



UNIVERSIDAD REGIONAL AMAZÓNICA IKIAM

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y AGUA

CARRERA EN GEOCIENCIAS

Proyecto de investigación previo a la obtención del título de Ingeniero en Geociencias

**SELECCIÓN DEL SITIO PARA LA INSTALACIÓN DE UN RELLENO SANITARIO EN LA AMAZONÍA
ECUATORIANA UTILIZANDO SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y ANÁLISIS
MULTICRITERIO**

Autor: Raul Alejandro Quinteros Cevallos

Tutor: Bruno Pirilo Conicelli

Tena, Diciembre del 2021



UNIVERSIDAD REGIONAL AMAZÓNICA IKIAM

Facultad de Ciencias de la Tierra y Agua

Carrera de Ingeniería en Geociencias

Selección del sitio para la instalación de un relleno sanitario en la Amazonía Ecuatoriana utilizando sistemas de información geográfica y análisis multicriterio

Raul Alejandro Quinteros Cevallos

14 de septiembre de 2021, ciudad de Tena, Napo, Ecuador.

Declaración de derecho de autor, autenticidad y responsabilidad

Tena, 20 de septiembre de 2021

Yo, Raul Alejandro Quinteros Cevallos con documento de identidad N°0606259257, declaro que los resultados obtenidos en la investigación que presento en este documento final, previo a la obtención del título de Ingeniero en Geociencias son absolutamente inéditos, originales, auténticos y personales.

En virtud de lo cual, el contenido, criterios, opiniones, resultados, análisis, interpretaciones, conclusiones, recomendaciones y todos los demás aspectos vertidos en la presente investigación son de mi autoría y de mi absoluta responsabilidad.

Por la favorable atención a la presente, suscribo de usted,

Atentamente,

Firma:



Raul Alejandro Quinteros Cevallos

Certificado de dirección de trabajo de integración curricular

Certifico que el trabajo de integración curricular titulado: “Selección del sitio para la instalación de un relleno sanitario en la Amazonía Ecuatoriana utilizando sistemas de información geográfica y análisis multicriterio”, en la modalidad de: artículo original, fue realizado por: Raul Alejandro Quinteros Cevallos, bajo mi dirección.

El mismo ha sido revisado en su totalidad y analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto, cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad Regional Amazónica Ikiam, para su entrega y defensa.

Tena, 20 de septiembre de 2021

Firma:



Firmado electrónicamente por:

**BRUNO
PIRILO**

.....

Bruno Pirilo Conicelli

C.I: 1759149774

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS	Vii
ÍNDICE DE FIGURAS	Viii
RESUMEN.....	Ix
ABSTRACT.....	X
SELECCIÓN DEL SITIO PARA LA INSTALACIÓN DE UN RELLENO SANITARIO EN LA AMAZONÍA ECUATORIANA UTILIZANDO SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y ANÁLISIS MULTICRITERIO	1
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MATERIALES Y MÉTODOS	3
2.1. Área de estudio	3
2.2. Análisis multicriterio	4
2.3. Selección de criterios y definición de restricciones	6
2.4 Cálculo del área mínima requerida.....	6
2.5 Determinación de la vulnerabilidad de los acuíferos	7
2.6 Sumatoria lineal ponderada	8
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	9
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	15
REFERENCIAS	16

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Escala de Saaty para comparación de criterios	5
Tabla 2. Índice aleatorio en dependencia del número de criterios	6
Tabla 3. Sumario de criterios, puntuaciones y pesos para la selección del sitio de construcción del relleno sanitario del cantón Tena	10
Tabla 4. Matriz de comparación por pares y cálculo de consistencia lógica de los criterios empleados para la selección del sitio de construcción del relleno sanitario del cantón Tena.....	11

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sitio de estudio. Cantón Tena Provincia de Napo	4
Figura 2. Índice GOD tomado de (Foster, Hirata, et al., 2002)	8
Figura 3. Sumatoria lineal ponderada (AHP). C1 corresponde a la Distancia a poblados, C2 Permeabilidad, C3 Agua superficial, C4 acuíferos, C5 Pendiente, C6 Uso del suelo, C7 Vías de acceso, C8 Inundaciones, C9 Deslizamientos, C10 Fallas, C11 Precipitación, C12 Áreas protegidas, C13 Aeropuertos y C14 Superficie del Terreno	9
Figura 4. A: Localización de los sitios recomendados para la construcción del relleno sanitario. B: Ubicación del mapa A en el territorio del cantón Tena	14
Figura 5. Ortofoto del Sitio recomendado para la albergar el relleno sanitario del cantón Tena.....	15

RESUMEN

Determinar zonas adecuadas para la disposición final de residuos urbanos es una problemática que aqueja a los encargados de la planificación territorial debido a la gran cantidad de información espacial que debe ser considerada. Se ha propuesto una metodología que comprende técnicas de análisis multicriterio y análisis espacial basado en sistemas de información geográfica para determinar de manera general el potencial de la zona de estudio para albergar estas instalaciones. El territorio analizado corresponde al cantón Tena Provincia del Napo. Para este fin, se construyó un modelo geográfico a partir de los criterios de selección: distancia a asentamientos humanos, permeabilidad del suelo, cuerpos de agua superficiales, vulnerabilidad de aguas subterráneas, pendiente, entre otros. Se clasificó la zona en 5 categorías acorde a la capacidad de acogida: muy baja, baja, media, alta, muy alta. Se determinó que apenas un 0.004% del territorio se considera apto para la construcción del relleno sanitario del cantón, donde un 0.001% está catalogado con un potencial medio, un 0.003% como alto y un 99.996% zonas restringidas. Se recomienda el uso de esta herramienta para determinar zonas con potencial sobre las cuales enfocar estudios más rigurosos en campo.

Palabras Clave

Análisis multicriterio, relleno sanitario, sistemas de información geográfica, Amazonía, Aptitud

ABSTRACT

Determining suitable areas for the final disposal of urban waste is a problem that afflicts those in charge of Territorial planning due to the large amount of spatial information that must be considered. A methodology has been proposed that includes multi-criteria analysis techniques and spatial analysis based on geographic information systems to determine in a general way the potential of the study area to host these facilities. The analyzed territory corresponds to the Tena Province of Napo canton. For this purpose, a geographic model was built based on the selection criteria: distance to human settlements, soil permeability, surface water bodies, groundwater vulnerability, slope, among others. The area was classified into 5 categories according to the reception capacity: very low, low, medium, high, very high. It was determined that only 0.004% of the territory is considered suitable for the construction of the canton's sanitary landfill, where 0.001% is classified as having a medium potential, 0.003% as High and 99.996% as restricted areas. The use of this tool is recommended to determine areas with potential on which to focus more rigorous field studies.

Keywords

Multi-criteria analysis, landfill, geographic information systems, Amazon, Aptitude

***Selección del sitio para la instalación de un relleno sanitario en la Amazonía
Ecuatoriana utilizando sistemas de información geográfica y análisis multicriterio***

Introducción

Una de las mayores problemáticas con las que hoy en día la humanidad debe lidiar, es el aumento inconmesurado en la cantidad de residuos sólidos producto de la actividad de las sociedades. Este hecho ha derivado en la necesidad de instaurar infraestructuras para su almacenamiento, evitando cualquier tipo de repercusión socioambiental (Frau & Valenzuela, 2006). Hasta la fecha, la disposición final en vertederos o rellenos sanitarios sigue siendo el método más común para su gestión, por ende, la búsqueda de lugares destinados a este fin se ha convertido en una prioridad para las autoridades en cuestión de ordenamiento territorial (Sener et al., 2006a).

La municipalidad del cantón Tena - Provincia de Napo requiere de la construcción inmediata de un nuevo relleno sanitario, enfrentándose al desafío de manejar una extensa cantidad de información territorial para discriminar entre sitios que cumplan con las condiciones ambientales, sociales y económicas óptimas para albergar un relleno sanitario. Se han propuesto algunas alternativas para la construcción del nuevo relleno basadas en observaciones en campo, sin embargo, la fuerte oposición por parte de la ciudadanía no ha permitido dar paso a la ejecución de la obra. Se ha tomado entonces la decisión de implementarlo en las inmediaciones del actual relleno sanitario (GAD Municipal de Tena, 2020).

Existe numerosa evidencia bibliográfica (Behzadian, 2008; Frau & Valenzuela, 2006; Montañó et al., 2012; Sener et al., 2006b) que muestra como esta limitante espacial puede ser sobrellevada mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), permitiendo manejar y gestionar información de vastas extensiones de terreno, mismos que integrados con métodos de análisis como las Técnicas de Evaluación Multicriterio, otorgan una visión general del potencial que el territorio ofrece para albergar las instalaciones del relleno

sanitario (Sener et al., 2006a). No obstante, se debe contar con criterios adecuados para la selección del sitio, especialmente en la región amazónica, donde las precipitaciones son altas y el nivel freático es elevado (Miguez-Macho & Fan, 2012), parámetros que, de no ser tomados en cuenta, pueden repercutir en eventos de contaminación como los actualmente observados en la localidad (Guanga, 2016).

El delicado equilibrio ecosistémico en la Amazonía vuelve aún más difícil esta tarea, sobre todo considerando la densa concentración de ríos existente. Pese a que, en la cuenca alta del Amazonas, los ríos reciben la menor cantidad de contaminantes debido a la baja densidad poblacional observada, actividades antrópicas como la agricultura, minería y rellenos sanitarios deficientes ponen bajo presión estos recursos (Capparelli et al., 2020). Específicamente asociados a los llenos sanitarios, se ha reportado un incremento de entre 100 y 1000 veces en la concentración de metales pesados, un incremento en la demanda química de oxígeno, turbiedad, sólidos totales disueltos, conductividad eléctrica, nitratos y fosfatos en los canales en los que descargan sus lixiviados, los cuales es bien conocido que causan degradación en los ecosistemas acuáticos, evidenciando la fragilidad de los sistemas de manejo de residuos sólidos en el área. (Galarza et al., 2021).

De esta manera, resulta evidente la necesidad de proponer alternativas para la localización y selección de áreas con potencial para albergar un relleno sanitario que considere tanto factores sociales como económicos y procurando generar el menor impacto ambiental posible. Para ello se ha elaborado una metodología adaptada a la realidad de la Amazonía basada en el uso de sistemas de información geográfica y apoyada en técnicas de análisis multicriterio.

Materiales y métodos

Área de estudio

El Código Orgánico del Ambiente establece que la responsabilidad de la gestión integral de residuos sólidos recae sobre los GADs Municipales (Código Orgánico Ambiental, 2017), implicando que la recolección de los residuos provenientes de las parroquias Pano, Talag, Ahuano, Misahuallí, Puerto Napo y Muyuna corresponde directamente a la municipalidad del cantón Tena (de la Torre, 2013). Por lo tanto, este análisis fue aplicado a todo el territorio del cantón Tena provincia del Napo (ver figura 1). La zona de estudio corresponde a un área de 3897.41 km² y una población de aproximadamente 85893 habitantes, con una densidad poblacional de 22 habitantes/ km² (GADM Tena, 2019). Se ubica directamente en el pie de monte de la Amazonía ecuatoriana al Sur de la Provincia de Napo, sobre las vertientes externas de la Cordillera de los Andes. Presenta un rango altitudinal que varía entre los 4840 msnm y los 260 msnm (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Tena [GADMT], 2014). Fisiográficamente predominan tres dominios, una zona Subandina caracterizada por la presencia de rocas calcáreas, depósitos de ceniza volcánica y zonas elevadas, constituidas por rocas arcillosas y arenosas. La Amazonía Periandina, formada en su mayoría por conos de deyección constituidos por gravas y bloques inmersos en una matriz de arcillas y areniscas. Finalmente, un Medio Aluvial Amazónico, compuesto generalmente por arenas, limos, arcillas y conglomerados en diferentes proporciones (Val et al., 2015).

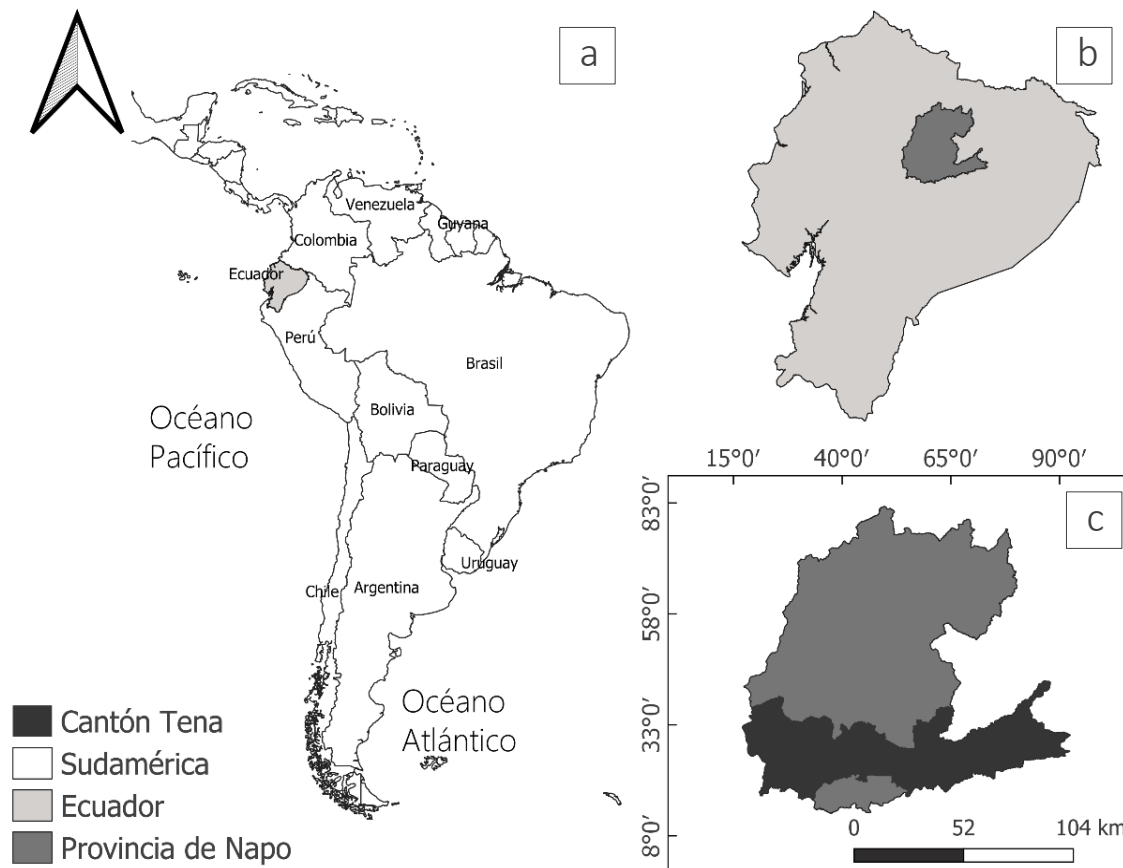


Figura 1. Sitio de estudio. Cantón Tena Provincia de Napo. |a: Localización de Ecuador respecto a Sudamérica. b: Localización de la provincia del Napo respecto al Ecuador. c: Localización del cantón Tena respecto a la provincia de Napo.

Análisis Multicriterio

Para la selección del sitio óptimo para la construcción del relleno sanitario basada en múltiples criterios se aplicó el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) apoyado en Sistemas de información Geográfica (SIG). Este consiste en la selección y comparación de diferentes criterios, asignando valores numéricos a variables tanto cuantitativas como cualitativas, posteriormente priorizando entre alternativas mediante una estructura jerárquica (Golden et al., 1989) .

El primer paso consiste en escoger los criterios de selección C_i y compararlos entre si mediante el uso de la matriz de comparación por pares A (ver ecuación 1).

$$A = \begin{matrix} & C_1 & \dots & C_n \\ C_1 & a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_n & a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{matrix} \quad (1)$$

Donde a es la importancia de cada criterio respecto al par con el cual se compara, cuyos valores vienen dados por la escala expuesta a continuación (ver tabla 1).

Tabla 1. Escala de Saaty para comparación de criterios.

Escala Numérica	Escala Verbal
1	Igualmente Preferido
3	Moderadamente preferido
5	Fuertemente preferido
7	Muy fuertemente preferido
9	Extremadamente preferido
2,4,6,8	Valores intermedios

El peso de cada criterio se obtuvo mediante la normalización de cada una de las columnas de la matriz A según se muestra en la ecuación 2.

$$w_i = a_{ij} / \left(\sum_{k=1}^n a_{kj} \right) \text{ para todo } i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

La consistencia global de comparaciones se determinó mediante el cálculo de la proporción de consistencia lógica **R.C.** (ver ecuación 3) propuesta por (Saaty, 2004) el cual determina la probabilidad de que la decisión sea tomada de forma aleatoria. Donde **R.I.** es un índice de aleatoriedad que depende del tamaño de la matriz (ver tabla 2) y **C.I.** corresponde al índice de consistencia lógica (ver ecuación 4). Este cálculo se basa en la determinación del máximo valor propio de la matriz de comparaciones λ_{Max} (ver ecuación 5) y el número de criterios n .

$$R.C. = \frac{C.I.}{R.I.} \quad (3)$$

$$C.I. = \frac{\lambda_{Max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

$$\lambda_{Max} = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} * w_j}{w_i} \quad (5)$$

Tabla 2. Índice aleatorio en dependencia del número de criterios.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0.0	0.0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

Selección de Criterios y definición de Restricciones

Se consideró 14 criterios de selección tomados de la guía para el diseño y operación de rellenos sanitarios en climas tropicales (Munawar & Fellner, 2013). La información geográfica de todos ellos a excepción de la superficie necesaria para la construcción del relleno sanitario y la vulnerabilidad de los acuíferos, fue tomada de la cartografía nacional y repositorios de libre acceso, como se detalla en la tabla 3. Las restricciones para la construcción del relleno sanitario se consideraron con base en la bibliografía existente, siendo valoradas con 0 las áreas no aptas para su construcción.

Cálculo del área mínima requerida

Para calcular el área mínima necesaria para albergar el relleno sanitario de la ciudad, metodología descrita por (Zamora, 2012), ver ecuaciones 6, 7, 8, 9, 10 y 11.

$$CRS = P * ppc * c * 365 \quad (6)$$

$$VR = \frac{CRS}{Ds} \quad (7)$$

$$VMC = 0.2 * VRS \quad (8)$$

$$VRS = VMC + VRE \quad (9)$$

$$AR = (VRS/H) \quad (10)$$

$$AT = AR + F \quad (11)$$

Donde **CRS** es la cantidad de residuos sólidos depositados anualmente en el relleno sanitario, **P** el número de habitantes, **ppc** la cantidad de residuos generada por habitante cada día y **c** el porcentaje de cobertura del servicio de recolección. **VR** equivale al volumen de residuos sólidos y **Ds** a la densidad de los mismos. **VMC** es igual al volumen del material de cobertura diario y **VRS** al volumen del total empleado por el relleno sanitario. **AR** equivale al área ocupada por los residuos más el material de cobertura y **H** a la altura del relleno sanitario. Para estimar el área total **AT** se debe añadir un factor de área adicional **F** al cálculo equivalente al 30% de **AR**.

Las proyecciones poblacionales correspondientes al tiempo de vida del proyecto, fueron calculadas mediante el método geométrico descrito en (Zamora, 2012). Este supone que la población final **Pf** (ver ecuación 12) puede ser estimada a partir de una población inicial **Po** creciente a una tasa constante **r** (ver ecuación 13) durante un periodo de tiempo **t**.

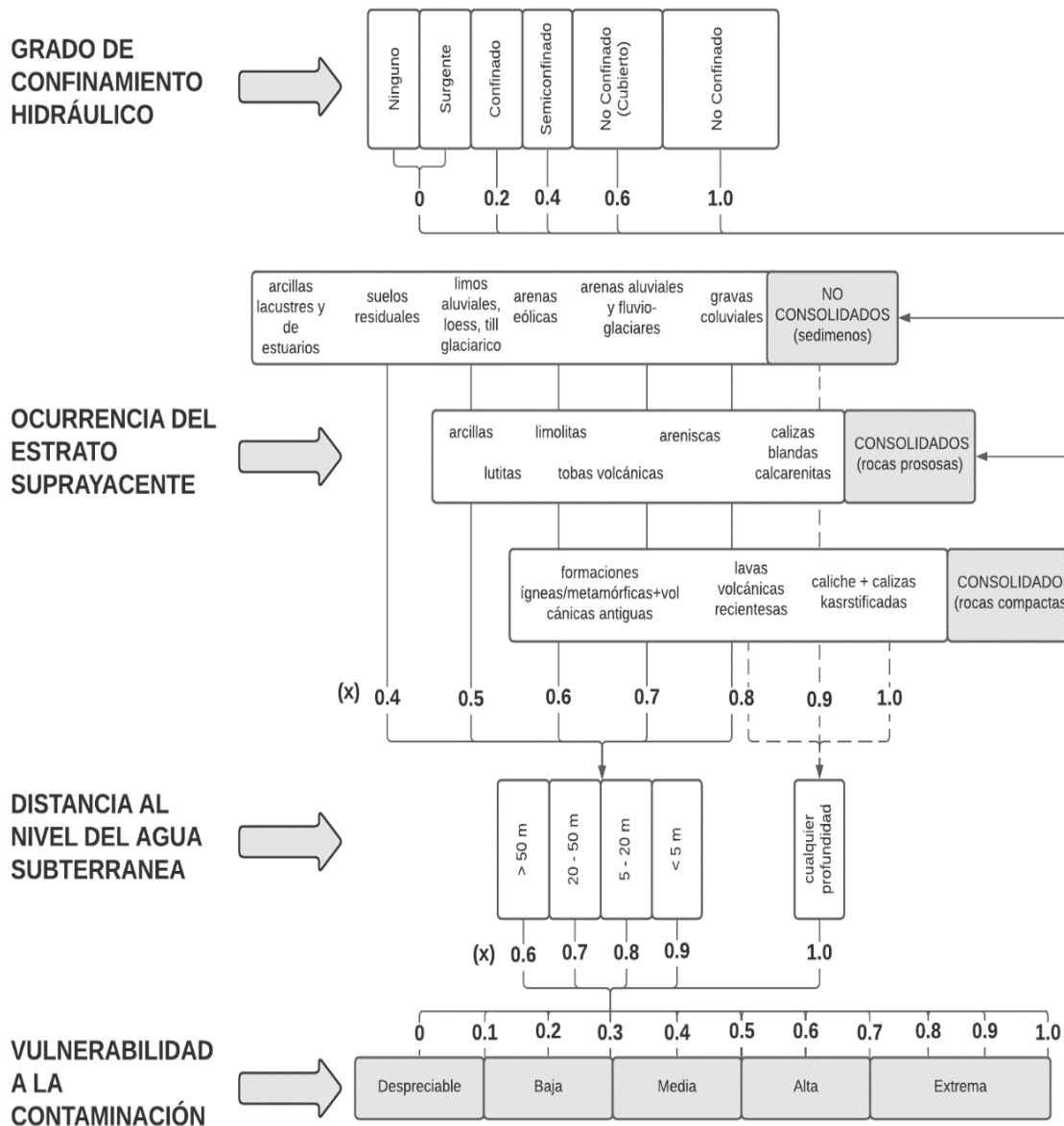
$$Pf = Po (1 + r)^t \quad (12)$$

$$r = (Pf / Po)^{1/t} - 1 \quad (13)$$

Determinación de la vulnerabilidad de los acuíferos

Para determinar el grado de vulnerabilidad del agua subterránea, se aplicó el índice GOD (Foster, Ricardo, et al., 2002), el cual emplea los criterios hidrogeológicos descritos en la Figura 2. Donde la ocurrencia del estrato suprayacente fue obtenida del mapa hidrogeológico del Ecuador. Por otro lado, como se indica en (Miguez-Macho & Fan, 2012) y (Buckalew et al., 1998), alrededor de un 60% de la región amazónica presenta acuíferos libres, con zonas bajas donde el nivel freático se encuentra alrededor de los 2 m de profundidad y mayor a 5 m en zonas altas. Con el propósito de realizar un análisis más

conservador, se consideró una profundidad menor a 5 m y acuíferos no confinados en todo



el territorio.

Figura 2. Índice GOD tomado de (Foster, Hirata, et al., 2002)

Sumatoria Lineal Ponderada

Para finalmente determinar la capacidad el terreno para albergar el relleno sanitario se aplicó una sumatoria lineal ponderada generada en SIG. Para este fin, la información geográfica fue reclasificada acorde a las puntuaciones de cada criterio de selección (ver

tabla 3) y multiplicada por los pesos obtenidos del AHP (ver tabla 4), se usó además como máscara de corte las áreas aptas obtenidas al eliminar del cálculo las zonas de restricción valoradas con 0 (ver figura 3).

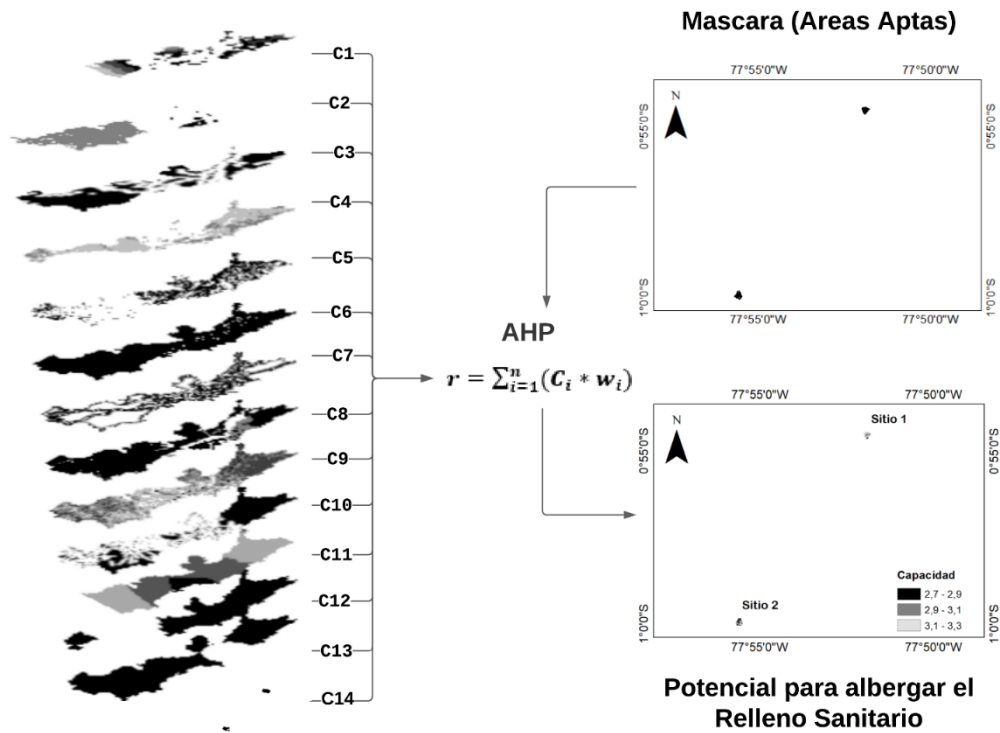


Figura 3. Sumatoria lineal ponderada (AHP). C1 corresponde a la Distancia a poblados, C2 Permeabilidad, C3 Agua superficial, C4 acuíferos, C5 Pendiente, C6 Uso del suelo, C7 Vías de acceso, C8 Inundaciones, C9 Deslizamientos, C10 Fallas, C11 Precipitación, C12 Áreas protegidas, C13 Aeropuertos y C14 Superficie del Terreno.

Resultados y Discusión

En la tabla 3 se detalla los criterios empleados puntuados de 1 a 5, donde 1 hace referencia a una aptitud muy baja, 2 a una aptitud baja, 3 a una aptitud Media, 4 a una aptitud alta y 5 a una aptitud muy alta. Por otro lado, 0 corresponde a zonas donde no se puede construir un relleno sanitario.

Tabla 3. Sumario de criterios, puntuaciones y pesos para la selección del sitio de construcción del relleno sanitario del cantón Tena.

Criterio	Fuente	Escala/Resolución	Puntuación	
C1	Distancia a Asentamientos Humanos (Montaño et al., 2012)	Mapa de cobertura y uso del suelo	<2000 m	0
			2000 – 5000 m	5
			5000 – 10000 m	4
			10000 – 15000 m	3
			5000 – 10000 m	2
C2	Permeabilidad del Suelo (Munawar & Fellner, 2013)	Mapa Hidrogeológico	>20000 m	1
			>10 ⁻⁴ m/s	0
			10 ⁻⁴ – 10 ⁻⁶ m/s	1
			10 ⁻⁶ – 10 ⁻⁸ m/s	3
			<10 ⁻⁸ m/s	5
C3	Cuerpos de Agua Superficiales (Munawar & Fellner, 2013)	Mapa de cobertura y uso del suelo	<500 m	0
			500 – 1000 m	1
			1000 – 1500 m	2
			1500 – 2000 m	3
			2000 – 2500 m	4
C4	Vulnerabilidad de Acuíferos (Munawar & Fellner, 2013)	Elaboración propia	>2500 m	5
			Extrema	1
			Alta	2
			Media	3
			Baja	4
C5	Pendiente (Damasceno Pavani et al., 2019)	SRTM Digital elevation data 30m	Despreciable	5
			>30 %	0
			30 – 20 %	1
			20 – 10 %	3
			>10 %	5
C6	Uso del Suelo (MAE; TULSMA, 2015)	Mapa de cobertura y uso del suelo	Zonas Agrícolas o bienes culturales	0
			Otros	5
			<120 m	0
			120 – 500 m	5
			500 – 1000 m	4
C7	Distancia a vías de acceso (Ardeshir et al., 2014)	Open Street Maps	1000 – 1500 m	3
			1500 – 2000 m	2
			>2000 m	1
			Alta	0
			Media	1
C8	Susceptibilidad a Inundaciones (Munawar & Fellner, 2013)	Zonas susceptibles a inundaciones	Baja	3
			Sin Susceptibilidad	5
			Alta	0
			Media	1
			Baja	3
C9	Zonas susceptibles a deslizamientos (MAE; TULSMA, 2015)	Zonas susceptibles a movimientos en masa	Sin Susceptibilidad	5
			Alta	0
			Media	1
			Baja	3
			Sin Susceptibilidad	5
C10	Distancia a fallas Geológicas (Lagos, 2016)	Cartas Geológicas (Secretaría Nacional de Planificación, 2005)	<60 m	0
			60 – 500 m	1
			500 – 1000 m	2
			1000 – 1500 m	3
			1500 – 2000 m	4
C11	Precipitación (Ardeshir et al., 2014)	Isoyetas medias anuales de la serie histórica 1981 – 2010	>2000 m	5
			< 1000 mm/año	5
			1000 – 2000 mm/año	4
			2000 – 3000 mm/año	3
			3000 – 4000 mm/año	2

				>4000 mm/año	1
C12	Áreas Protegidas (Codigo Organico Ambiental, 2017)	Mapa de Áreas Protegidas	1:25000	Áreas Protegidas	0
				Otros	5
C13	Distancia a aeropuertos (Lagos, 2016)	Open Street Maps	1:27000	<13000 m	0
				>13000 m	5
C14	Superficie del Terreno (Zamora, 2012)	Elaboración Propia	1:25000	<9.1 ha	0
				>9.1 ha	5

La tabla 4 corresponde a la matriz de comparación por pares a partir de la cual se derivan los pesos correspondientes a cada criterio, se muestra además el máximo valor propio de la matriz λ_{Max} , el índice de consistencia lógica C.I y la proporción de consistencia lógica R.C, misma que debe ser menor a 0.1 para demostrar que los datos empleados en la matriz de comparaciones no han sido tomados de manera arbitraria, como se indica en (Golden et al., 1989).

Tabla 4. Matriz de comparación por pares y cálculo de consistencia lógica de los criterios empleados para la selección del sitio de construcción del relleno sanitario del cantón Tena.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	W
C1	1	2	3	3	4	4	4	5	6	6	7	8	8	9	0,21
C2	1/2	1	2	2	3	3	3	4	5	5	7	8	8	9	0,16
C3	1/3	1/2	1	2	3	3	3	4	4	4	5	6	6	8	0,13
C4	1/3	1/2	1/2	1	2	3	3	4	4	5	5	6	6	7	0,11
C5	1/4	1/3	1/3	1/2	1	2	2	3	3	3	4	5	5	6	0,08
C6	1/4	1/3	1/3	1/3	1/2	1	1	2	2	3	4	5	5	6	0,06
C7	1/4	1/3	1/3	1/3	1/2	1	1	2	2	3	4	4	5	6	0,06
C8	1/4	1/4	1/4	1/4	1/3	1/2	1/2	1	2	2	3	4	4	4	0,05
C9	1/5	1/5	1/4	1/4	1/3	1/2	1/2	1/2	1	1	2	3	3	4	0,04
C10	1/6	1/5	1/4	1/5	1/3	1/3	1/3	1/2	1	1	2	3	3	4	0,03
C11	1/7	1/7	1/5	1/5	1/4	1/4	1/4	1/3	1/2	1/2	1	2	3	3	0,02
C12	1/7	1/8	1/6	1/6	1/5	1/5	1/4	1/4	1/3	1/3	1/2	1	2	3	0,02
C13	1/8	1/8	1/6	1/6	1/5	1/5	1/5	1/4	1/3	1/3	1/3	1/2	1	2	0,01
C14	1/9	1/9	1/8	1/7	1/6	1/6	1/6	1/4	1/4	1/4	1/3	1/3	1/2	1	0,01
λ_{Max}															14.860
C.I.															0.066
R.C.															0.042

En la figura 4 se observa los sitios determinados como más apropiados para albergar el relleno sanitario del cantón Tena, el sitio propuesto por la municipalidad y el actual relleno sanitario. Como se esperaría, los sitios determinados por la metodología planteada en este

análisis se encuentran en las cercanías del centro productor de residuos, ocupando parte del territorio de las parroquias Muyuna, Pano y Tena. Se determinó que, del total del territorio apenas un 0.004% corresponde a zonas adecuadas para la construcción del relleno sanitario, de las cuales un 0.001% entran en la categoría de aptitud Media, y un 0.003% de aptitud Alta.

De las dos alternativas obtenidas, el Sitio 1 resultó ser el más apropiado siendo mayoritariamente categorizado como zona de aptitud Alta, y por lo tanto el sugerido para este fin. Este se ubica a aproximadamente 7 km de la cabecera cantonal, el cuerpo de agua más cercano se encuentra a más de 1 km de distancia y cuenta con una vía de acceso cercana. Litológicamente la zona se compone limolita, arenisca, conglomerados y arcillolitas de baja permeabilidad, pertenecientes a la Formación Tiyuyacu (Ávila, 2012). Este sitio tiene un área de 9.6 Ha, equivalentes al 0.002% del territorio, adecuado para un tiempo de vida útil de 15 años. Por otro lado, si bien el Sitio 2 cuenta con las características ambientales necesarias, no cuenta con una vía de acceso adecuada, entrando a una categoría de aptitud Media para albergar el relleno sanitario. Pese a que el Sitio 1 presentó una mayor vulnerabilidad en cuanto a su localización respecto a las aguas subterráneas que el Sitio 2, la sumatoria total lo sitúa por encima de este último en cuanto a su aptitud.

En la figura 4 se observa además la localidad propuesta por la municipalidad del cantón Tena para la construcción del nuevo relleno sanitario (de la Torre, 2013), denominada también como Chimbadero. Si bien esta zona se ubica sobre la formación Tena, litológicamente compuesta por areniscas y arcillolitas con muy baja permeabilidad, el río Pashimbi atraviesa el área propuesta. Por otro lado, este sitio se localiza a menos de 800 metros de una zona catalogada como asentamientos humanos, imposibilitando su construcción en este lugar.

De la Torre 2013 presenta además otras tres alternativas, Kuyaloma, Shinquipino y Shalcana; de estas Kuyaloma y Shinquipino fueron descartados debido a las repercusiones ambientales, técnicas y sociales observadas. Ambos sitios presentan recursos hídricos cercanos y morfologías complejas compuestas por colinas y depresiones. Estas localidades además no cuentan con vías de acceso y se encuentran próximos a asentamientos humanos. Shalcana por otra parte mostro ser el sitio más óptimo en dicho estudio, puesto que, para la fecha, contaba con 35 hectáreas de terreno útil lejos de centros poblados, con muy baja permeabilidad y una menor afección sobre el recurso hídrico. No obstante, como se muestra en el acta de sesión ordinaria de diciembre del 2020, priorizando el factor económico, se ha optado por la construcción del relleno sanitario en el sector Chimbadero, ya que cuenta con vías de acceso y un terreno propio de la municipalidad con extensión suficiente para albergar el proyecto. En esta sesión, se discute además otras tres posibles opciones, Shinquipino 1, Shinquipino 2 y Umbuni, mismas que fueron descartadas por la necesidad de construcción de carreteras y la alta vulnerabilidad de los acuíferos sobre los que se localizan (GAD Municipal de Tena, 2020).

En este contexto, el uso de múltiples criterios permitió abordar de manera más objetiva los problemas que usualmente giran en torno a la gestión integral de residuos sólidos en la Amazonía, por un lado, la protección del entorno natural, y por otro el bienestar comunitario, pues la presión social hasta ahora ha resultado ser el factor más determinante a la hora de construir un nuevo relleno en la localidad. No obstante, con esta metodología se pudo además categorizar el potencial de toda el área con fin de generar el menor daño ambiental posible teniendo en cuenta que la zona propuesta se encuentra a una distancia prudente de los recursos hídricos, pero también el factor económico, pues existen vías de acceso cercanas y no existen amenazas geológicas potenciales que podrían comprometer

el funcionamiento de las instalaciones.

Teniendo en cuenta que la diferencia de escalas entre los datos de entrada del SIG pueden ser una fuente de error considerable, se optó por comparar los resultados del análisis con una ortofoto del área a resolución de 0.3x0.3 m de tamaño de píxel (ver figura 5), donde se corrobora la distancia al río más cercano, centros poblados y vías de acceso. Por otro lado, a esta resolución se puede elementos no tomados en cuenta en el anterior análisis, como una vía secundaria que pasa a aproximadamente 90 m al sur del Sitio 1, misma que resultaría de utilidad para acceder al relleno sanitario. No obstante, también se puede apreciar una zona de uso humano a 1.7 km al Noreste, donde si bien no se aprecian viviendas, debería considerarse un posible conflicto a futuro.

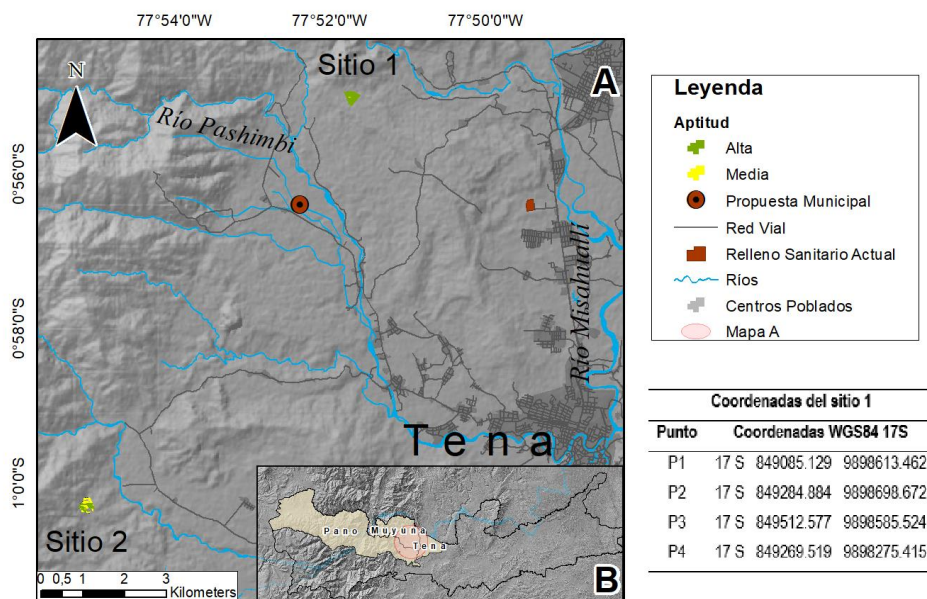


Figura 4. A: Localización de los sitios recomendados para la construcción del relleno sanitario.
B: Ubicación del mapa A en el territorio del cantón Tena

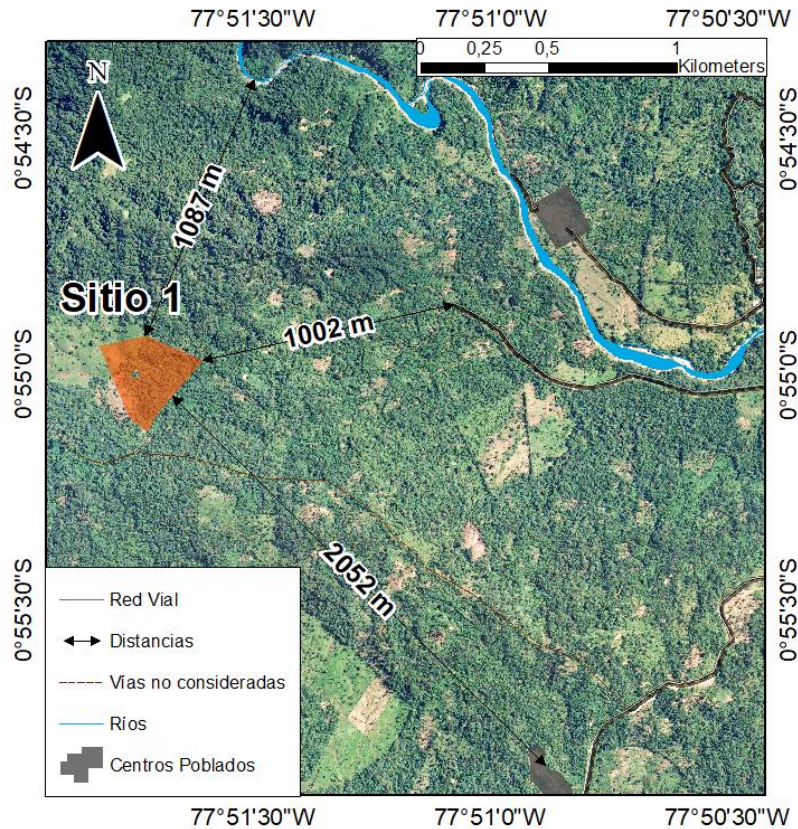


Figura 5. Ortofoto del Sitio recomendado para la albergar el relleno sanitario del cantón Tena

Conclusiones y recomendaciones

El Sitio 1 localizado en la parroquia Pano resultó ser el más adecuado para la construcción del relleno sanitario del cantón Tena, principalmente debido a la baja permeabilidad del estrato, cercanías a las vías de acceso y distancia a los centros poblados. No obstante, la vulnerabilidad extrema de las aguas subterráneas debe ser considerada al momento de ejecutar la obra civil.

Se recomienda el uso de una escala de mínimo 1:25000 para trabajar a nivel de cantón ya que permite un mejor modelado de las características del terreno. Pese a que no se contó con esta resolución para todos los criterios empleados, el contraste del resultado con ortofotos del terreno muestra dar resultados fiables para el fin de este trabajo.

La ubicación propuesta por la municipalidad, si bien se localiza sobre un estrato de muy baja permeabilidad, su cercanía a los recursos hídricos y centros poblados técnicamente

imposibilitarian su construcción en este lugar, por ende, se recomienda a la municipalidad considerar llevar a cabo el estudio en campo del sitio 1 para corroborar su potencial para la construcción del relleno sanitario, siendo estos la descripción de la geología local, caracterización geotécnica, caracterización hidrogeológica, edafológica y el estudio de impacto ambiental correspondiente.

Esta metodología demostró ser adecuada para la toma de decisiones y específicamente para determinar la localización del sitio para la construcción del relleno sanitario en la Amazonía ecuatoriana, pues toma en cuenta cada uno de los problemas existentes en el territorio, abordándolos de forma objetiva para seleccionar el que mejor se adapte a los requerimientos locales.

Referencias

Ardeshir, A., Behzadian, K., & Fatemeh, J. (2014). Landfill Site Selection Using GIS and Analytical Hierarchy Process. *Environmental Research Center, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, July 2010.*

Ávila, M. (2012). *Caracterización de las formaciones Tiyuyacu y Orteguaza en un área de la cuenca oriente para la prevención de riesgos en la perforación.*

Behzadian, K. (2008). *Landfill site selection using gis and analytical hierarchy process.* December.

Buckalew, J., Scott, L., James, M., & Reed, P. (1998). *Evaluacion de los Recursos de Agua del Ecuador REPORT.*

Capparelli, M. V., Moulatlet, G. M., Abessa, D. M. de S., Lucas-Solis, O., Rosero, B., Galarza, E., Tuba, D., Carpintero, N., Ochoa-Herrera, V., & Cipriani-Avila, I. (2020). An integrative approach to identify the impacts of multiple metal contamination sources on the Eastern Andean foothills of the Ecuadorian Amazonia. *Science of the Total*

- Environment*, 709, 136088. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136088>
- Codigo Organico Ambiental. (2017). Codigo Organico Del Ambiente. *Registro Oficial Suplemento 983*, 1–92.
- Damasceno Pavani, I., Ennes Cicerelli, R., de Almeida, T., Zandonadi Moura, L., & Contreras, F. (2019). Allocation of sanitary landfill in consortium: strategy for the Brazilian municipalities in the State of Amazonas. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(1). <https://doi.org/10.1007/s10661-018-7146-9>
- de la Torre, F. (2013). Estudio de Impacto Ambiental del Relleno Sanitario del Cantón Tena. *Wordpress*, 259. <https://maenapo.files.wordpress.com/2015/03/esia-gestion-de-residuos1.pdf>
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D’Elia, M., & Paris, M. (2002). *Proteccion de la Calidad del Agua Subterranea*. www.worldbank.org
- Foster, S., Ricardo, H., Gomes, D., D’Elia, M., & Paris, M. (2002). *Proteccion de la Calidad del Agua Subterranea* (Ediciones).
- Frau, C. M., & Valenzuela, J. G. (2006). *Modelación espacial mediante geomática y evaluación multicriterio para la ordenación territorial*. 14.
- GAD Municipal de Tena. (2020). *Acta de la sesión ordinaria del 24 de noviembre de 2020*.
- GADM Tena. (2019). *Actualización PDOT-PUGS-2020-2023*. 699.
- Galarza, E., Cabrera, M., Espinosa, R., Espitia, E., Moulatlet, G. M., & Capparelli, M. v. (2021). Assessing the Quality of Amazon Aquatic Ecosystems with Multiple Lines of Evidence: The Case of the Northeast Andean Foothills of Ecuador. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, January. <https://doi.org/10.1007/s00128-020-03089-0>
- Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Tena [GADMT]. (2014). *Actualización*

Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial: Diagnóstico. 1–96.

http://www.tena.gob.ec/index.php?option=com_content&view=category&id=14&Itemid=178

Golden, B. L., Wasil, E. A., & Levy, D. E. (1989). Applications of the Analytic Hierarchy Process. In *The Analytic Hierarchy Process*.

Guanga, J. (2016). Diagnóstico ambiental de la calidad de agua del río Chimbadero de la ciudad de Tena mediante el análisis físico, químico y microbiológico, para proponer un plan de manejo ambiental. *Universidad Nacional de Loja*.

Lagos, L. (2016). *Localización del Relleno Sanitario Regional – Piedemonte Amazónico Putumayense - Colombia by UNIGIS América Latina - issuu*. Saizburg.

Localización del Relleno Sanitario Regional – Piedemonte Amazónico Putumayense - Colombia by UNIGIS América Latina - issuu. (n.d.). Retrieved January 24, 2021, from https://issuu.com/unigis_latina/docs/lagos

MAE; TULSMA. (2015). Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente Libro VI, Anexo 6: Norma e Calidad Ambiental para el Manejo y Disposición Final de desechos Sólidos no peligrosos. *Tulsma*, 45.

Miguez-Macho, G., & Fan, Y. (2012). The role of groundwater in the Amazon water cycle: 2. Influence on seasonal soil moisture and evapotranspiration. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 117(15). <https://doi.org/10.1029/2012JD017540>

Montaño, M., Ranieri, V. E. L., Schalch, V., Fontes, A. T., de Castro, M. C. A. A., & de Souza, M. P. (2012). Integração de critérios técnicos, ambientais e sociais em estudos de alternativas locais para implantação de aterro sanitário. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 17(1), 61–70. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522012000100010>

Munawar, E., & Fellner, J. (2013). *Guidelines for design and operation of municipal solid*

waste landfills in tropical climates.

Saaty, T. L. (2004). Decision making the Analytic Hierarchy and Network Processes (AHP/ANP). *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 13(1), 1–35.

<https://doi.org/10.1007/s11518-006-0151-5>

Secretaría Nacional de Planificación. (2005). *Archivos de Información Geográfica. Cartas Geológicas.*

https://sni.gob.ec/documents/10180/3346271/GEOLOGIA_CARTAS.rar/c892a1fa-4547-49b2-85cd-334d93416841

Sener, B., Süzen, M. L., & Doyuran, V. (2006a). Landfill site selection by using geographic information systems. *Environmental Geology*, 49(3), 376–388.

<https://doi.org/10.1007/s00254-005-0075-2>

Sener, B., Süzen, M. L., & Doyuran, V. (2006b). Landfill site selection by using geographic information systems. *Environmental Geology*, 49(3), 376–388.

<https://doi.org/10.1007/s00254-005-0075-2>

Val, J., Andrade, S., & Calle, L. (2015). *Cantón Tena proyecto : “ levantamiento de cartografía temática.*

Zamora, J. (2012). Guía para el Diseño, Construcción, Operación, Mantenimiento y Cierre de Rellenos Sanitarios Dirección General de Gestión Integral de Residuos Sólidos.

Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 1–214. <http://www.anesapa.org/wp-content/uploads/2014/07/Guia-para-el-Diseno-Construccion-Operacion-Mantenimiento-y-Cierre-de-Relleno-Sanitario.pdf>