

- El aporte de metodologías para el análisis de variables físicas y bióticas desde la concepción holística de los elementos del territorio, permite modelar un escenario de estudio muy aproximado a la realidad actual del cantón La Libertad. Los SIG como herramienta de análisis y gestión de geoinformación son de utilidad para la toma de decisiones asertivas respecto al ordenamiento y planificación del territorio, mediante el uso de esta herramienta se realizó la zonificación paisajística, la cual combinó la caracterización física y biótica del territorio en bases al uso de información primaria y secundaria y su respectiva validación en campo.
- Esta información puede ser analizada a distintas escalas desde un detalle macro (escala regional) a un micro (escala cantonal) lo que permite un manejo adecuado de los datos geográficos a nivel territorial apejándose a la realidad cantonal.
- El Gran Paisaje Geomorfológico más representativo en el cantón La Libertad es el Tectónico marino con uso antrópico cuya característica principal es la presencia de rocas moderadamente meteorizadas donde se asienta, mayoritariamente la zona edificada consolidada de La Libertad.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, J., Suango, V., Proaño, J. y Zambrano, J. (2016). Determinación de la Capacidad De Acogida Por Medio De La Zonificación Paisajística para el Ecuador Continental. Ecuador es Calidad-Revista Científica Ecuatoriana, 4(1), 34-44. Disponible: <https://n9.cl/0yvan>.
- De la Rosa, D. (2008). Evaluación Agro-ecológica de suelos para un desarrollo rural sostenible. Mundi-Prensa Libros.
- Instituto Espacial Ecuatoriano [IEE]. (2018). Memoria técnica de la ciudad de Machala. Generada durante el proyecto: “Aptitud física constructiva del territorio escala 1: 5000”. Quito: Instituto Espacial Ecuatoriano. Disponible en: <https://bit.ly/3Fa2kOL>
- Instituto Geográfico Militar [IGM]. (2019). Información cartográfica, generadas durante el proyecto: “Aptitud física constructiva del territorio escala 1: 5000”. Quito: Instituto Geográfico Militar. Disponible en: <https://bit.ly/3u8Qzmg>
- Instituto Geográfico Militar [IGM]. (2022a). Información cartográfica, generadas durante el proyecto: “Determinación de la capacidad de acogida del territorio con fines de desarrollo urbano mediante la generación de geoinformación temática a escala 1:5000”. Quito: Instituto Geográfico Militar. Disponible en: <https://bit.ly/3u8Qzmg>
- Instituto Geográfico Militar [IGM]. (2022b). Memoria técnica de la ciudad de La Libertad. Generada durante el proyecto “Determinación de la capacidad de acogida del territorio con fines de desarrollo urbano mediante la generación de geoinformación temática a escala 1: 5 000”. Quito: Instituto Geográfico Militar. Obtenido de: <https://n9.cl/cyjmn>
- Instituto Nacional de Estadística y Censo [INEC]. (2022). Proyecciones poblacionales cantonales 2010-2020. Quito: Instituto Nacional de Estadística y Censo Obtenido de <https://n9.cl/t9la8>
- Jenny, H. (1941). Factors of soil formation. A system of quantitative Pedology. New York, USA: Dover Publications. Disponible: <https://cutt.ly/Wwyl5R>
- Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). Remote sensing and image interpretation. Wiley. [<https://bit.ly/3ITaehn>], online. Consultado el 23 de marzo de 2024.
- Martínez, A. y Bollo, M. (2016). Zonificación geoecológica del paisaje urbano. Mercator (Fortaleza), 15, 117-136.
- Martínez, A. y Bollo, M. (2017). Aplicación del enfoque geoecológico para la interpretación espacial de los niveles de urbanización. Economía, sociedad y territorio, 17(53), 115-144.

Mazzoni, E. (2014). Unidades de paisaje como base para la organización y gestión territorial. *Estudios socioterritoriales*, 2(16), 51-81.

Ministerio de Agricultura [MAG]. (2020). Estimaciones de cultivos permanentes, banano, caña de azúcar y palma aceitera. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Disponible en: <https://bit.ly/2Ci14tQ>

Ministerio de Agricultura [MAG]. (2021). Estimaciones de cultivos anuales arroz, maíz y soya. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Disponible en: <https://bit.ly/2Ci14tQ>

Ministerio del Ambiente [MAE]. (2013). Sistema de Clasificación de los Ecosistemas del Ecuador Continental. Quito: Subsecretaría de Patrimonio Natural. Ministerio del Ambiente del Ecuador. Disponible en: <https://bit.ly/3AS5GEr>

Secretaria Nacional de Planificación y Desarrollo [SENPLADES]. (2017). Plan Nacional de Desarrollo 2017 -2021. Toda una vida. pg 38. Quito, Ecuador.

Suango, V. (2019). Zonificación del paisaje con enfoque territorial en la ciudad de Portoviejo. *Pro Sciences: Revista de Producción, Ciencias e Investigación*, 3(25), 18-27.



Estimación de velocidades funcionales durante el diseño de vehículos aéreos no tripulados de ala fija

Functional estimation of speeds during design of fixed-wing unmanned aerial vehicles

Alejandro Vintimilla
eduardo.vintimilla@geograficomilitar.gob.ec

Christian Mullo
christian.mullo@geograficomilitar.gob.ec

Edgar Tipán
edgar.tipan@geograficomilitar.gob.ec

RESUMEN:

Durante el diseño de los VANT (vehículos aéreos no tripulados), es importante tener en cuenta como punto de partida las velocidades funcionales, debido a que, esto define el diseño aerodinámico, estabilidad, control, consumo energético, autonomía, cargas útiles y estructura. La presente investigación exhibe un método de cálculo de velocidades para toma de fotografía aérea eficiente, basado en: plan de vuelo, sensor, entorno de operación y normativa aeronáutica, partiendo del análisis de objetos a observar en fotografías, lo que define la resolución espacial y permite plantear la misión. Con los datos capturados, se realiza el plan de vuelo y se procede al análisis de velocidades en función del traslape y características del sensor; además, se aplica normativa de diseño de aeronaves no tripuladas, con el fin de mantener la seguridad operacional. Perturbaciones como el

viento, influyen negativamente en la precisión de las fotografías, por lo que, además, se plantea un procedimiento de toma de decisión para realizar o no la fotografía.

Palabras-clave: UAV, fotogrametría, velocidades de operación, traslape, tiempo de obturación.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de aeronaves es una tarea multidisciplinaria que requiere la sincronización de numerosas variables para lograr un diseño armonioso. Sin embargo, se ha observado una brecha entre la misión y el diseño aeronáutico en la investigación de plataformas aéreas no tripuladas para fotografía aérea, lo que resulta en repetidos intentos de diseño

y aumenta los costos operativos. Además, errores durante la operación, como la falta de consideración de parámetros técnicos esenciales, pueden generar pérdidas económicas y comprometer la efectividad de las misiones, especialmente en aplicaciones militares. Es crucial garantizar la calidad de las fotografías aéreas para obtener información precisa, lo que implica asegurar la velocidad y altura adecuadas de la aeronave durante la operación.

ANÁLISIS DE MISIÓN

Objeto Mínimo Mapeable. Establece el tamaño del pixel en tierra (Ground Sample Distance, GSD) (López, 2013), lo que determina la altura de vuelo, según el tamaño de imagen en tierra y el ángulo de apertura longitudinal. Es el objeto más pequeño a identificar en el levantamiento fotogramétrico, y para establecerlo, se requiere conocer los objetos de interés y determinar sus longitudes de referencia.

Basados en el concepto del GSD y tomando en cuenta el objeto de este estudio, se muestra un ejemplo de interés en el tema de defensa respecto a cómo identificar en un área específica los senderos, personas, tanques de gas, pisadas (huellas), como se muestra en la Tabla 1.

Traslape. Es muy importante denotar que, para alcanzar los niveles de confianza de la información a adquirir, se cumplan los traslapes longitudinal y transversal establecidos entre cuadros durante el

levantamiento fotogramétrico. El porcentaje de traslape, dependerá del uso final de la información, cuyas aplicaciones podrían ser foto-identificación, mediciones geométricas, agricultura de precisión, levantamiento de recursos forestales, etc. El porcentaje de traslape permite determinar la velocidad longitudinal de captura de imágenes, tomando en cuenta los tiempos de obturación y el tamaño de la imagen en tierra.

ANÁLISIS DEL SENSOR A BORDO

Es de vital importancia conocer los parámetros fotogramétricos del sensor a usar a bordo del UAV, que para el presente caso son: ángulo de apertura longitudinal, ángulo de apertura transversal, número de píxeles longitudinal, número de píxeles transversal y tiempo mínimo entre fotos.

La Tabla 2 proporciona los datos fotogramétricos de la cámara SONY NEX 5T, que se necesitan conocer para proceder con el desarrollo de la metodología de diseño. Dichos datos limitarán la velocidad con la cual el avión debe desplazarse para el óptimo levantamiento de información en campo; la velocidad estimada a partir de los parámetros del sensor, podrán ser usadas únicamente para el sensor analizado en el presente estudio, por lo tanto, la metodología para encontrar las velocidades de diseño de una plataforma aérea no tripulada debe adaptarse a varias condiciones de vuelo y entorno.

OBJETO DE INTERÉS	TAMAÑO PROMEDIO LONGITUD DE REFERENCIA [CM]	GSD REQUERIDO [CM]
Senderos - caminos (ancho)	50	16
Personas (ancho del cráneo)	16	5
Tanques de gas (diámetro)	32	11
Pisadas - huellas	9	3

Tabla 1.- Resolución espacial según el objeto de interés.
Elaboración: IGM, 2019.

PARÁMETRO	VALOR [UNIDADES]
Ángulo de apertura longitudinal	55.15 [°]
Ángulo de apertura transversal	83 [°]
Número de píxeles longitudinales	3264
Número de píxeles transversales	4912
Tiempo mínimo entre fotos	1 [s]

Tabla 2.- Parámetros fotogramétricos Cámara SONY NEX 5T.
Fuente: IGM, 2019.

CONDICIONES DE ENTORNO Y NORMATIVA

No solamente las características del hardware del sensor afectan directamente la metodología que permitirá conocer las velocidades de diseño, sino también las condiciones geográficas y jurídicas del entorno en donde la aeronave opere. Por este motivo, se toman en cuenta las siguientes condicionantes: Cobertura de nubes, Geomorfología y obstáculos del terreno, y Normativa Aeronáutica.

Cobertura de nubes. El techo de nubes podría limitar la altura de vuelo en las zonas de interés donde se realizarán los levantamientos fotogramétricos, la captación de imágenes deberá ser por debajo de la cobertura de nubes con un margen de seguridad en altura.

Geomorfología y obstáculos del terreno. Obstáculos terrestres como árboles, obras civiles, elevaciones de terreno, montañas, etc., son factores importantes a tomar en cuenta antes de realizar un sobrevuelo de mapeo de la zona de interés, ya que podría existir una colisión de la aeronave con dichos obstáculos; un ajuste en la altura de vuelo previene la colisiones, pero además, implicaría cambios en la resolución espacial obtenida en las fotografías, si el tipo de sensor usado tiene ajuste focal, entonces podría ajustarse para mantener la resolución espacial deseada, pero cambiarían las condiciones fotogramétricas del sensor,

afectando otros parámetros de vuelo que deben ser considerados.

Normativa aeronáutica. El diseño aerodinámico de una aeronave, ya sea tripulada o autónoma, está ligado al diseño estructural, y éste a su vez a la seguridad operacional.

Como consecuencia, se requiere aplicar factores de carga cuando se realizan maniobras en las diferentes velocidades de operación. En este sentido, se toma como referencia el documento (Design Standards: Unmanned Aerial Vehicles – Aeroplanes) emitida por Autoridad de Seguridad de Aviación Civil de Australia (CASAA), cuyas especificaciones cubren los requerimientos de aeronavegabilidad y seguridad aeronáutica operacional, para el diseño de plataformas aéreas no tripuladas de ala fija. Se menciona este documento ya que durante el levantamiento del estado del arte no se ha encontrado ninguna normativa que regule el diseño de UAVs de ala fija. Adicionalmente, según el requerimiento de carga límite “UA25.337 Limit Maneuvering Load Factor”, para una condición de carga positiva, la aeronave deberá ser diseñada en los rangos que se indican en la Tabla 3.

En la Tabla 4, se muestran los factores de carga seleccionados, a partir de los cuales se podrá estimar la velocidad de pérdida positiva de la aeronave:

PARÁMETRO	VALOR
Factor de carga de maniobra positivo (n1)	$2 \leq n_1 \leq 3,8$
Factor de carga de maniobra negativo (n2)	$n_2 \leq -1,5$
Factor de carga de maniobra positivo con flaps desplegados (n1flaps)	$n_{1flaps} \geq 2$

Tabla 3.- Consideraciones para la selección de factores de carga de maniobra.
 Fuente: IGM, 2019.

PARÁMETRO	VALOR
Factor de carga de maniobra positivo (n1)	3
Factor de carga de maniobra negativo (n2)	-1.5
Factor de carga de maniobra positiva con flaps desplegados (n1flaps)	2

Tabla 4.- Selección de Factores de carga de maniobra.
 Fuente: IGM, 2019.

ESTIMACIÓN DE VELOCIDADES DE OPERACIÓN

Consideraciones para la estimación de velocidades de operación de la aeronave

Previo al cálculo de las velocidades de operación de la plataforma aérea, se deben realizar las siguientes consideraciones: tamaño de pixel en tierra (GSD), tamaño de imagen sobre el terreno (d_L x d_T), altura de vuelo respecto al terreno (h), distancia longitudinal entre fotos (d_f), traslape longitudinal (s_L) y transversal (s_T).

La dimensión de la foto en tierra se obtiene a partir de:

$$\text{Tamaño de imagen} = d_L \times d_T \quad (1)$$

Donde,

d_L = Tamaño longitudinal de la foto en tierra

d_T = Tamaño transversal de la foto en tierra

La dimensión longitudinal de la foto en tierra se obtiene a partir de:

$$d_L = \text{GSD} \times \# \text{ Píxeles Longitudinales Sensor} \quad (2)$$

Donde,

GSD = Tamaño de pixel en tierra

La dimensión transversal de la foto en tierra se obtiene de:

$$d_T = \text{GSD} \times \# \text{ Píxeles Transversales Sensor} \quad (3)$$

La altura de vuelo se obtiene a partir de:

$$h = \frac{d_L}{2 \times \tan\left(\frac{\text{FOV}_L}{2}\right)} \quad (4)$$

Donde,

FOV_L = Ángulo de apertura focal longitudinal

El traslape longitudinal se obtiene de:

$$s_L = (\%L) \times d_L \quad (5)$$

Donde,

s_L = Traslape longitudinal (solape)

El traslape transversal se obtiene de:

$$s_T = (\%T) \times d_T \quad (6)$$

Donde,

s_T = Traslape transversal

$\%T$ = Porcentaje tamaño de imagen sobre el terreno

La distancia longitudinal entre fotos se obtiene a partir de:

$$d_f = d_L - s_L \quad (7)$$

Donde,

d_f = Distancia entre centros de fotos

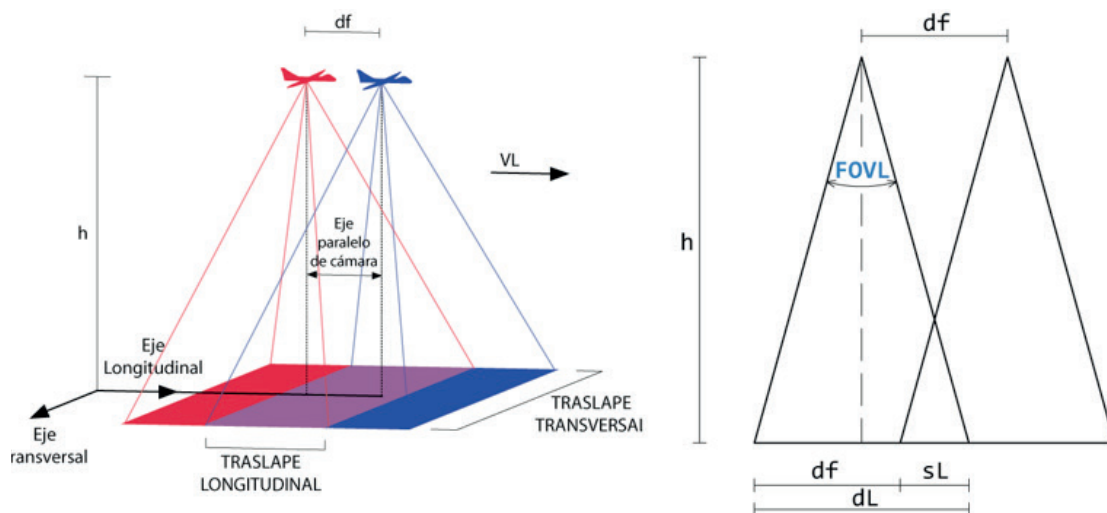


Figura 1.- Esquema geométrico de distancia longitudinal (d_L) entre fotos.
Fuente: IGM, 2019.

ESTIMACIÓN DE LAS VELOCIDADES DE OPERACIÓN

La velocidad de vuelo máxima (VLmax) respecto al terreno, se la define como la velocidad máxima a la que podrá operar el sensor en vuelo según la dirección longitudinal de la imagen y la frecuencia máxima de obturación del sensor (tmin), VLmax deberá estar en función de la distancia entre centros de captura de fotos que se requiere para asegurar un traslape longitudinal establecido (df), y será también una función del tamaño de pixel en tierra deseado (GSD), VLmax se obtiene a partir de la ecuación:

$$V_{Lmax} = \frac{d_f}{t_{min}} \quad (8)$$

Donde,

t_{min} = Tiempo mínimo entre fotos

Asimismo, la velocidad de vuelo mínima (V_{Lmin}) respecto al terreno, es aquella velocidad a la que podrá operar el sensor en vuelo según la dirección longitudinal de la imagen en la frecuencia mínima de obturación del sensor (t_{máx}), V_{Lmin} se obtiene a partir de la ecuación:

$$V_{Lmin} = \frac{d_f}{t_{máx}} \quad (9)$$

Donde,

t_{max} = Tiempo máximo entre fotos

Conceptualmente, la velocidad de crucero de una aeronave, es la velocidad de vuelo óptima, en torno a la cual se diseña aerodinámicamente una aeronave y se alcanza usando la potencia nominal del sistema de propulsión, en este caso, si tomamos a V_{Lmax}, como la velocidad relativa al viento máxima de la aeronave, entonces podríamos estimar la potencia de empuje máxima requerida, de la que usaríamos el 75% para alcanzar la velocidad crucero, entonces:

$$Pot_{crucero} = 75\% * Pot_{máxima} \quad (10)$$

La potencia de empuje requerida Pot_i para una velocidad de vuelo V_i, se obtiene a partir de:

$$Pot_i = T_i * V_i = D_i * V_i \quad (11)$$

Donde,

Pot_i = Potencia de empuje requerida para una velocidad de vuelo V_i

T_i = Empuje requerido (Thrust)

D_i = Fuerza de arrastre de la aeronave (Drag)

V_i = Velocidad de vuelo

El Drag (D_i) de la aeronave para una velocidad V_i se obtiene a partir de:

$$D_i = \frac{1}{2} * \rho * V_i^2 * S_w * C_{D_i} \quad (12)$$

Siendo,

ρ = Densidad del aire según altura de vuelo

S_w = Superficie del ala de la aeronave

C_{D_i} = Coeficiente de drag para la condición de vuelo a velocidad V_i

Reemplazando (11) en (10) se tiene lo siguiente:

$$D_{crucero} * V_{crucero} = 75\% * D_{máx} * V_{máx} \quad (13)$$

Reemplazando (12) en (13):

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \rho * V_{crucero}^2 * S_w * C_{D_{crucero}} * V_{crucero} \\ = 75\% * \frac{1}{2} \rho * V_{máx}^2 * S_w * C_{D_{máx}} * V_{crucero} \end{aligned} \quad (14)$$

Despejando (V_{crucero} * C_{D_{crucero}}) en función de (V_{máx} * C_{D_{máx}}), se obtiene:

$$V_{crucero}^3 * C_{D_{crucero}} = 75\% * V_{máx}^3 * C_{D_{máx}} \quad (15)$$

A través de una analogía de órdenes de magnitud de los coeficientes de Drag para las condiciones de vuelo, se puede suponer lo siguiente:

$$C_{D_{CRUCERO}} \approx C_{D_{máx}} \quad (16)$$

Reemplazando (16) en (15), se tiene:

$$V_{crucero}^3 = 75\% * V_{máx}^3 \quad (17)$$

Despejando la velocidad crucero de (17), se tiene como resultado:

$$V_{crucero} = \sqrt[3]{(75\% * V_{máx}^3)} \quad (18)$$

Por otro lado, la velocidad de maniobra es aquella en la que las superficies de control de una aeronave son efectivas y está por encima de la velocidad de pérdida (Stall), a partir de una analogía con la ecuación (9), velocidad longitudinal mínima, estrictamente obtenida a partir de datos fotogramétricos, será tomada como referencia para establecer la velocidad de maniobra. Esta cota de velocidades de operación brinda un límite inferior, para un diseño aerodinámico en base a un levantamiento fotogramétrico eficiente y una operación segura. Por lo tanto, esta velocidad es:

$$V_a = \frac{d_f}{t_{máx}} \quad (19)$$

Además, se tiene la velocidad de pérdida cuando existe desprendimiento de la capa límite laminar sobre el ala (o el perfil alar) en la condición de máximo ángulo de ataque. A dicha velocidad, el coeficiente de sustentación es máximo, y se lo puede apreciar en la Figura 2.

El diseño del ala de una aeronave depende de esta velocidad, ya que permite establecer la geometría de la planta alar (proyección del ala en el plano), y se deberá ajustar en función del estudio de los perfiles aerodinámicos de la misma. La velocidad de pérdida positiva, V_{s+} esta función del factor de carga y de la velocidad de maniobra, la cual se obtiene a partir de:

$$V_a^+ = V_s^+ * \sqrt{n_1} \quad (20)$$

Despejando V_s^+ en función de V_a^+ y n_1 , se obtiene la ecuación:

$$V_s^+ = \frac{V_a^+}{\sqrt{n_1}} \quad (21)$$

Se concluye que, a partir de estas ecuaciones se pueden estimar las velocidades operacionales ($V_{máx}$, V_c , V_a , V_s) para el diseño aerodinámico de una aeronave.

De manera análoga, las condiciones atmosféricas de vuelo limitan las prestaciones y rendimiento del levantamiento fotogramétrico, siendo el viento un factor importante a tomar en cuenta cuando se

requiere asegurar un solape longitudinal entre cuadros fotográficos. Este, puede aportar de forma positiva o negativa dependiendo de la dirección del mismo, ya que la velocidad longitudinal respecto al terreno V_L , es igual a la suma de velocidad de la aeronave relativa al viento $V_{relativa\ viento}$, más la velocidad del viento, V_{viento} . El movimiento de lado provocado por el viento lateral es un factor importante, el cual se soluciona haciendo vuelos a favor o en contra del viento incidente (Figura 3).

Por lo tanto:

$$V_L = V_{relativa\ viento} \pm V_{viento} \quad (22)$$

De donde se entiende que, con viento en contra, y velocidad de viento relativa constante, las velocidades se restan, dando como resultado un retraso en la toma de fotografías durante el vuelo, con la posibilidad de realizar una toma de fotografía en el punto deseado, pero incrementando los tiempos de captura, lo que retrasaría el vuelo planificado, disminuyendo el rango de vuelo (distancia de vuelo) de la aeronave.

$$V_L = V_{relativaviento} - V_{viento} \quad (23)$$

También se debe considerar que, con viento a favor, y velocidad relativa al viento constante, la velocidad respecto al terreno se incrementa, lo cual puede

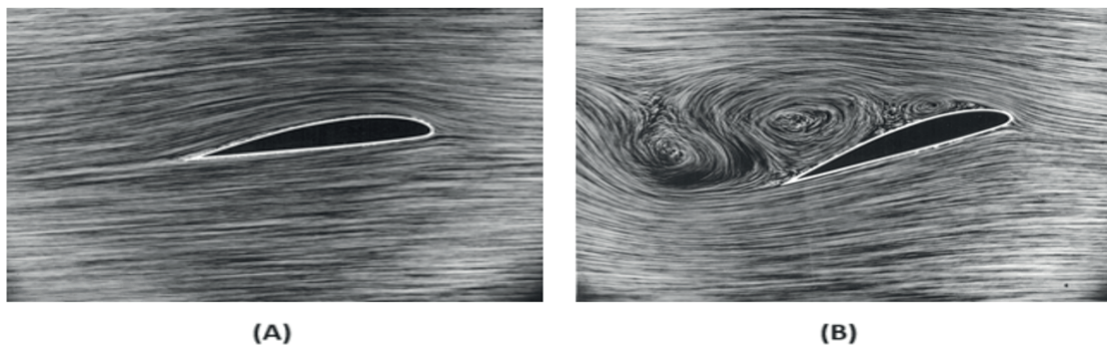


Figura 2.- Perfil alar en condición de bajo ángulo de ataque (A) y máximo ángulo de ataque o Stall (B).
Fuente: <https://eaglepubs.erau.edu/introductiontoaerospaceflightvehicles/chapter/maximum-lift-stalling-spinning/>.



Figura 3.- Condición de viento a favor (B) y viento en contra(A).
Fuente: IGM, 2019.

mejorar las condiciones en cuanto a tiempos de captura, pero comprometen la toma de fotos en los puntos planificados, lo que podría ocasionar que no se alcance el traslape requerido, dando como resultado un menor porcentaje de traslape longitudinal entre fotos, entonces:

$$V_L = V_{\text{relativa viento}} + V_{\text{viento}} \quad (24)$$

Por lo tanto, para cumplir con el traslape requerido, la velocidad de traslado longitudinal V_L , deberá cumplir con la siguiente condición:

$$V_{L_{\text{max}}} \geq V_L \geq V_{L_{\text{mín}}} \quad (25)$$

Reemplazando se tiene:

$$V_{L_{\text{max}}} \geq (V_{\text{relativa viento}} \pm V_{\text{viento}}) \geq V_{L_{\text{mín}}} \quad (26)$$

Si la velocidad relativa al viento de la aeronave $V_{\text{relativa viento}}$, es la óptima o de crucero, V_{crucero} , entonces tenemos:

$$V_{L_{\text{max}}} \geq V_{\text{crucero}} \pm V_{\text{viento}} \geq V_{L_{\text{mín}}} \quad (27)$$

RESULTADOS

Experimento 1. Como ejemplo, se plantean dos valores de resolución espacial, $GSD_1=4$ [cm] y $GSD_2=10$ [cm], para la estimación de velocidades de operación para una aeronave no tripulada de ala fija, una condición de viento moderado de 5 [m/s],

usando el sensor RGB Sony Nex5T 16 [mm], con una programación en modo sport y un traslape deseado, $S_L = 80\%$.

Teniendo los datos de entrada y el procedimiento antes descrito, se procede a la estimación de las velocidades de operación, obteniéndose los resultados presentados en la Tabla 5.

De los resultados obtenidos, se puede denotar una diferencia considerable en las dimensiones de los parámetros fotogramétricos obtenidos a partir de $GSD_1 = 4$ [cm] y $GSD_2 = 10$ [cm], lo cual incide de forma directa en el rango de velocidades de operación admisibles, en donde se aprecia una diferencia superior al doble en $V_{L_{\text{máx}}}$ y $V_{L_{\text{mín}}}$, según el GSD usado.

Nótese, que las velocidades estimadas para operación de la aeronave, V_{max} , V_{crucero} , V_a y V_s , para cada GSD, muestran gran diferencia en sus magnitudes también, por lo que la aeronave tendría que operar en un rango de velocidades muy amplio para cubrir con ambos requerimientos. Esto en cuestiones de eficiencia operacional no es aplicable, ya que presenta un impacto directo en la performance aerodinámica, influyendo en el rendimiento energético.

En la práctica de diseño de una aeronave, los cambios de velocidad implican incrementos de consumo energético significativos, además, torna ineficiente a la aeronave en el contexto de la misión. Al cambiar

RESULTADOS OBTENIDOS			OBSERVACIONES
Vv [m/s]	5		Dato de entrada de Velocidad del viento
GSD [cm]	4,00	10,00	Dato de entrada de resolución espacial
dL [m]	130,56	326,40	Dimensión longitudinal de la foto en tierra
dT [m]	196,48	491,20	Dimensión transversal de la foto en tierra
h [m]	125,00	312,50	Altura de vuelo según el GSD
SL [m]	104,45	261,12	Dimensión de traslape longitudinal según GSD
df [m]	26,11	65,28	Distancia entre fotos según GSD
$V_{L_{\text{max}}}$ [m/s]	26,11	65,28	Estimación de la velocidad máxima admisible para asegurar el traslape requerido fotografía
$V_{L_{\text{mín}}}$ [m/s]	17,41	43,52	Estimación de la velocidad mínima admisible para asegurar el traslape requerido fotografía
V_{max} [m/s]	26,11	65,28	Estimación de la velocidad máxima de la aeronave
V_c [m/s]	23,72	59,31	Estimación de la velocidad crucero de la aeronave
V_a [m/s]	17,41	43,52	Estimación de la velocidad de maniobra de la aeronave
V_s [m/s]	10,05	25,13	Estimación de la velocidad mínima de vuelo de la aeronave

Tabla 5.- Resultados fotogramétricos y velocidades de operación.
Fuente: IGM, 2019.

las condiciones de operación, se entiende que es requerido utilizar una aeronave totalmente distinta para cada misión. Si estas diferencias operacionales se toman para el diseño aerodinámico de una aeronave, podría presentar diferencias a partir del criterio de selección de los perfiles aerodinámicos del ala, seguido por el diseño de la planta alar, superficies de control, influencia en la estabilidad, performance, sistema de propulsión, resistencia estructural, rango de vuelo, autonomía, etc., es decir, modificar la misión fotogramétrica de la aeronave, sugiere un cambio total de aeronave.

Experimento 2. Se plantea el siguiente ejemplo en base a los resultados numéricos obtenidos en el Experimento 1, para determinar en que condiciones de viento la aeronave puede realizar un levantamiento fotogramétrico y asegurar el traslape deseado ($SL = 80\%$).

Usando la ecuación (27), para el valor de viento en contra y a favor, en los casos GSD_1 y GSD_2 , se obtuvieron los resultados de V_L , mostrados en la Tabla 6, donde se verifica si se cumplen las condiciones de $V_L < V_{L_{máx}}$ y $V_L > V_{L_{mín}}$, en la captura de las imágenes.

Adicionalmente, en la Tabla 6 se analiza si la plataforma aérea debe realizar la toma de fotografías en el sentido a favor o en contra del viento de la trayectoria correspondiente, siendo esta una herramienta primordial de decisión para el agente responsable de llevar a cabo una misión de levantamiento de imágenes. En contraste con la Tabla 5, la Tabla 6 muestra los valores calculados de la velocidad longitudinal respecto al terreno V_L , incluyendo la incidencia de la velocidad del viento a favor y en contra. Ver Figura 4.

VELOCIDAD VIENTO		5 [m/s]	V_L	$V_L < V_{L_{máx}}$	$V_L > V_{L_{mín}}$	¿SE DEBE SOBREVOLAR?
GSD_1	4 [cm]	$V_L = (V_c + V_v)$ Favor	28.72	NO	SI	NO
		$V_L = (V_c - V_v)$ Contra	18.72	SI	SI	SI
GSD_2	10 [cm]	$V_L = (V_c + V_v)$ Favor	64.31	SI	SI	SI
		$V_L = (V_c - V_v)$ Contra	54.31	SI	SI	SI

Tabla 6.- Verificación de velocidad longitudinal respecto al terreno considerando el viento.
Fuente: IGM, 2019.

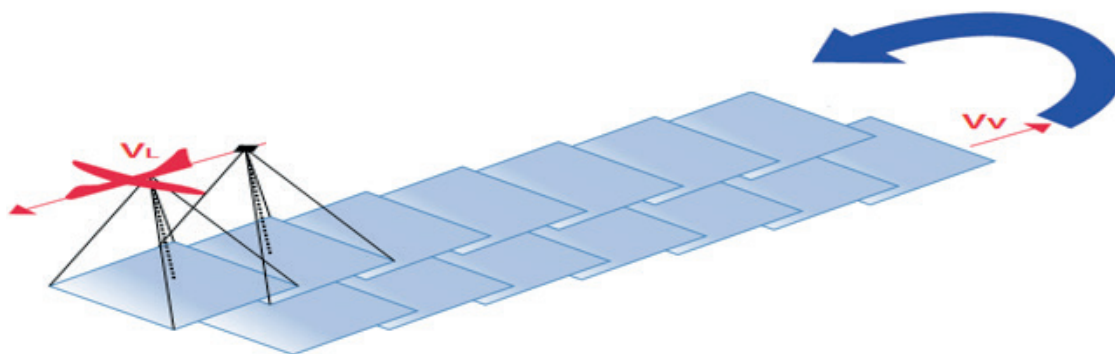


Figura 4.- Repetición de levantamiento fotogramétrico por viento a favor.
Fuente: IGM, 2019.

CONCLUSIONES

- Se estableció una metodología para el cálculo de velocidades de operación de una aeronave no tripulada de ala fija para la toma de fotografía aérea eficiente, basada en parámetros fotogramétricos, considerados en el plan de vuelo de una aeronave, sensor, entorno de operación y normativa aeronáutica de diseño aplicable.
- En el experimento 1, relacionado a la resolución espacial de dos objetos de interés, GSD1=4cm y GSD2=10cm, se muestra como resultado grandes diferencias en las dimensiones del tamaño de fotografía en tierra, altura de vuelo y velocidades de operación máxima y mínima admisibles para una fotografía aérea de calidad, donde se concluye que, considerando que es relevante mantener una operación aérea eficiente y levantamiento fotogramétrico de calidad, para las resoluciones espaciales planteadas en este experimento, se debe utilizar una aeronave ajustada para cada GSD.
- A partir del experimento 2 se comprobó que la velocidad del viento a favor puede influir de forma negativa en la toma de fotografía aérea dando como resultado un traslape menor al 80% (menor al deseado), obteniéndose una calidad inferior en la información fotogramétrica adquirida.

BIBLIOGRAFÍA

- Rocha, Á. (2012). Framework for a Global Quality Evaluation of a Website. *Online Information Review*, 36(3), 374-382. doi:10.1108/14684521211241404
- Antunes, A. A. (2004). Sistemas XYZ. In Sousa A. J. (Ed.), *Tecnologias Internet*. Lisboa: Editora Xxxpto.
- P. Poksawat, L. Wang, and A. Mohamed. (2016). Automatic tuning of attitude control system for fixed-wing unmanned aerial vehicles," *IET Control Theory Appl.*, vol. 10, no. 17, pp. 2233–2242.
- A. Mohamed, S. Watkins, A. Fisher, M. Marino, K. Massey, and R. Clothier. (2015). A feasibility study of bio inspired wing-surface pressure sensing for attitude control of micro aerial vehicles. *J. Aircraft*, vol. 52, no. 3, pp. 827–838.
- Zhiyang L, Duan Y. (2009). A UAV remote sensing system: Design and Test. *Remote Sensing Airborn Control Systems*, vol 2.2.1, pp. 31.
- Haarbrink R, Koes E. (2006). Helicopter UAV for Photogrammetry and Rapid Response. *Remote Sensing and Spatial Information Science*, vol 36, pp. 44.
- López A. (2013). *Fundamentos de Evaluación de la Calidad de la Información Geográfica*. Universidad de Jaén. Linares. Referencia aportes Mónica
- Buill F, Prades A. (2014). *Fotogrametría usando plataforma aérea UAV*. Ingeniería Técnica en Topografía. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Sani J. (2015). Vehículos aéreos no tripulados UAV para la elaboración de cartografía escalas grandes referidas al marco de referencia SIRGAS-ECUADOR. Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente.
- Sani J. (2015). Vehículos aéreos no tripulados UAV para la elaboración de cartografía escalas grandes referidas al marco de referencia SIRGAS-ECUADOR. Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente. Universidad de las Fuerzas Armadas UFA.
- Morán C. (2016). El drone del Instituto Geográfico Militar, uso específico y su operación en áreas estratégicas requeridas por diferentes organizaciones. Departamento de Ingeniería Comercial. Universidad de las Fuerzas Armadas .



Interpolación de gravedad sobre Referencias de Nivel para la compensación de la Red de Control Vertical de Ecuador

Gravity interpolation for the Ecuadorian Vertical Control Network adjustment

José Carrión
 jose.carrion@geograficomilitar.gob.ec

Fredy Flores
 fredy.flores@ geograficomilitar.gob.ec

Miguel Pozo
 miguel.pozo@geograficomilitar.gob.ec

Fredy Rodríguez
 fredy.rodriguez@ geograficomilitar.gob.ec

RESUMEN

La Red de Control Vertical de Ecuador materializa el Sistema de Referencia Vertical Local, cuyo datum se encuentra localizado en el mareógrafo de La Libertad (Datum Vertical Local - DVL). Las Redes de Control Vertical son establecidas para un país o región mediante operaciones de nivelación geométrica y gravimetría con la finalidad de propagar la referencia vertical relativa al Datum Vertical Local. La combinación de observaciones gravimétricas y desniveles, permite el cálculo de números geopotenciales y la subsecuente determinación de alturas físicas. Las alturas niveladas en Ecuador han sido determinadas por el Instituto Geográfico Militar (IGM), mediante nivelación trigonométrica y geométrica desde la década de 1970. Desde entonces, el IGM ha ejecutado trabajos para dar mantenimiento y propagar las referencias de nivel en el territorio nacional. Debido

a que la presencia de errores aleatorios propios de las observaciones geodésicas, es necesario que se realice un ajuste por mínimos cuadrados para compensar dichos errores en la Red de Control Vertical. Dicho ajuste se lo realizó en términos de números geopotenciales, para lo cual se requiere atribuir un valor de gravedad a todas las Referencias de Nivel. En el presente trabajo se muestra el procedimiento seguido para interpolar valores de gravedad a aquellas Referencias de Nivel en las cuales no se ha realizado una observación gravimétrica. Se estima una precisión en la predicción de los valores de gravedad de 1,67 mGal.

Palabras clave: Red de Control Vertical de Ecuador, interpolación gravimétrica, compensación de redes geodésicas, mínimos cuadrados.

ABSTRACT

The Ecuadorian Vertical Control Network materializes the Local Vertical Reference System, whose datum is located in the La Libertad tide gauge (Local Vertical Datum - DVL). Vertical Control Networks are established for a country or region through geometric leveling and gravity surveys with the purpose of propagating the vertical reference relative to the Local Vertical Datum. The combination of gravity observations and levelling allows the calculation of geopotential numbers and the subsequent determination of physical heights. The leveled heights in Ecuador have been determined by the Military Geographic Institute (IGM), through trigonometric and geometric levelling since 1970s. Since then, the IGM has carried out work to maintain and propagate level references in the national territory. Due to the presence of random errors typical of geodetic observations, it is necessary to perform a least squares adjustment to compensate for these errors in the Vertical Control Network. The adjustment is carried out in terms of geopotential numbers, for which it is necessary to attribute a gravity value to all level benchmarks. This work shows the procedure followed to interpolate gravity values to those level references in which a gravity observation has not been made. An accuracy of about 1.67 mGal is estimated for the gravity prediction.

Keywords: Ecuadorian Vertical Control Network, gravity interpolation, geodetic networks adjustment, mean squares.

INTRODUCCIÓN

Las actividades orientadas al establecimiento de una Red de Control Vertical deben ser ejecutadas obedeciendo a los lineamientos proporcionados por la Asociación Internacional de Geodesia (IAG), y siguiendo además la orientación de SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas) Grupo de Trabajo III. Estos lineamientos en general hacen referencia a los aspectos relacionados a las precisiones mínimas requeridas, parámetros, estándares, métodos de cálculo, Sistema Geodésico de Referencia (SGR), sistema de mareas permanentes, sistema gravimétrico de referencia (SGrR), materialización del DV, etc. Es importante señalar que estos lineamientos y recomendaciones deberán, sin embargo, adaptarse a las condiciones propias de cada país.

El establecimiento de una Red de Control Vertical para la determinación de alturas físicas, conlleva a un proceso de ajuste o compensación de errores,

ya que, incluso tomando precauciones y cuidados especiales al momento de realizar observaciones geodésicas, estas están siempre afectadas por inevitables errores en las medidas, consecuencia de la imperfección de los equipos, fallas humanas y condiciones ambientales. Estos errores se clasifican en groseros, sistemáticos y accidentales (aleatorios o randómicos) (Dalmolin, 2010).

Según Gemael, et al. (2015), en la práctica es imposible determinar el valor verdadero en cualquier observación geodésica. Las observaciones, incluso cuando son repetidas en condiciones supuestamente idénticas, están siempre acompañadas de los "inevitables errores de medida" que pueden ser atribuidos a:

- Errores humanos
- Imperfecciones en los equipos
- Influencia de las condiciones ambientales

Los errores groseros generalmente están relacionados a desconcentraciones del observador o del anotador, aunque también pueden ocurrir con menor frecuencia en técnicas de registro automáticas como consecuencia de fallas en el equipo.

Los errores sistemáticos son aquellos que se originan como consecuencia de causas conocidas y en la mayor parte de casos pueden ser evitados mediante técnicas especiales de observación, o eliminados a posteriori mediante la aplicación de fórmulas proporcionadas por la teoría. Este tipo de errores pueden ser minimizados con la calibración de los instrumentos, técnicas de observación y de procesamiento de los datos.

Los errores accidentales, al contrario de los errores sistemáticos, ocurren en diferentes sentidos o no pueden ser asociados a ninguna causa conocida. Una vez se han eliminado los errores groseros y sistemáticos, las observaciones repetidas aún se mantienen inconsistentes, estas discrepancias son atribuidas a los errores accidentales o aleatorios. Mientras los errores sistemáticos tienden a acumularse, los errores accidentales tienden a neutralizarse cuando el número de observaciones aumenta. Para que el proceso de ajuste de la Red de Control Vertical sea realizado, es necesario que las observaciones sean depuradas de influencias sistemáticas y de errores groseros, de tal forma que las técnicas de compensación se enfoquen en los errores aleatorios.

El ajuste de observaciones es una rama de la matemática aplicada, y tiene como objetivo la solución única para problemas en los cuales el número de observaciones (o medidas) es redundante y el sistema de ecuaciones inconsistente. La inconsistencia del sistema de ecuaciones se debe a las fluctuaciones probabilísticas de las observaciones, y hace que un determinado subconjunto de datos proporcione valores diferentes de otro subconjunto. La solución única en estos problemas es dada por el Método de Mínimos Cuadrados (MMC) desarrollado independientemente por Gauss (1795) y Legendre (1805).

Al final del ajuste, se obtiene valores para las incógnitas y un estimado de su precisión. Cualquier parámetro estimado, además de presentar solución única, debe estar acompañado del estimado de su calidad, que representa la dispersión del resultado. A partir de observaciones redundantes sujetas a fluctuaciones probabilísticas y de un estimado de su precisión, el ajuste tiene como objetivo:

- Estimar, mediante la aplicación de modelos matemáticos adecuados y del MMC, un valor único para cada una de las incógnitas del problema;
- Estimar la precisión de tales incógnitas y la eventual correlación entre ellas.

El ajuste de la Red de Control Vertical se realiza en función de los números geopotenciales, para cuyo cálculo es necesario que todas las Referencias de Nivel cuenten con valores para altura nivelada y observación gravimétrica. Ya que, en el caso de la Red de Control Vertical de Ecuador, no se dispone de observación gravimétrica para todas las Referencias de Nivel, estos valores deben ser obtenidos de otras fuentes. Uno de los procedimientos habituales para solventar esta carencia de información, consiste en estimar el valor de la gravedad mediante técnicas de interpolación.

MÉTODOS

La realización de levantamientos geodésicos que incluyen observaciones gravimétricas y nivelación geométrica, densificadas en toda la extensión de la Red de Control Vertical, posibilitan la determinación de desniveles y números geopotenciales, y la subsecuente compensación de los errores propios de las observaciones geodésicas, mediante el principio de los mínimos cuadrados. El ajuste o compensación de la Red de Control Vertical implica la realización de las actividades enunciadas en la Figura 1.

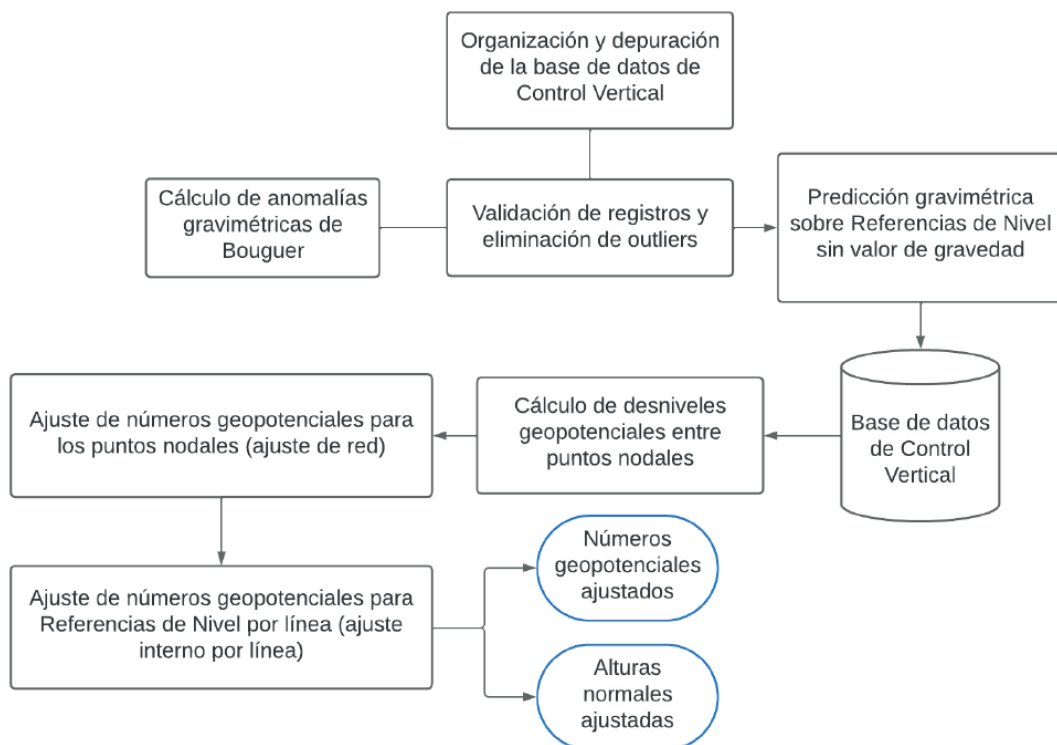


Figura 1.- Procedimiento para el ajuste de la Red de Control Vertical.

Organización y depuración de la base de datos de Control Vertical

La base de datos de Control Vertical, sin considerar la base de datos histórica, contiene registros de observaciones gravimétricas, de desniveles geométricos y de posicionamiento GNSS, levantados durante los últimos 20 años de actividades de campo llevadas a cabo por el Departamento de Geodesia del IGM. Ya que las observaciones geodésicas para el establecimiento de la Red de Control Vertical se realizan sobre marcas instaladas aproximadamente cada 1,5 km, abarcando una proporción considerable de las principales vías del país, y tomando en cuenta además que las observaciones son actualizadas recurrentemente, el volumen de datos contenidos en la base de datos resultante es considerable.

Así, la organización de la base de datos contempla actividades relacionados con el procesamiento de registros nuevos, al reemplazo de registros antiguos por registros actuales, y la compatibilización de las observaciones gravimétricas y de nivelación geométrica (Figura 2).

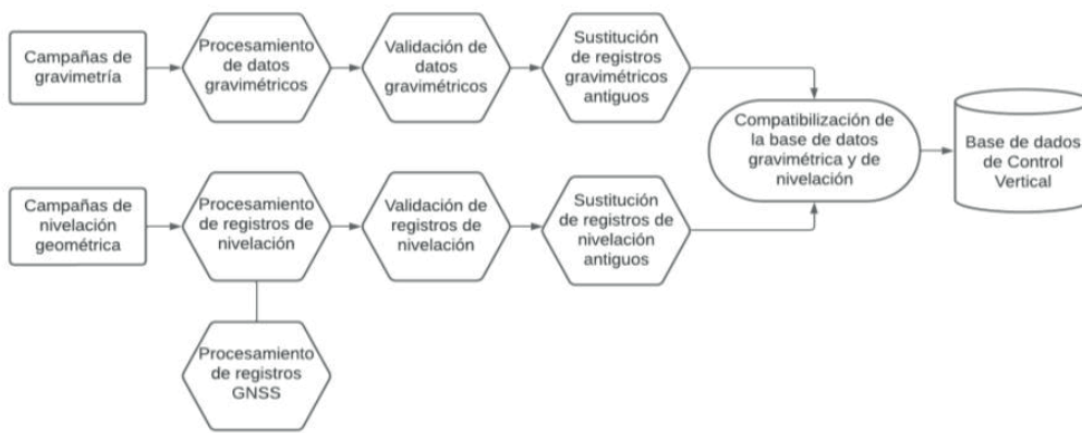


Figura 2.- Organización y depuración de la base de datos de Control Vertical.

Validación de registros y eliminación de outliers

Antes de realizar los cálculos necesarios para la interpolación gravimétrica, es necesario validar la consistencia de la información contenida en la base de datos de Control Vertical. Este procedimiento evita que errores groseros cometidos durante las observaciones geodésicas (nivelación geométrica/gravimétrica), o en el procesamiento y tabulación de las mismas, generen resultados inconsistentes durante la etapa de cálculo.

Uno de los mecanismos habituales (procedimiento estándar) para la validación de bases de datos geodésicas, es la comparación de los registros observados en campo con los correspondientes valores provenientes de modelos globales (e.g. Modelos Globales de Geopotencial – MGGs). Este método, basado en un criterio estadístico (valores esperados dentro de una distribución probabilística normal), representa un mecanismo apropiado para la identificación de outliers (errores groseros) en la base de datos y su correspondiente eliminación.

Se realizó la validación de los registros correspondientes a las Referencias de Nivel de la Red de Control Vertical de Ecuador, evitando de esta forma que errores groseros generen resultados inconsistentes en el cálculo y ajuste de los números geopotenciales derivados.

Un total de 4 446 registros fueron analizados. El análisis tuvo como base la comparación de anomalías gravimétricas de Bouguer con anomalías gravimétricas de Bouguer provenientes del modelo XGM2019e (Zingerle et al., 2020), utilizando su grado máximo de expansión en términos de armónicos esféricos ($n=2\ 190$). Ya que en el cálculo de las anomalías gravimétricas se consideran las alturas niveladas, el análisis de outliers conlleva a la detección de errores groseros en la base de datos gravimétrica y de nivelación.

La depuración de la base de datos es realizada en función de las observaciones gravimétricas y de las alturas niveladas, debido a que las dos observaciones constituyen el insumo para el cálculo de los desniveles y números geopotenciales en el contexto del ajuste de la Red de Control Vertical.

Cálculo de anomalías gravimétricas de Bouguer simple

El objetivo de la anomalía de Bouguer es remover las masas topográficas que se encuentran sobre el geode. Se asume que el área alrededor de la estación gravimétrica es completamente plana y horizontal, y que las masas entre el geode y la superficie física tienen una densidad constante (ρ) (Figura 3).

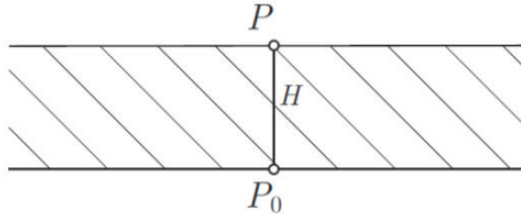


Figura 3.- Plato de Bouguer.
Fuente: Hofmann-Wellenhof & Moritz (2006).

La atracción de las masas topográficas del plato infinito de Bouguer es calculado conforme la ecuación (1) (Hofmann-Wellenhof & Moritz, 2006):

$$A_B = 2\pi G\rho H \quad (1)$$

Con densidad media (ρ) de 2.67 g cm⁻³, la ecuación (1) puede ser escrita como:

$$A_B = 0.1119H[mGal] \quad (2)$$

Con H expresada en metros.

La remoción del plato de Bouguer (1), es equivalente a sustraer su atracción de la gravedad observada, lo cual se conoce como reducción de Bouguer incompleta. Para completar la reducción gravimétrica, se debe aplicar también la reducción de aire. Este proceso combinado de remover las masas topográficas y aplicar la reducción de aire libre es llamada reducción completa de Bouguer y resulta en el cálculo de la gravedad en el geode y consecuentemente en el cálculo de anomalías gravimétricas de Bouguer (Δg_B):

$$\Delta g_B = \Delta g_{FA} - A_B \quad (3)$$

Las anomalías gravimétricas de Bouguer simple fueron obtenidas mediante un *script* desarrollado en lenguaje R, el cual además del cálculo de anomalías gravimétricas permite la depuración de la base de datos (detección de outliers), junto con el cálculo de estadísticos y generación de gráficos. Las anomalías gravimétricas de Bouguer son analizadas con el objetivo de detectar registros con errores groseros (*outliers*). En este sentido fueron calculados los correspondientes estadísticos (Tabla 1) y la distribución de frecuencias para las diferencias de anomalías gravimétricas de aire libre cuando son comparadas con las anomalías del

MGG XGM2019e, previo a la eliminación de outliers (Figura 4).

Número de registros	3236
Desviación estándar (mGal)	22.3189
Media (mGal)	0.0114
Valor máximo (mGal)	70.9306
Valor mínimo (mGal)	-115.7768

Tabla 1.- Estadísticos para las diferencias $\Delta g_{obs} - \Delta g_{XGM2019e}$ de Bouguer antes de eliminación de outliers.

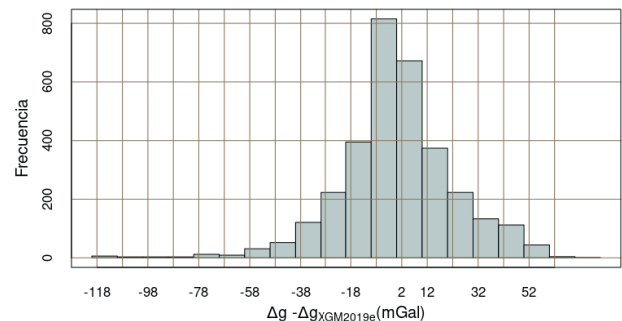


Figura 4.- Histograma de diferencias de anomalías gravimétricas de Bouguer simple, antes de eliminación de outliers.

Detección de outliers (errores groseros)

Una vez calculadas las anomalías gravimétricas para los registros pertenecientes a la Red de Control Vertical, es posible realizar la validación de los mismos mediante comparación con anomalías provenientes de un modelo global. Esta comparación fue realizada con el Modelo Global de Geopotencial (MGG) XGM2019e, utilizando su grado máximo de expansión en términos de armónicos esféricos ($n = 2190$). Este procedimiento fue realizado mediante un *script* escrito en R. El procedimiento para la detección de registros gravimétricos con errores groseros se basa en un criterio estadístico que considera el grado de dispersión

de las diferencias en relación a los valores provenientes de modelos globales. El criterio para filtrar los errores groseros fue eliminar todos los registros cuyos valores de $\Delta g_{obs} - \Delta g_{XGM2019e}$ estén fuera del intervalo: $[\bar{x} - 2 \cdot \sigma, \bar{x} + 2 \cdot \sigma]$ (criterio de las dos sigmas). Siendo \bar{x} la media y σ la desviación estándar calculados para las diferencias $\Delta g_{obs} - \Delta g_{XGM2019e}$.

En la Figura 5 y Figura 6 se observa las anomalías de Bouguer simple calculadas, anomalías de Bouguer simple del MGG XGM2019e y sus diferencias, ploteadas en función de la altura y de la longitud respectivamente, previo al filtrado de *outliers*.

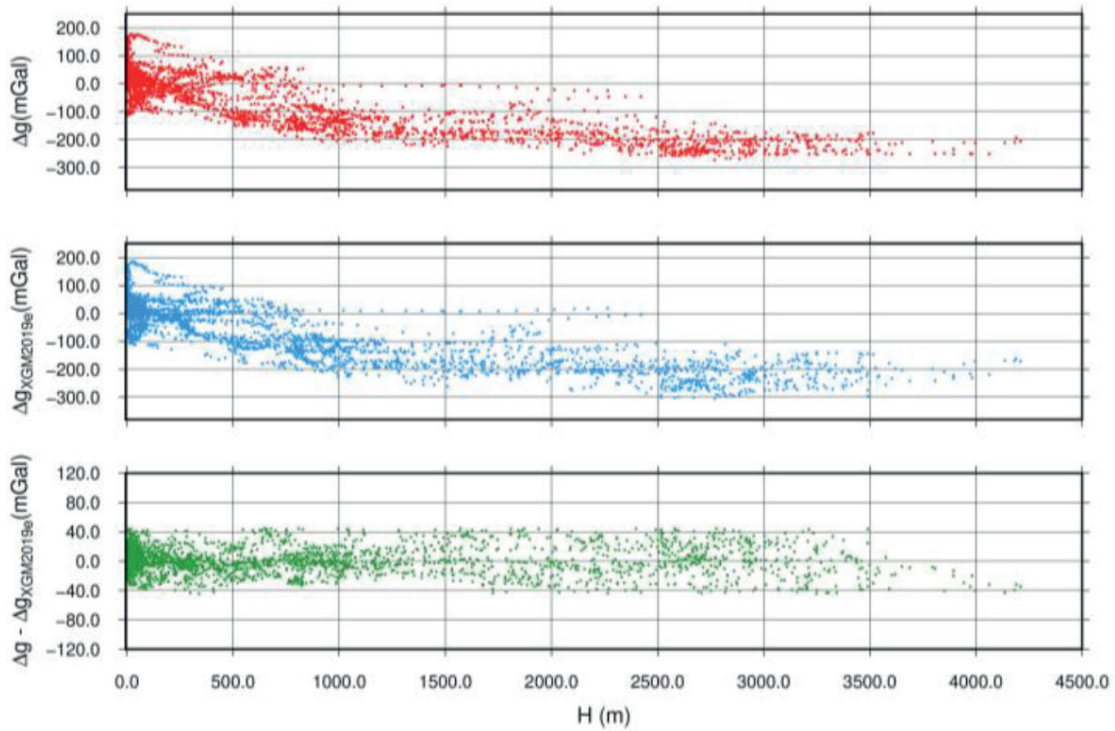


Figura 5.- Anomalías gravimétricas de Bouguer Vs. Altura.

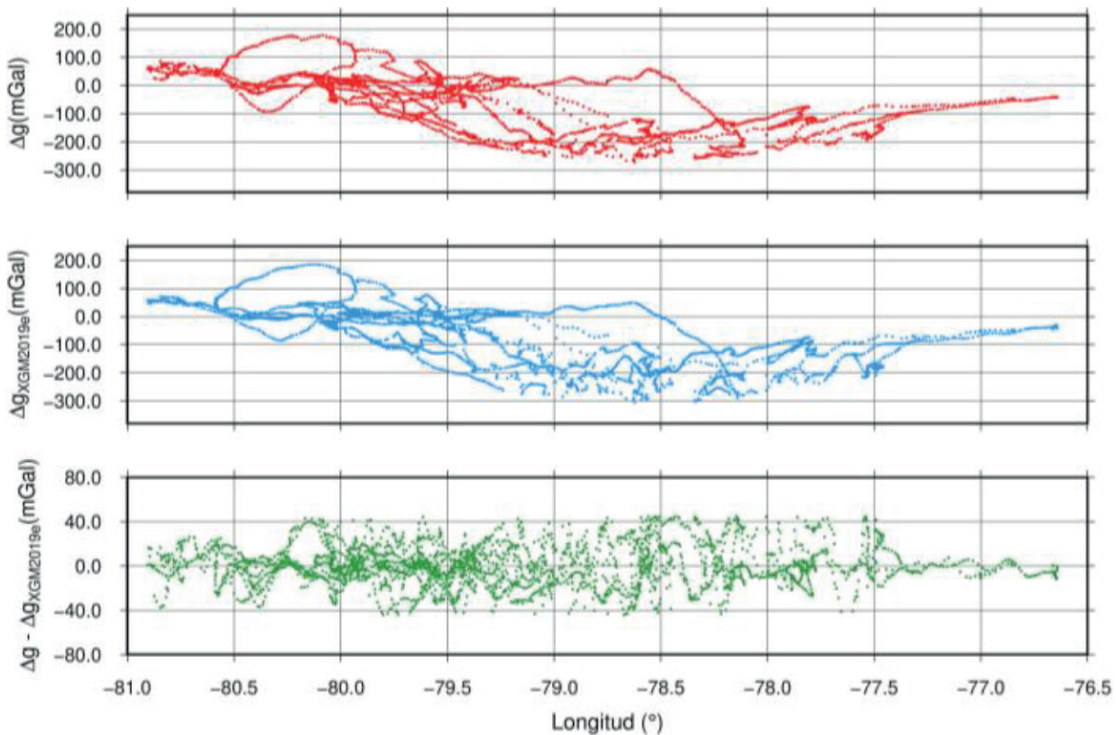


Figura 6.- Anomalías gravimétricas de Bouguer Vs. Longitud.

La discriminación de outliers fue realizada de acuerdo al criterio de las dos sigmas (2σ), y en función la distribución de frecuencias para las diferencias $\Delta g_{obs} - \Delta g_{XGM2019e}$. Los histogramas para las diferencias $\Delta g_{obs} - \Delta g_{XGM2019e}$ luego de la eliminación de errores groseros se muestran en la Figura 7. Los correspondientes valores estadísticos para las mencionadas diferencias son presentados en la Tabla 2.

El grado de adherencia o correlación entre las dos series de datos (valor observado Vs. valor modelado), puede

Número de registros	3043
Registros atípicos	193
Desviación estándar (mGal)	17,5390
Media (mGal)	0,3263
Valor máximo (mGal)	44,6310
Valor mínimo (mGal)	-44,1423

Tabla 2.- Estadísticos para las diferencias $\Delta g_{obs} - \Delta g_{XGM2019e}$ posterior al filtrado de outliers.

apreciarse en la Figura 8 y Figura 9. La correlación de 0,9849, demuestra la consistencia del Modelo Global de Geopotencial (XGM2019e) en relación al valor calculado a partir del registro gravimétrico observado *in situ* (posterior a la eliminación de errores groseros); evidenciándose a la vez las discrepancias relacionadas a errores intrínsecos a las observaciones geodésicas (gravimetría y nivelación geométrica), y al MGG (errores de omisión y comisión, propios del modelado global del campo de gravedad terrestre).

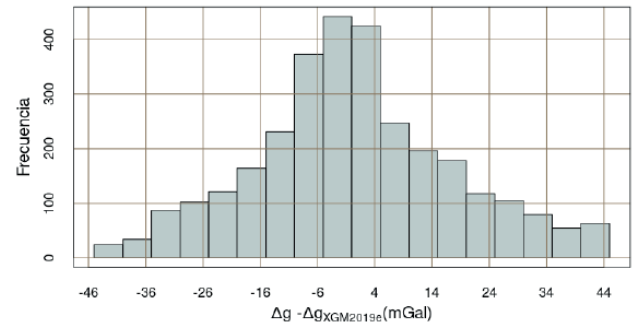


Figura 7.- Histograma de diferencias de anomalías gravimétricas ($\Delta g - \Delta g_{XGM2019e}$) posterior a la eliminación de outliers.

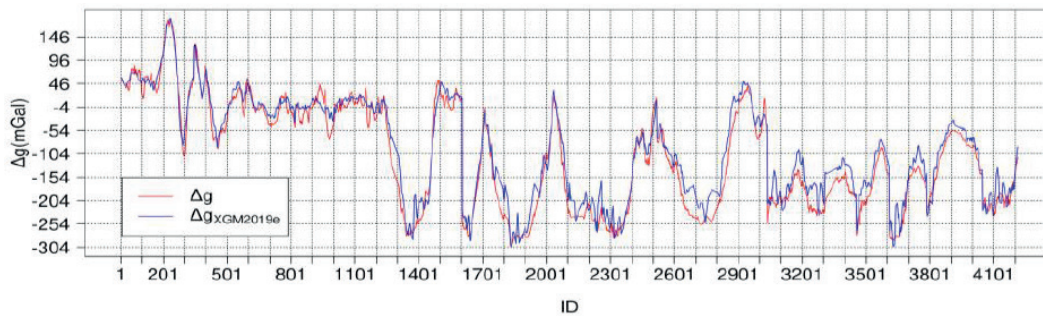


Figura 8.- Anomalías de Bouguer observadas y modeladas de la Red de Control Vertical (en función de un identificador de registro).

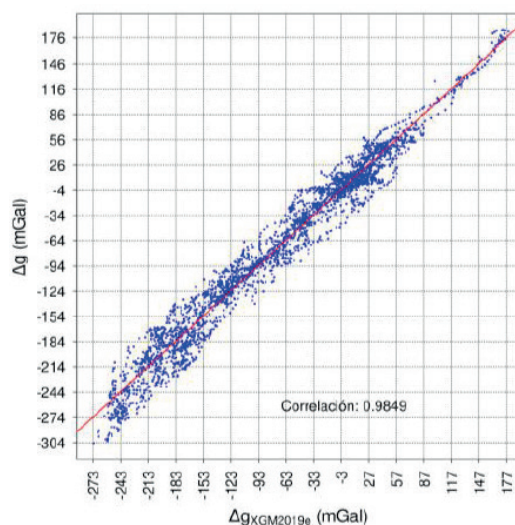


Figura 9.- Correlación entre anomalías de Bouguer observadas y modeladas (MGG XGM2019e).

Predicción de gravedad en Referencias de Nivel para las cuales no se ha realizado observación gravimétrica

Debido a que no todas las referencias de nivel de la Red de Control Vertical cuentan con observación gravimétrica (956 de 4 192, que corresponde al 22,8%), es necesario atribuir valores de gravedad para estas referencias de nivel mediante interpolación y en base a la información gravimétrica existente (Figura 10). Solo de esta forma es posible el cálculo de desniveles y números geopotenciales, y su correspondiente ajuste.

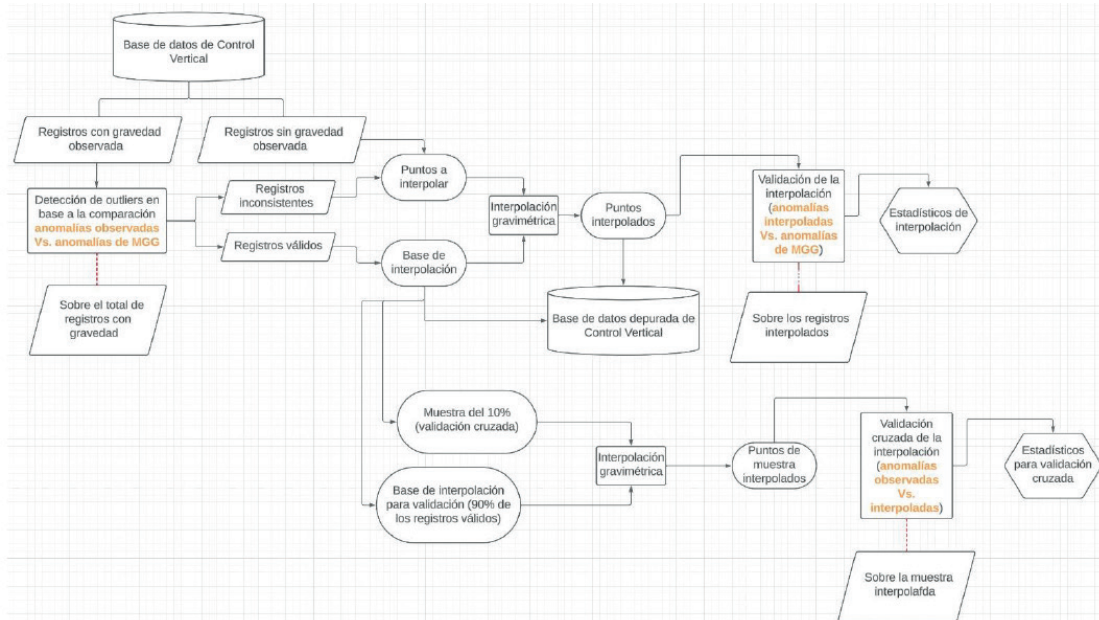


Figura 10.- Interpolación gravimétrica para la Red de Control Vertical.

La interpolación de la gravedad fue realizada de acuerdo al método de colocación por mínimos cuadrados (LSC – *Least-Squares Collocation*), y mediante el programa PREDGRAV (Drewes, 1976, 1978). La predicción es realizada sobre anomalías gravimétricas de Bouguer (Δg_B), las cuales son calculadas en función de la gravedad observada de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\Delta g_B = g_{obs} + C_{AL} + C_B - \gamma \quad (4)$$

Donde, g_{obs} es la gravedad observada, C_{AL} corresponde a la corrección de aire libre (0,3086 H), C_B es la corrección de Bouguer ($2\pi G\rho H$) y γ la gravedad normal para el elipsoide de referencia. La interpolación de las anomalías de Bouguer es realizada de acuerdo al modelo Kolmogorov-Wierner (Moritz, 1980), el cual obedece a la siguiente expresión:

$$\Delta \tilde{g}_P = c^T C^{-1} \Delta g \quad (5)$$

Siendo Δg las anomalías de Bouguer, C la matriz de varianza-covarianza de las anomalías y c el vector de covarianza entre las anomalías calculadas y las interpoladas.

Así, las covarianzas empíricas ($C_{\Delta g}$) para las anomalías calculadas son obtenidas como:

$$\Delta \tilde{g}_P = c^T C^{-1} \Delta g \quad (6)$$

Donde E corresponde al valor esperado, los índices i e j hacen referencia a las estaciones gravimétricas, y S_{ij} la distancia entre las mismas.

Los valores para $C_{\Delta g}$ deben ser clasificados según diferentes intervalos de clase, y su varianza corresponde a $C_{\Delta g}(s=0) = C_0$. Por otra parte, el peso para cada intervalo de clase es igual al número de productos ($\Delta g_i \Delta g_j$).

Las covarianzas empíricas son aproximadas mediante la función exponencial:

$$C_{\Delta g}(S_{ij}) = ae^{-b.S_{ij}} \quad (7)$$

Para lo cual a y b son el producto de un ajuste por mínimos cuadrados según el método paramétrico. Los elementos del vector c son establecidos en función de la distancia entre los valores de gravedad observada y el punto a ser interpolado.

El error de predicción es calculado de acuerdo a la expresión:

$$m_{\Delta\tilde{g}}^2 = C_0 - c^T C^{-1} c \quad (8)$$

Los cálculos para predicción de gravedad son realizados por el programa PREDGRAV considerando para la interpolación los 50 puntos más cercanos al punto a ser interpolado, o en su defecto todos los puntos contenidos en un radio de 100 km.

Una vez que las anomalías gravimétricas de Bouguer han sido interpoladas para los puntos de interés, las mismas son convertidas en valores de gravedad siguiendo el cálculo inverso al descrito en la Ec. (4).

$$\tilde{g}_{obs} = \Delta\tilde{g}_B - C_{AL} - C_B + \gamma \quad (9)$$

Siendo $\Delta\tilde{g}_B$ la anomalía de Bouguer interpolada, y \tilde{g}_{obs} el correspondiente valor de gravedad derivado de la misma.

Análisis de resultados

Una vez realizada la interpolación, se cuenta con valores de gravedad para todas las Referencias de Nivel de la RCVE (4 192). Con la finalidad de validar los valores de gravedad interpolados, y verificar el desempeño del método de predicción de variables, se realiza una validación cruzada considerando el 10% de los registros con gravedad conocida. Los estadísticos producto de este análisis se presentan en la Tabla 3, al tiempo que en la Figura 11 se aprecia la distribución de frecuencias para las diferencias entre valores de gravedad observados e interpolados.

Número de registros	323
Desviación estándar (mGal)	1,6681
Media (mGal)	0,0004
Valor máximo (mGal)	5,2500
Valor mínimo (mGal)	-4,9100

Tabla 2.- Estadísticos para la validación de la interpolación gravimétrica

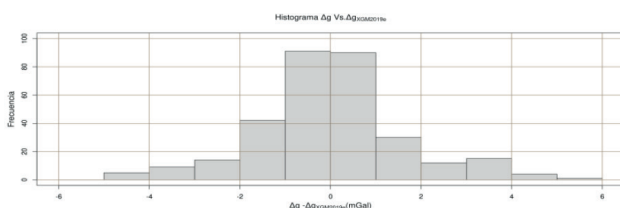


Figura 11.- Histograma de diferencias de gravedad (observada Vs. interpolada).

En la Figura 12 se observa la distribución de las referencias de nivel pertenecientes a la Red de Control Vertical de Ecuador, en color azul los registros para los cuales se dispone de gravedad observada y en color rojo los puntos sobre los cuales se realizó la interpolación.

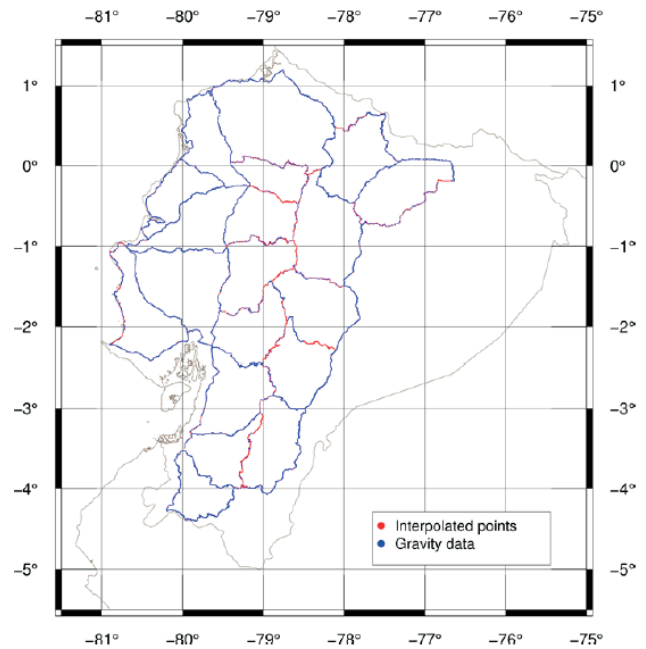


Figura 12.- Gravedad interpolada y observada en la Red de Control Vertical de Ecuador.

CONCLUSIONES

- El cálculo de números geopotenciales implica el conocimiento de los valores de gravedad para todas las Referencias de Nivel de la Red de Control Vertical. La interpolación gravimétrica se hace necesaria ya que no todas las referencias cuentan con una observación gravimétrica asociada.
- Previo a la etapa de cálculos, se requiere depurar la base de datos con el objetivo de evitar la inclusión de errores groseros que puedan generar resultados inconsistentes.
- La comparación de anomalías gravimétricas con valores provenientes de Modelos Globales de Geopotencial, resulta un mecanismo adecuado para la detección de outliers presentes en la base de datos gravimétrica.
- El análisis estadístico de los resultados obtenidos mediante la interpolación gravimétrica, demuestra que la misma se realiza con una precisión estimada de 1,6 mGal.

BIBLIOGRAFÍA

- Dalmolin, Q. (2010). Ajustamento por Mínimos Quadrados (3ra ed.). Imprensa Universitária-UFPR.
- Drewes, H. (1976). Berechnung regionaler Geoidundulationen durch gravimetrisches Nivellement mit Prädiktion der Schwereanomalien. Wissenschaftliche Arbeiten der Lehrstühle für Geodäsie, Photogrammetrie und Kartographie an der Technischen Universität Hannover.
- Drewes, H. (1978). Experiences with least squares collocation as applied to interpolation of geodetic and geophysical quantities. XII Symposium on Mathematical Geophysics.
- Gemael, C., Muriel, Á. & Wandresen, R. (2015). Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas (2da ed.). Editora UFPR.
- Hofmann-Wellenhof, B. & Moritz, H. (2006). Physical geodesy. Springer Science & Business Media.
- Moritz, H. (1980). Advanced physical geodesy. Karlsruhe : Wichmann ; Tunbridge, Eng. : Abacus Press, 1980., 1, 506. <https://doi.org/10.1029/EO063i021p00514-03>
- Zingerle, P., Pail, R., Gruber, T. & Oikonomidou, X. (2020). The combined global gravity field model XGM2019e. *Journal of Geodesy*, 94(7). <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01398-0>



Soluciones y precisiones de posicionamiento de datos GNSS de estaciones REGME, con constelaciones GPS y GLONASS, empleando software científico GAMIT/GLOBK y Bernese

Solutions and positioning accuracies of GNSS data from REGME stations, with GPS and GLONASS constellations, using GAMIT/GLOBK and Bernese scientific software

Francisco Galárraga
luis.galarraga@geograficomilitar.gob.ec

Andrés Jaramillo
andres.jaramillo@inocar.mil.ec

RESUMEN

Las aplicaciones de una red geodésica de estaciones permanentes GNSS (Global Navigation Satellite Systems) es muy diversa en cuanto a las precisiones de los resultados perseguidos, variando desde precisiones milimétricas hasta aquellas centimétricas. Para que la realización del procesamiento de las observaciones GNSS sea lo más apegado a la realidad y confiable, es necesario que el procesamiento de dichos datos sea realizado en un software científico. Paquetes de software científico de procesamiento de datos GNSS como GAMIT/GLOBK y Bernese que no pueden ser descargados gratuitamente, consideran ciertos factores que un software comercial no los toma en cuenta como son: la época de referencia, los modelos

de movimiento de placas tectónicas, las velocidades de las estaciones terrestres, los modelos de mareas terrestres y oceánicas, entre otros parámetros. Finalmente, los niveles de precisión que se alcanzaron con los dos softwares científicos en el procesamiento de datos GNSS de la Red de Monitoreo Continuo del Ecuador con las constelaciones satelitales GPS y GLONASS fueron en el orden del milímetro, comparando los resultados obtenidos con las soluciones oficiales de SIRGAS, pudiendo determinar que el software GAMIT/GLOBK otorga mejores parámetros de procesamiento para el Ecuador con la constelación GPS.

Palabras claves: GAMIT/GLOBK, GPS/GLONASS, Software científico, REGME, precisión de posicionamiento.

ABSTRACT

The applications of a geodetic network of permanent GNSS (Global Navigation Satellite Systems) stations are very diverse in terms of the accuracies of the results sought, varying from millimeter to centimeter precisions. In order for the processing of GNSS observations to be as close to reality and reliable as possible, it is necessary that the processing of such data is carried out in scientific software. GNSS scientific data processing software packages such as GAMIT/GLOBK and Bernese that cannot be downloaded for free, consider certain factors that a commercial software does not take into account, such as: reference epoch, models of tectonic plate movement, velocities of earth stations, land and ocean tidal models, among other parameters. Finally, the levels of precision that were achieved with the two scientific software in the processing of GNSS data of the Continuous Monitoring Network of Ecuador with the GPS and GLONASS satellite constellations were in the order of a millimeter, comparing the results obtained with the official SIRGAS solutions, being able to determine that the GAMIT/ GLOBK software provides better processing parameters for Ecuador with the GPS constellation.

Keywords: GAMIT/GLOBK, GPS/GLONASS, scientist Software, REGME, Positioning precision.

INTRODUCCIÓN

El posicionamiento GNSS es una de las tecnologías más utilizadas en levantamientos geodésicos y topográficos; aunque erróneamente se lo relaciona únicamente con la constelación satelital GPS, esta se encuentra conformada por varias constelaciones como lo son Galileo de la Unión Europea, GLONASS (Global Navigation Satellite System) de Rusia, BeiDou o Compass de China y el mencionado GPS (Global Positioning System) de Estados Unidos de América (Alves, 2009).

La Red GNSS De Monitoreo Continuo Del Ecuador – REGME, instalada y administrada por el IGM, es una red compatible con las técnicas de posicionamiento disponibles en la actualidad, como son los sistemas satelitales de navegación global: GPS, GLONASS y en un futuro GALILEO (León, 2021). La REGME para el año 2021 estuvo conformada por 41 estaciones cuya distribución y densidad brindaron una cobertura nacional.

La generación de información posicional de alta precisión en el transcurso de los últimos años, ha involucrado la creación e innovación de diversas metodologías y herramientas, orientadas a minimizar y corregir los diversos errores de origen natural y antrópico, que están presentes al momento de realizar un rastreo o levantamiento, los mismos que tienden a generar inconsistencias, que para proyectos de investigación científica constituyen posibles problemas o conflictos (Christian Pilapanta, 2013).

Característica intrínseca de la Geodesia, es la comprobación y certificación de resultados obtenidos; mediante los diferentes procesos detallados en su contexto, de la misma manera; resulta trascendental el manejo y confrontación de numerosas pericias y paquetes de software de procesamiento, a fin de determinar el camino más idóneo para la presentación de conclusiones y soluciones (Kaniuth & Völksen, 2003).

Paquetes de software científico de procesamiento de datos GNSS como GAMIT/ GLOBK y Bernese, consideran ciertos factores que un software comercial no los toma en cuenta como son: la época de referencia, los modelos de movimiento de placas tectónicas, las velocidades de las estaciones terrestres, los modelos de mareas terrestres y oceánicas, distintas realizaciones de un determinado sistema de referencia, entre otros parámetros (Andrade, 2012). Dichos parámetros permiten alcanzar mejores precisiones en los datos procesados.

Uno de los problemas que se identificaron en el país en cuánto a procesamiento de datos GNSS en software científico, es que no se tenía un estudio

técnico en el cual se analicen y comparen las soluciones obtenidas (coordenadas) y las precisiones alcanzadas, entre softwares y constelaciones satelitales. Este análisis comparativo debe ser realizado, considerando la precisión interna y la precisión externa. La primera está referida a la repetitividad de las soluciones, la segunda está referida a una comparación de las soluciones obtenidas con la solución oficial de SIRGAS y entre soluciones con sus precisiones obtenidas entre softwares.

El análisis surge en un contexto de evolución de las metodologías de procesamiento de datos posicionales GNSS en el Ecuador. El realizar un análisis comparativo entre software de procesamiento geodésico permite verificar y validar resultados mediante la aplicación de diversas estrategias de procesamiento, así mismo realizar un análisis estadístico de los resultados permite validar la precisión de los datos obtenidos.

METODOLOGÍA

Para analizar la precisión de las soluciones alcanzadas en el procesamiento de datos GNSS de la Red de Monitoreo Continuo del Ecuador (REGME), con las constelaciones GPS y GLONASS, empleando los paquetes de software GAMIT/GLOBK y Bernese, se definen dos etapas principales de trabajo: la primera referida al procesamiento de datos y materialización de coordenadas y el segundo al análisis de las soluciones. La etapa de procesamiento de datos y materialización de coordenadas incluyó:

- Obtención y control de los datos recolectados por las estaciones GNSS para monitoreo continuo pertenecientes a la REGME.
- Ajuste de las observaciones GNSS utilizando el método de mínimos cuadrados y método de filtro de Kalman.

El procesamiento de datos y la obtención de coordenadas se realizó en los software científicos: Bernese 5.2 y GAMIT/GLOBK 10.7, se analizaron los datos GNSS con las constelaciones satelitales GPS y GLONASS. La elección para estas

plataformas se realizó de acuerdo a la compatibilidad de modelos y algoritmos utilizados en la generación de soluciones, a fin de ser comparadas con las generadas por SIRGAS.

En la segunda etapa correspondiente al análisis de soluciones, se validaron las soluciones y precisiones obtenidas con la ayuda de un análisis estadístico. El análisis de resultados incluyó los siguientes pasos: el análisis de soluciones posicionales con el objetivo de evaluar la calidad de las soluciones obtenidas y el análisis de la precisión de las soluciones a partir del estudio de las precisiones internas y externas de cada solución. En este sentido, los principales puntos fueron:

- Evaluación del modelo de procesamiento comparando soluciones semanales y soluciones SIRGAS (precisión externa).
- Valoración individual de las soluciones diarias mediante el análisis de su repetitividad (precisión interna).

Diseño de la red geodésica y elección del período de rastreo

Para el diseño de la red geodésica se consideraron 15 de las estaciones de monitoreo continuo pertenecientes a la REGME, se ha escogido este número de estaciones por el tema de disponibilidad de datos. Se analizaron aquellas estaciones que durante el período de los meses de febrero – abril del 2020, 13 semanas con un mínimo de 75 días de datos receptados. Adicional, el número de estaciones escogidas para su posterior procesamiento de datos se restringió determinadas debido al tema de disponibilidad de equipos computacionales para el procesamiento en los softwares científicos y recurso tiempo. Por otro lado, para la elección de las estaciones se tomó en cuenta aquellas que por su ubicación geográfica permitieron cubrir la mayor parte del territorio ecuatoriano. El diseño de la red se realizó siguiendo las especificaciones geométricas de una red clásica, es decir, formando idealmente triángulos equiláteros entre cada estación de monitoreo continuo a ser seleccionada (Figura1).

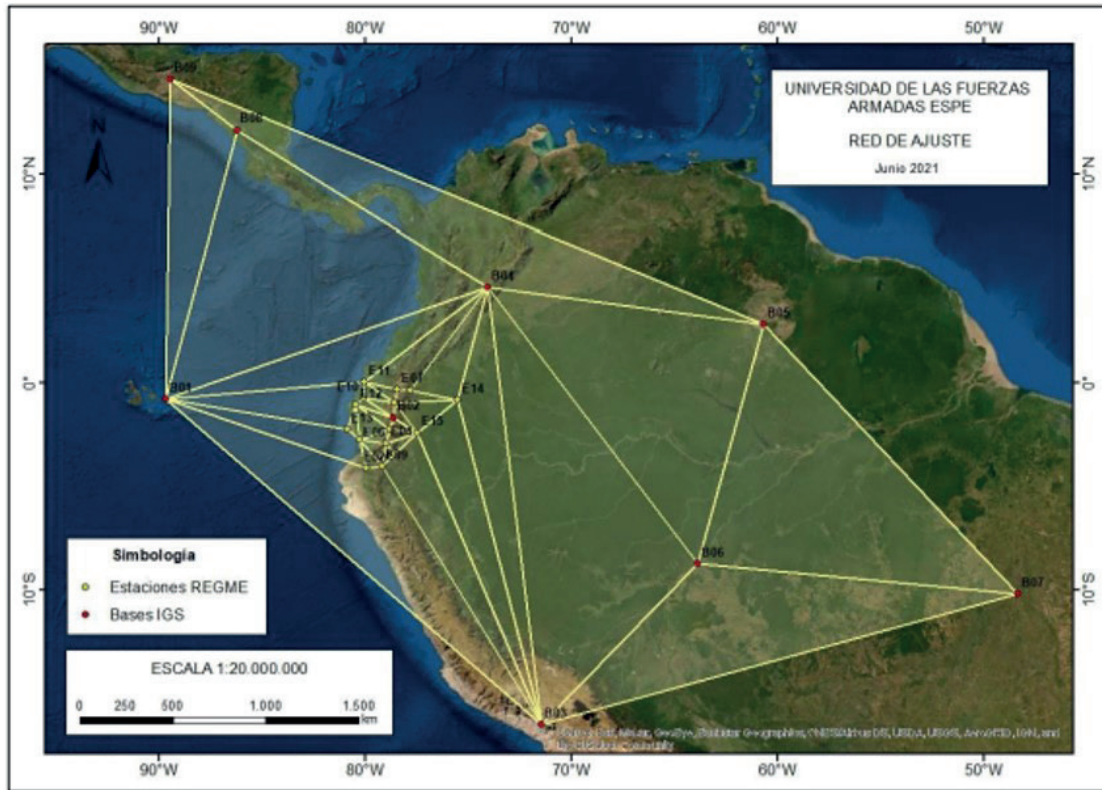


Figura 1.- Red geodésica de ajuste.
Fuente: Autores, 2021.

Adicionalmente y dado que para el ajuste de la red geodésica en estudio se utilizan 9 estaciones GNSS pertenecientes a la Red IGS detallada en la Tabla 1. Las estaciones de estudio también involucran, de manera secundaria, a las que se muestran en la tabla a continuación.

N°	NOMBRE	UBICACIÓN	RED
1	ALEC	Ambato	SIRGAS / REGME
2	CEEC	Célica	SIRGAS / REGME
3	CHEC	El Chaco	SIRGAS / REGME
4	CUEC	Cuenca	SIRGAS / REGME
5	CXEC	Cotopaxi	SIRGAS / REGME
6	DPEC	Posorja	SIRGAS / REGME
7	EPEC	ESPE	SIRGAS / REGME
8	GZEC	Gualaquiza	SIRGAS / REGME
9	LJEC	Loja	SIRGAS / REGME
10	ONEC	Chone	SIRGAS / REGME
11	PAEC	Pedernales	SIRGAS / REGME
12	POEC	Portoviejo	SIRGAS / REGME
13	SEEC	Santa Elena	SIRGAS / REGME
14	TPEC	Tiputini	SIRGAS / REGME
15	TSEC	Taisha	SIRGAS / REGME

ESTACIONES BASE PERTENECIENTES A LA IGS			
N°	NOMBRE	UBICACIÓN	RED
1	GLPS	Galápagos	IGS / SIRGAS
2	RIOP	Riobamba	IGS / SIRGAS
3	AREQ	Arequipa	IGS / SIRGAS
4	BOGT	Bogotá	IGS / SIRGAS
5	BOAV	Boa Vista	IGS / SIRGAS
6	POVE	Porto Velho	IGS / SIRGAS
7	TOPL	Palmas	IGS / SIRGAS
8	MANA	Managua	IGS / SIRGAS
9	GUAT	Ciudad de Guatemala	IGS / SIRGAS

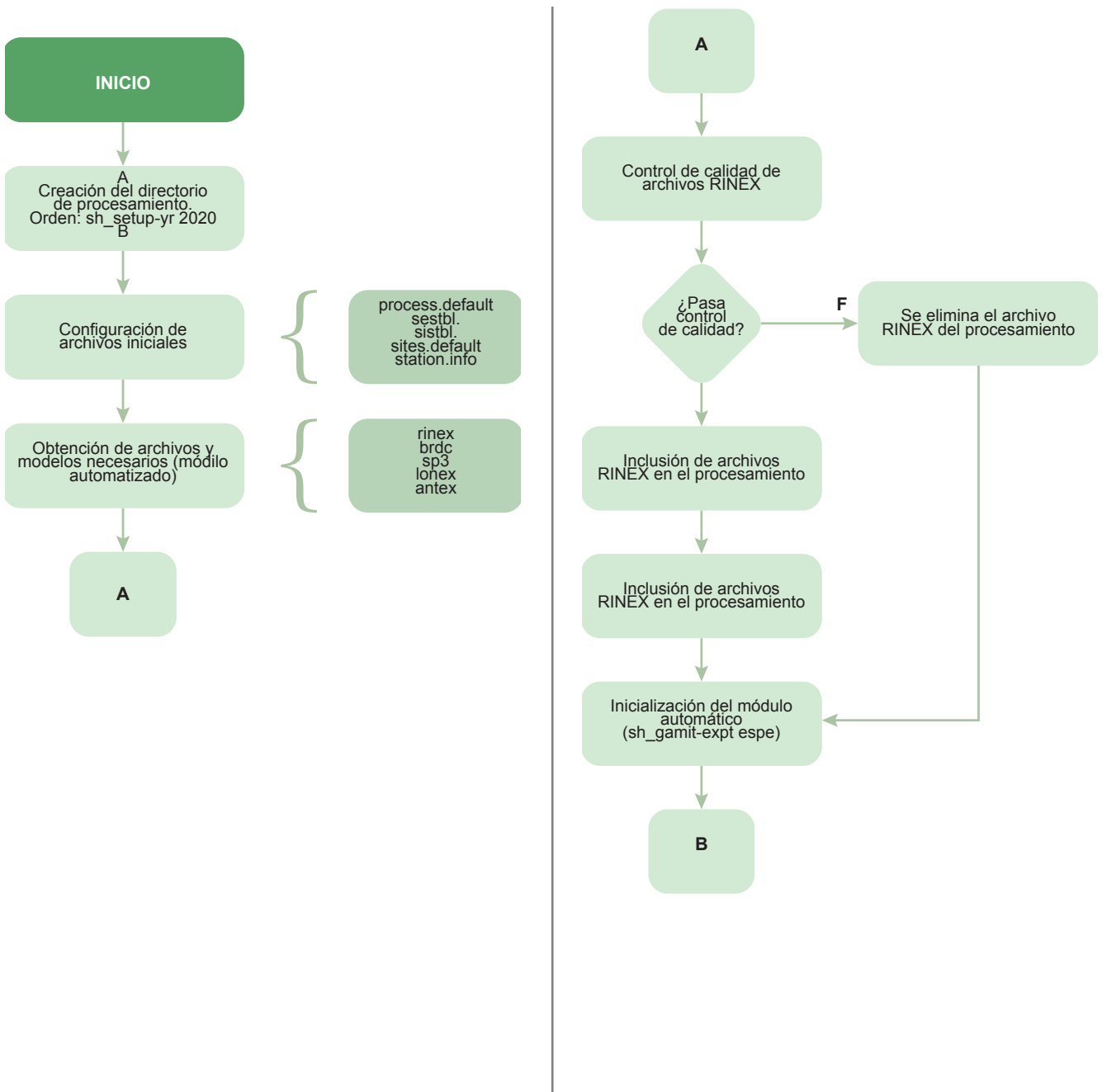
Tabla 1: Estaciones GNSS de la red geodésica en estudio y estaciones base para el ajuste.
Fuente: Autores, 2021.

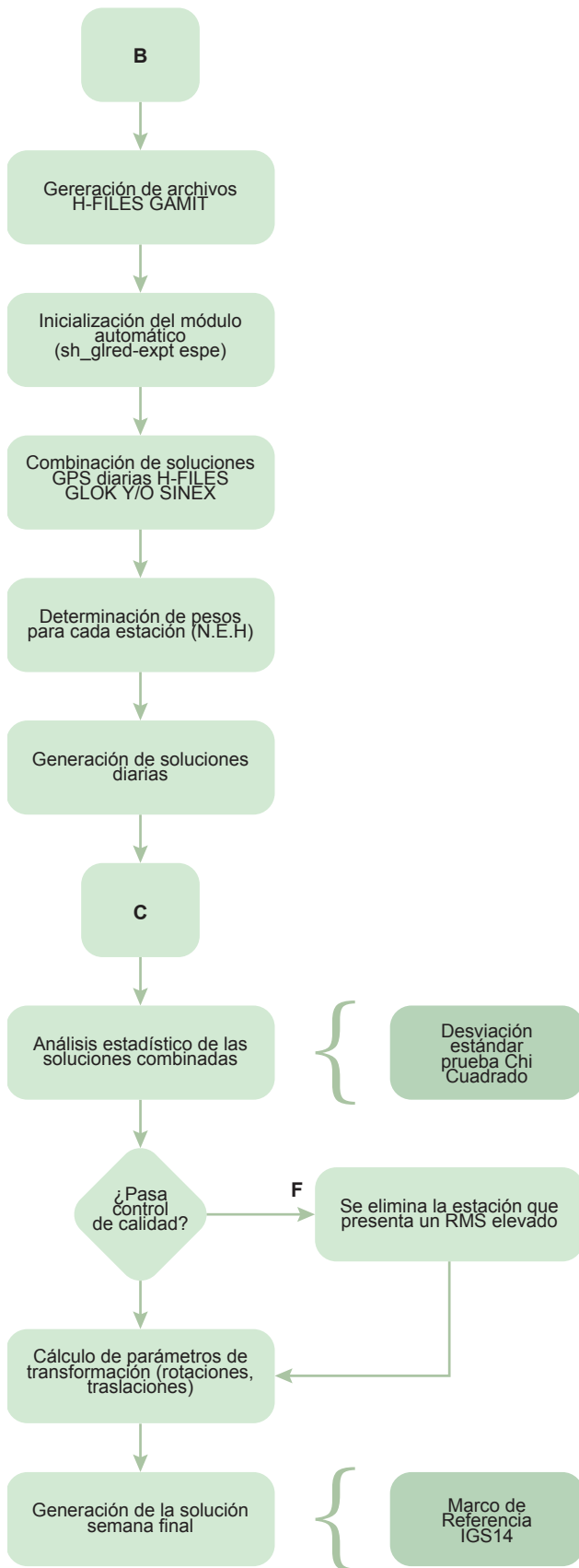
Flujogramas de procesamiento

El procesamiento de datos en este estudio se basa en las pautas establecidas en la Guía para centros de análisis SIRGAS (Sanchez, 2017). Es importante señalar que dado que los datos orbitales y de reloj originales generados por IGS tienen sus logros en el sistema de referencia para el período de estudio IGB14. Los esquemas fundamentales de procesamiento de datos y materialización de coordenadas utilizado en esta investigación se muestran a continuación.

Software GAMIT/GLOBK 10.7

En la Figura 2, se presenta el diagrama de flujo, el cual resume el procedimiento realizado para el procesamiento de datos GNSS en el software científico GAMIT/GLOBK 10.7.





Software Bernese 5.2

Como se indica en la Figura 3 el diagrama de flujo, resume el procedimiento realizado para el procesamiento de datos GNSS en el software científico Bernese 5.2.

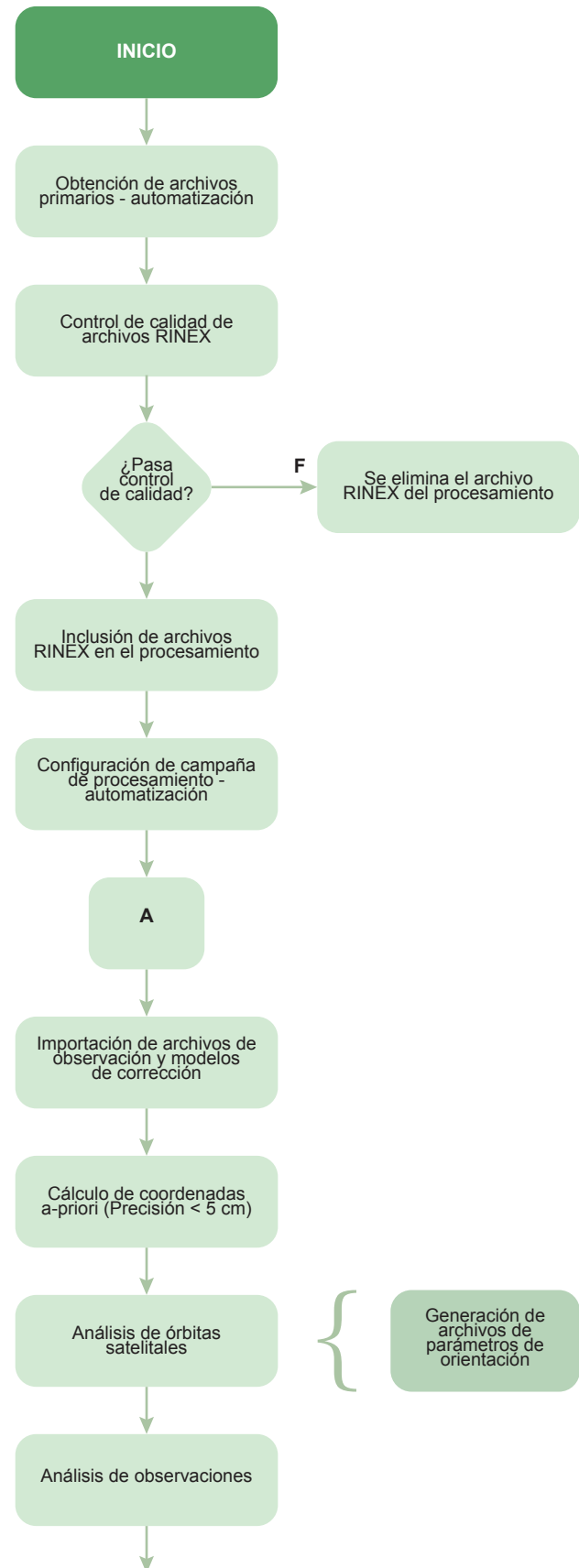


Figura 2: Diagrama de flujo procesamiento GAMIT/GLOBK.
 Fuente: Autores, 2021.

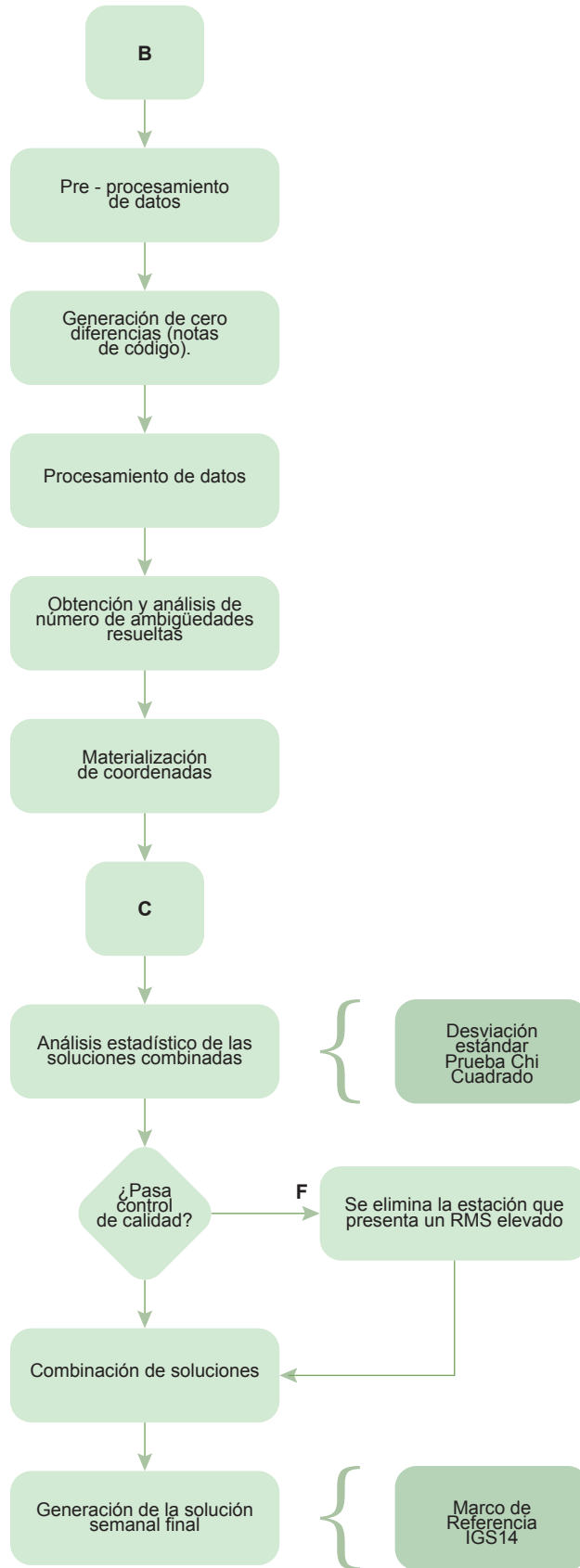


Figura 3: Diagrama de flujo procesamiento Bernese 5.2.
Fuente: Autores, 2021.

RESULTADOS

Para evaluar la consistencia del modelo de procesamiento en relación al modelo SIRGAS, se compararon las soluciones semanales obtenidas en el procesamiento de los datos GNSS con los softwares científicos GAMIT/GLOBK y Bernese, con las soluciones SIRGAS semanales obtenidas a través del protocolo FTP de su sitio web oficial.

Como coordenada de referencia para el sistema local topocéntrico, se seleccionó un promedio de las soluciones obtenidas en el procesamiento de los datos GNSS con los softwares científicos empleados en el presente proyecto. Con base en este precepto, las Figuras 4 y 5 muestran los promedios de las diferencias residuales obtenidas por componente para cada una de las estaciones evaluadas, así como sus respectivas desviaciones estándar.

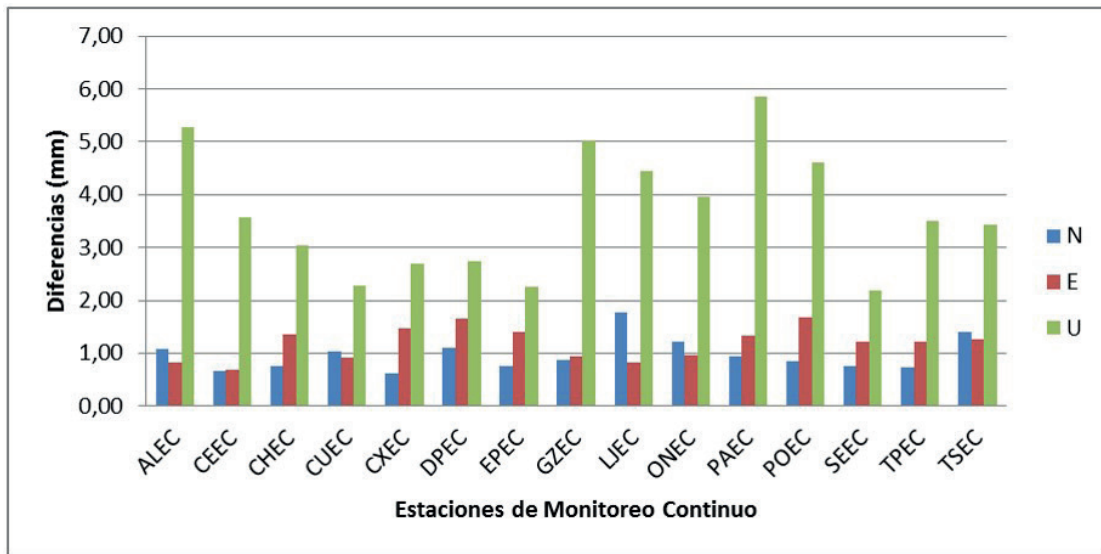


Figura 4.- Diferencias medias entre soluciones SIRGAS y datos GNSS procesados en GAMIT/GLOBK, constelación GPS.
 Fuente: Autores, 2021.

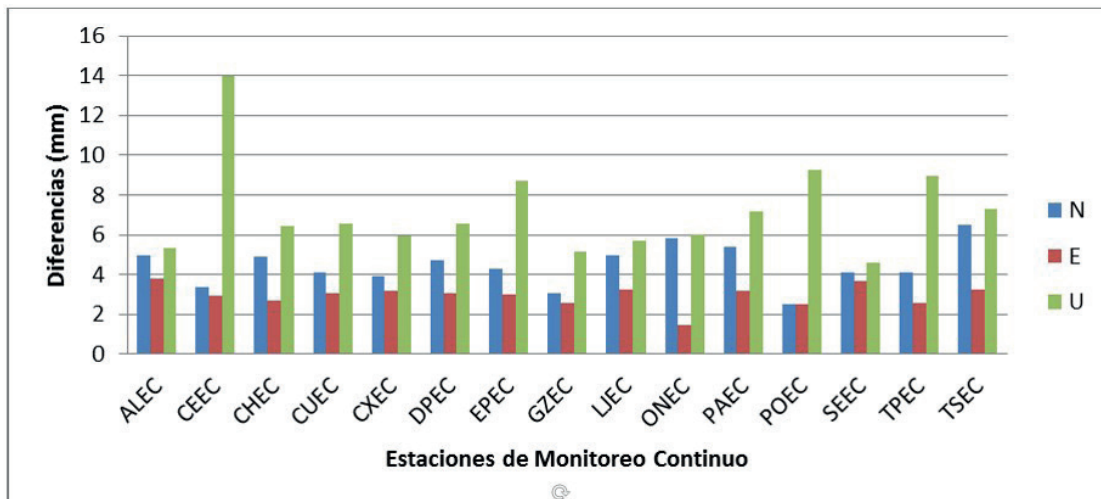


Figura 5.- Diferencias medias entre datos GNSS procesados en GAMIT/GLOBK, comparación entre las constelaciones GPS y GLONASS.
 Fuente: Autores, 2021.

Coordenadas ENU (East, North, Up), GPS comparadas con SIRGAS, de los resultados obtenidos del procesamiento de los datos GNSS en el software GAMIT/GLOBK.

Nº	ESTACIÓN	NORTE MEDIA (mm)	ESTE MEDIA (mm)	ALTITUD MEDIA (mm)
1	ALEC	1,07	0,83	5,27
2	CEEC	0,66	0,68	3,56
3	CHEC	0,75	1,36	3,04
4	CUEC	1,03	0,93	2,29
5	CXEC	0,61	1,46	2,69
6	DPEC	1,10	1,67	2,74
7	EPEC	0,75	1,39	2,25
8	GZEC	0,87	0,95	5,01
9	LJEC	1,76	0,83	4,44
10	ONEC	1,23	0,97	3,95
11	PAEC	0,94	1,34	5,86
12	POEC	0,85	1,68	4,60
13	SEEC	0,77	1,21	2,19
14	TPEC	0,73	1,21	3,51
15	TSEC	1,41	1,26	3,44
Media		0,97	1,18	3,66
Máximo		1,76	1,68	5,86
Mínimo		0,61	0,68	2,19

Tabla 2.- Resultados estadísticos de las diferencias ENU entre coordenadas semanales obtenidas con la constelación GPS comparadas con las soluciones semanales de SIRGAS, procesadas en el software GAMIT/GLOBK
Fuente: Autores, 2021.

Dados los resultados obtenidos, principalmente en la media aritmética que está definido como el indicador del RMS de cada base procesada, el modelo puede considerarse estable y consistente (precisión externa de la solución) con las soluciones del sistema regional SIRGAS. Cabe mencionar que los resultados que se muestran en la Tabla 2 son para la constelación satelital GPS en el software científico GAMIT/GLOBK.

Coordenadas ENU, GPS comparadas con GLONASS, de los resultados obtenidos del procesamiento de los datos GNSS en el software GAMIT/GLOBK.

Los resultados presentados en la Tabla 3 muestran que la media de la precisión externa entre GPS y GLONASS, de los datos GNSS de las 13 semanas procesados en GAMIT/GLOBK, se encuentran dentro de los límites de RMS pre establecidos. Sin embargo, se evidencia un incremento en los valores del RMS, esto se puede deber a que el sistema local topocéntrico, tiene su coordenada de origen como el promedio de las 13 semanas de procesamiento con la constelación GPS.

Nº	ESTACIÓN	NORTE MEDIA (mm)	ESTE MEDIA (mm)	ALTITUD MEDIA (mm)
1	ALEC	4,98	3,82	5,30
2	CEEC	3,36	2,91	13,98
3	CHEC	4,87	2,69	6,46
4	CUEC	4,07	3,08	6,56
5	CXEC	3,92	3,16	5,93
6	DPEC	4,71	3,07	6,55
7	EPEC	4,31	3,02	8,68
8	GZEC	3,06	2,55	5,16
9	LJEC	4,98	3,23	5,72
10	ONEC	5,80	1,46	6,03
11	PAEC	5,41	3,15	7,20
12	POEC	2,51	2,49	9,27
13	SEEC	4,08	3,64	4,57
14	TPEC	4,12	2,54	8,96
15	TSEC	6,47	3,24	7,29
Media		4,44	2,94	7,18
Máximo		6,47	3,82	13,98
Mínimo		2,51	1,46	4,57

Tabla 3.- Resultados estadísticos de las diferencias ENU entre coordenadas semanales obtenidas con la constelación GPS comparadas con las obtenidas de la constelación GLONASS, procesadas en el software GAMIT/GLOBK.
Fuente: Autores, 2021.

Coordenadas ENU, GPS comparadas con SIRGAS, de los resultados obtenidos del procesamiento de los datos GNSS en el software Bernese.

Nº	ESTACIÓN	NORTE MEDIA (mm)	ESTE MEDIA (mm)	ALTITUD MEDIA (mm)
1	ALEC	2,93	4,24	5,28
2	CEEC	4,56	2,42	9,53
3	CHEC	2,95	4,31	5,73
4	CUEC	2,91	4,09	5,77
5	CXEC	3,41	4,08	5,73
6	DPEC	1,41	3,03	7,64
7	EPEC	3,07	5,09	5,12
8	GZEC	3,33	4,22	7,44
9	LJEC	3,16	4,37	7,25
10	ONEC	2,99	4,04	6,17
11	PAEC	2,99	3,99	7,36
12	POEC	3,39	3,59	7,20
13	SEEC	2,87	10,02	6,67
14	TPEC	2,99	4,09	6,59
15	TSEC	2,46	4,37	5,25
Media		3,03	4,40	6,58
Máximo		4,56	10,02	9,53
Mínimo		1,41	2,42	5,12

Tabla 4.- Resultados estadísticos de las diferencias ENU entre coordenadas semanales obtenidas con la constelación GPS comparadas con las obtenidas de la constelación GLONASS, procesadas en el software GAMIT/GLOBK.
Fuente: Autores, 2021.

Los valores presentados en la Tabla 4, exponen que la media de la precisión externa, de los datos GNSS de las 13 semanas procesados en Bernese, se encuentran por debajo de los límites de RMS pre establecidos. Al mismo tiempo, se exterioriza que, para el caso de 14 de las 15 estaciones procesadas, sus soluciones están dentro del rango sugerido (RMS) para ser consideradas soluciones consistentes con las soluciones procedas con la constelación GPS. En el caso específico de la estación SEEC, que tiene una diferencia promedio de 10.02 mm para el componente este, se puede decir que, dado que el valor es representativo solo en una de las tres componentes, no afecta del proceso de materialización de las soluciones.

Comparación de las soluciones obtenidas del procesamiento de los datos GNSS, en los softwares GAMIT/GLOBK y Bernese, con la constelación GPS

Los softwares de procesamiento de datos GNSS de carácter científico (GAMIT/GLOBK y Bernese), desempeñan un papel importante en estudios que requieren alta precisión, donde es fundamental e indispensable tener repetitividad de posiciones y soluciones que ayudarán a representar los RMS de posicionamiento. Es importante considerar que cada software presenta diferentes tipos y estrategias de procesamiento, por lo que, a pesar de existir un delgado margen de diferencia en los productos resultantes presentados por los paquetes informáticos utilizados, estos se encuentran dentro de los límites expuestos durante el desarrollo del presente trabajo de investigación.

CONCLUSIONES

- Previo al procesamiento de los datos GNSS es requisito fundamental definir los parámetros y modelos adecuados para cada caso de procesamiento. Para la constelación satelital GPS, tanto en el software GAMIT/GLOBK 10.7 como Bernese 5.2 se cuentan con modelos de corrección diseñados exclusivamente para esta constelación, mismos que permitan minimizar al máximo los errores de posicionamiento, otorgando así mejores resultados en el procesamiento de datos. Para la materialización de soluciones con la constelación satelital GLONASS,

realizada en el software GAMIT/GLOBK, los modelos y parámetros que este software tiene disponibles no son propios de esta constelación, por lo tanto, los modelos que se emplean para el procesamiento de datos GNSS con GLONASS son los mismos que los usados para GPS, lo que influye directamente en los niveles de precisión alcanzados para la materialización de soluciones.

- Una vez materializadas las soluciones semanales, se concluye que no existe una diferencia significativa en cuanto a las presiones alcanzadas, tanto en el procesamiento de datos GPS como GLONASS en los dos paquetes informáticos empleados. La materialización de soluciones con la constelación GLONASS arroja menores niveles en cuanto a precisión para datos GNSS de la REGME, una de las causas de esto se fundamenta en la conclusión previamente descrita. La media de diferencia entre GPS y GLONASS, para la presente campaña de procesamiento es de 4,44 mm (N), 2,94 mm (E) y 7.18 (U) mm.
- Para el análisis de la precisión externa, en la cual se compararon las soluciones semanales de la constelación GPS, procesadas en ambos softwares, con las soluciones oficiales semanales de SIRGAS, se concluye que los ΔX , ΔY & ΔZ , no superan los 10 cm de diferencia en cuanto a la comparación entre coordenadas cartesianas; razón por la cual se aceptan los resultados obtenidos.
- Las semanas de procesamiento 2093 y 2098, son las que mayores valores ΔX , ΔY & ΔZ arrojan, principalmente en la componente Y; lo que puede indicar que existieron anomalías en el rastreo de datos durante estas semanas. Cabe subrayar que estos valores no superan los límites, por lo que no se ve alterada de manera significativa los resultados de la campaña de procesamiento, esto se puede evidenciar en las tablas de precisión interna presentadas.
- En cuanto a la precisión interna, en la cual se analiza la serie de residuos para cada una de las componentes de las estaciones, mismos

que no deben superara los 5mm para norte y este y 15 mm para sur, se evidenció que para el procesamiento de datos con la constelación GPS y con ambos softwares empleados no superan los límites descritos, lo que se traduce en una precisión interna óptima. Para el caso de la constelación GLONASS, en la cual se alcanzaron repetitvidades de 5,59 mm (E), 3,84 mm (N) y 9,69 (U) mm; se evidencia que para una de las componentes (E) el RMS alcanzado supera el límite establecido, lo que indica que la repetitvidad de datos con esta constelación arroja menores precisiones.

- Las 46 estaciones de monitoreo continuo, bajo custodia, control y mantenimiento del Instituto Geográfico Militar - IGM, están en capacidad de receptor datos GNSS de las constelaciones mencionadas en este artículo, las 24 horas del día, los 365 días del año. Estos datos son procesados en el Centro de Procesamiento de Datos GNSS del Ecuador - CEPGE, únicamente mediante el software científico Bernese, con la constelación GPS y se reportan semanalmente las soluciones libres, este aporte permitirá que el IGM realice el procesamiento de la información generada con una metodología diferente a la habitual, lo que permitiría comparar los resultados obtenidos, cumpliendo la característica intrínseca de la Geodesia, que se basa en el análisis, comprobación y certificación de resultados obtenidos; mediante los diferentes procesos detallados en este artículo, de la misma manera; resulta trascendental el manejo y confrontación de numerosas pericias y paquetes de software de procesamiento, a fin de determinar el camino más idóneo para la presentación de conclusiones y soluciones, que contribuyan al posicionamiento del CEPGE como un centro de investigación científica a nivel de todo el continente.

científico GAMIT/GLOBK en líneas mayores a 100 km. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Kaniuth, K., & Völksen, C. (2003). Comparison of the BERNESE and GIPSY/OASIS II Software Systems (Geodätisch).

León, F. (2021). RED GNSS DE MONITOREO CONTINUO DEL ECUADOR – REGME. http://www.geoportaligm.gob.ec/wordpress/?page_id=283

Pilapanta, Christian. (2013). Estudio metodológico de la dinámica espacial de la estación de monitoreo continuo Riobamba (RIOP) y su influencia en la determinación del modelo de velocidades del Ecuador. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

BIBLIOGRAFÍA

Alves, H. (2009). Avaliação de modelos Estocásticos no posição gnss.

Andrade, S. (2012). Cálculo de coordenadas de alta precisión mediante el uso de software



Evolución del Pasaporte Ecuatoriano: De la Historia a la Modernización

Evolution of the Ecuadorian Passport: From History to Modernization

Miguel A. Zumárraga
miguel.zumarraga@geograficomilitar.gob.ec

RESUMEN

El presente artículo científico aborda la evolución del pasaporte ecuatoriano desde sus inicios, la reciente implementación del pasaporte biométrico en el año 2020 y las futuras adaptaciones y mejoras. Se examina cómo el documento de viaje ha evolucionado en términos de tecnología, seguridad y funcionalidad, así como su relevancia en el contexto internacional. Además, se analizan los beneficios del pasaporte biométrico y su impacto en la movilidad de los ciudadanos ecuatorianos.

Palabras claves: pasaporte, seguridad, innovación.

ABSTRACT

The present scientific article addresses the evolution of the Ecuadorian passport from its inception, the recent implementation of the biometric passport in 2020, and future adaptations and improvements. It examines how the travel document has evolved in terms of technology, security, and functionality, as well as its relevance in the international context.

Furthermore, it analyzes the benefits of the biometric passport and its impact on the mobility of Ecuadorian citizens.

Keywords: passport, security, innovation.

INTRODUCCIÓN

El pasaporte es un documento esencial que permite la identificación y el desplazamiento de los ciudadanos en el ámbito internacional. En el caso de Ecuador, su pasaporte ha experimentado una notable evolución a lo largo del tiempo, desde sus primeras versiones hasta la reciente implementación del pasaporte biométrico en el año 2020. Esta evolución ha estado impulsada por la necesidad de mejorar la seguridad, la eficiencia y la confiabilidad del documento de viaje, así como por los avances tecnológicos y las exigencias internacionales en materia migratoria (Dirección General del Registro Civil, Identificación y Cedulación, 2020).

Historia del Pasaporte Ecuatoriano

El pasaporte ecuatoriano tiene sus raíces en los documentos de identidad expedidos por las autoridades del país, que permitían el viaje a otros países, especialmente durante conflictos como la Primera Guerra Mundial. Sin embargo, fue a partir de la década de 1920 cuando se establecieron requisitos más formales para cruzar las fronteras, lo que llevó a la adopción de un sistema internacional de pasaportes con características estandarizadas (Cancillería del Ecuador, 2021).

En las últimas décadas, el Instituto Geográfico Militar (IGM) ha asumido la responsabilidad de la producción e impresión de pasaportes, desempeñando un papel crucial en la emisión de estos documentos de identificación a nivel nacional. Con una larga historia de experiencia en producción cartográfica, análisis geográfico, difusión de las ciencias geoespaciales y seguridad nacional, el Instituto ha aplicado su experiencia técnica y su infraestructura física y tecnológica para garantizar la calidad y la seguridad de los pasaportes emitidos, cumpliendo con los estándares internacionales establecidos por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI-ICAO), adaptándose a las demandas cambiantes de la era digital. Esta transición ha fortalecido aún más la confianza en la autenticidad y la integridad de los pasaportes emitidos por el país, consolidando la reputación del Instituto como un pilar fundamental en la elaboración de documentos de viaje de identificación, que sean seguros y confiables.



Figura 1.- Control de calidad en los Talleres del IGM.

Evolución Tecnológica

A lo largo del siglo XX, el pasaporte ecuatoriano experimentó varias mejoras en términos de seguridad y funcionalidad; se introdujeron medidas como la inclusión de fotografía del titular, papel de seguridad y perforaciones secas para evitar la falsificación (Cancillería del Ecuador, 2021). En 2003, Ecuador implementó su primer pasaporte de lectura mecánica, lo que permitió agilizar los controles

migratorios y mejorar la gestión de datos a nivel nacional e internacional (Cancillería del Ecuador, 2021).



Figura 2.- Contraportada pasaporte ordinario mecánico década del 2000.

Implementación del Pasaporte Biométrico

En septiembre de 2020, Ecuador dio un paso significativo en la modernización de su pasaporte con la introducción del pasaporte biométrico. Este documento electrónico incorpora un chip integrado que almacena información biométrica del titular, como fotografías faciales y huellas dactilares, garantizando así una mayor seguridad y verificación de identidad (Dirección General del Registro Civil, Identificación y Cedulación, 2020). La implementación del pasaporte biométrico también ha sido un requisito para la exención de la visa Schengen para los ciudadanos ecuatorianos, lo que ha impulsado el intercambio comercial y la movilidad humana entre Ecuador y la Unión Europea (Ruiz, 2021).



Figura 3.- Pasaporte ordinario electrónico.

Beneficios y Perspectivas Futuras

El pasaporte biométrico ofrece una serie de ventajas para los ciudadanos ecuatorianos, como tiempos de emisión más rápidos, mayor seguridad y una validez

extendida de 10 años. Además, facilita la movilidad internacional y fortalece la posición de Ecuador en el ámbito diplomático y migratorio. Se espera que en el futuro, el pasaporte biométrico continúe siendo una herramienta fundamental para la identificación y el desplazamiento de los ciudadanos ecuatorianos en el contexto global (Dirección General del Registro Civil, Identificación y Cedulación, 2020).



Figura 4.- Pasaporte ordinario electrónico.

El Nuevo Diseño del Pasaporte Ecuatoriano

Desde octubre de 2022, el proceso de rediseño del pasaporte ecuatoriano ha sido un viaje lleno de desafíos y creatividad. Iniciado por el Ministerio de Relaciones Exteriores y Movilidad Humana (MREMH), este proyecto ha pasado por varias etapas que culminan en la creación de un documento de identidad que no solo cumple con los estándares internacionales de seguridad recomendados por la OACI-ICAO, sino que también celebra la rica herencia cultural y natural de Ecuador.

La propuesta inicial, presentada en mayo de 2023, marcó el comienzo de un intenso trabajo colaborativo entre entidades gubernamentales, IGM y MREMH. Las reuniones técnicas, continuaron llevándose a cabo hasta noviembre de 2023, mismas que fueron cruciales para afinar los detalles del nuevo diseño y asegurar que cumpla con los más altos estándares de calidad.

Uno de los aspectos más destacados de este proceso ha sido la elección del tema central para el pasaporte: "Magia y Encantos del Ecuador". Esta selección no solo refleja la belleza única del país, sino que también promueve el turismo y la identidad nacional. Para capturar esta esencia, el Instituto Geográfico Militar gestionó la entrega de fotografías con derechos de autor con el Ministerio de Turismo, las mismas que han sido

usadas para la creación del nuevo diseño del pasaporte. Este recurso no solo garantizó la autenticidad de las imágenes, sino que también contribuyó al desarrollo de un diseño visualmente impactante.

La innovación ha sido una constante a lo largo de este proyecto al igual que en las propuestas anteriores, especialmente en lo que respecta a las medidas de seguridad implementadas en el nuevo diseño del pasaporte. Una de las características más innovadoras es la introducción de la hoja de datos de policarbonato.

La hoja de datos de policarbonato representa un avance significativo en la seguridad de los documentos de identidad; este material resistente y duradero es capaz de soportar condiciones extremas, lo que garantiza la integridad de los datos de los usuarios del pasaporte a lo largo del tiempo. El policarbonato ofrece una superficie lisa y uniforme que facilita la impresión de elementos de seguridad, incorporación de ventanas con imágenes fantasma e incorporación de holografía.



Figura 5.- Prototipo de libretín con hoja para datos en policarbonato (ventana, táctil y tira holográfica).

La inclusión de una imagen fantasma y holografía en la hoja de datos de policarbonato es una medida adicional para prevenir la falsificación. Estos elementos ópticos variables son difíciles de replicar y proporcionan una capa adicional de seguridad que puede ser verificada fácilmente por los funcionarios de control utilizando técnicas especializadas.

Otra característica notable de la hoja de datos de policarbonato es su capacidad para albergar un chip de alta tecnología. En el caso del nuevo pasaporte ecuatoriano, este chip contiene información biométrica del titular, como fotografías y datos de

identificación. La inclusión de este chip no solo mejora la seguridad del pasaporte, sino que también facilita los procesos de verificación y autenticación en los puntos de control fronterizo.

El nuevo pasaporte ecuatoriano estará acorde a las últimas recomendaciones de la OACI y acorde las nuevas tendencias tecnológicas, proporcionando una seguridad y autenticidad sin precedentes. Otra innovación es el uso de la técnica de impresión UV reflectancia de color, que simula de manera realista la apariencia del documento, generando una ilusión a la luz natural de una fotografía de día y con el uso de luz ultravioleta la noche. Esta técnica no solo mejora la estética del pasaporte, sino que también fortalece su resistencia a la falsificación.

Además, se ha incorporado un papel completamente nuevo con marcas de agua avanzadas que incluyen entre 2 a 4 efigies (imagen o representación de una persona), añadiendo capas adicionales de seguridad y dificultando aún más la reproducción no autorizada. Las fibrillas invisibles, perceptibles solo bajo luz UV y el incorporar figuras geométricas microscópicas en la filigrana del papel, ofrecen una autenticación adicional, que solo puede ser verificada por equipos especializados, elevando al tercer nivel forense el diseño e impresión del pasaporte ecuatoriano.

Otro avance notable será la utilización de percalina Pan de

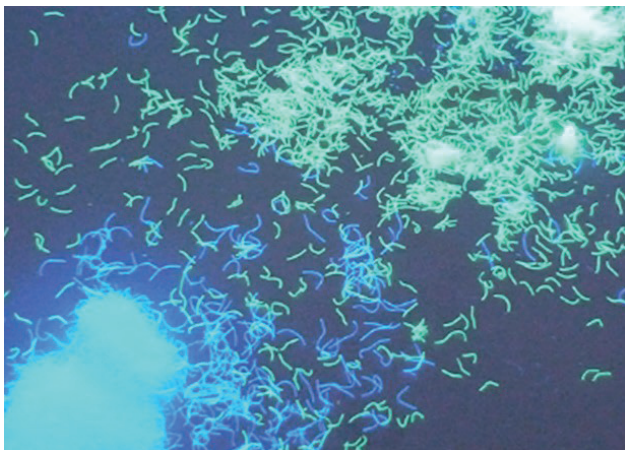


Figura 6.- Fibrillas visibles a la luz UV.

oro plateado, con seguridad UV bicromática registrada, que no solo brinda una apariencia distintiva, sino que también actúa como un marcador de autenticidad ante la exposición a diferentes fuentes de luz. Además, se ha modificado el hilo, al cambiar su seguridad al ser expuesto a la luz UV para incluir una trenza de tres hebras en amarillo, azul y rojo, con un color blanco visible que se adapta a las tendencias actuales de diseño.

Estas mejoras combinadas, hacen del pasaporte un documento más seguro y sofisticado, protegiendo la identidad y la integridad de los viajeros en un mundo cada vez más conectado.

CONCLUSIONES

- La evolución del pasaporte ecuatoriano refleja los avances tecnológicos y las exigencias internacionales en materia de seguridad y migración. La implementación del pasaporte biométrico representa un hito importante en la modernización del documento de viaje y ofrece numerosos beneficios para los ciudadanos ecuatorianos.
- Este artículo proporciona una visión general de la historia y la evolución del pasaporte ecuatoriano, así como un análisis de su importancia en el contexto actual de la movilidad humana y las relaciones internacionales.
- La introducción de la hoja de datos de policarbonato representa un hito importante en el proceso de rediseño del pasaporte ecuatoriano. Esta innovación no solo mejora la seguridad del documento, sino que también garantiza su durabilidad y facilita los procesos de verificación. Con estas medidas, Ecuador demuestra su compromiso con la protección de la identidad de sus ciudadanos y el fortalecimiento de la seguridad en sus fronteras.
- La Evolución del Pasaporte Ecuatoriano, descrito en este documento, no solo presenta avances tecnológicos y mejoras en seguridad, sino también una inversión económica significativa por parte del IGM a lo largo del tiempo. Esta inversión no solo se refleja en la implementación de tecnologías de vanguardia, sino también en procesos de capacitación del personal y la adquisición de maquinaria especializada y software de seguridad únicos en la región. Esta inversión económica demuestra el compromiso social del IGM con el país, por medio de la generación de documentos que brindan protección de la identidad de los ciudadanos y al mismo tiempo permiten el fortalecimiento de la seguridad en nuestras fronteras; demostrando constantemente la capacidad del IGM para adaptarse a los desafíos cambiantes en materia de movilidad humana y relaciones internacionales.

BIBLIOGRAFÍA

Cancillería del Ecuador, (Dirección). (2021). Historia del pasaporte ecuatoriano [Película]. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=ynEJ63CqWMM>

Dirección General del Registro Civil, Identificación y Cedulación. (2020). Dirección General del Registro Civil, Identificación y Cedulación. Obtenido de Presentación del proyecto Pasaporte Biométrico: <https://www.registrocivil.gob.ec/presentacion-del-proyecto-pasaporte-biometrico/>

Ruiz, E. J. (07 de 05 de 2021). Pasaporte biométrico de Ecuador: beneficios y cómo funciona. Obtenido de Visado Europeo: <https://www.visadoeuropeo.com/noticias/ecuador-pasaporte-iometrico#:~:text=Ecuador%20introdujo%20el%20pasaporte%20biom%C3%A9trico,una%20visa%20Schengen%20para%20Europa>





www.geograficomilitar.gob.ec
www.geoportalmigm.gob.ec



QUITO: Seniergues E4-676 y Gral. Telmo Paz y Miño. Sector El Dorado / GUAYAQUIL: Av. Guillermo Pareja #402
Ciudadela la Garzota / ESTACIÓN COTOPAXI: Panamericana Sur Km. 65, Páramo de Romerillos
entrada Parque Nacional de Recreación Cotopaxi

Teléfono: QUITO: 593-2 3975100 al 130 / GUAYAQUIL: 593-4 2627597 - 2627829 / COTOPAXI: 593-3 3700271