



Comparación técnica, económica y ambiental entre geomembrana y arcilla para impermeabilizar la capa de cobertura final del relleno sanitario de Tulcán.

Pantoja Torres, Paúl Alexander

Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología

Centro de Posgrado

Maestría en Sistemas de Gestión Ambiental

Trabajo de Titulación, previo a la obtención del título de Magister en Sistemas de

Gestión Ambiental

Ing. Darío Roberto Bolaños Guerrón, Ph.d

7 de febrero de 2022



Tesis Paúl Pantoja para Copyleaks DBG.pdf

Scanned on: 18:39 February 7, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	33
Words with Minor Changes	144
Paraphrased Words	71
Ommited Words	0



creado y desarrollado por
DARIO ROBERTO
BOLANOS GUERRON



VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE
TECNOLOGÍA
CENTRO DE POSGRADOS

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“Comparación técnica, económica y ambiental entre geomembrana y arcilla para impermeabilizar la capa de cobertura final del relleno sanitario de Tulcán”** fue realizado por el señor **Pantoja Torres Paúl Alexander** el mismo que ha sido revisado y analizado en su totalidad, por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 07 de febrero de 2022

Firma:



Firmado electrónicamente por:
**DARIO ROBERTO
BOLANOS GUERRON**

Dario Roberto Bolaños Guerrón

Director

C.C.: 1715206593



VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE
TECNOLOGÍA
CENTRO DE POSGRADOS

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo **Pantoja Torres Paúl Alexander**, con cédula de ciudadanía n° 0401771191, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Comparación técnica, económica y ambiental entre geomembrana y arcilla para impermeabilizar la capa de cobertura final del relleno sanitario de Tulcán”** es de mí autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 07 de febrero de 2022

Firma

Pantoja Torres Paúl Alexander

C.C.: 0401771191



VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE
TECNOLOGÍA
CENTRO DE POSGRADOS

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, **Pantoja Torres Paúl Alexander** con cédula de ciudadanía n° 0401771191 autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **"Comparación técnica, económica y ambiental entre geomembrana y arcilla para impermeabilizar la capa de cobertura final del relleno sanitario de Tulcán"** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 07 de febrero de 2022

Firma

Pantoja Torres Paúl Alexander

C.C. 0401771191

Dedicatoria

Todos mis triunfos se los dedico a Dios por siempre cuidarme y bendecirme, a mis padres por todo su esfuerzo y dedicación, a mis hermanos por su ejemplo, a mi esposa por todo su apoyo y amor incondicional y sobre todo a mi angelita que llega a llenar mi vida de felicidad. A todos mis amigos y conocidos quienes hacen parte de mi vida.

Agradecimiento

Un agradecimiento especial a todas las personas que supieron compartir sus conocimientos para poder contribuir al desarrollo de esta investigación.

Al Centro de Posgrados de la Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE), por la formación académica recibida.

Índice de Contenido

Resumen	12
Abstract.....	13
Capítulo I: Introducción.....	14
<i>Antecedentes.....</i>	<i>14</i>
<i>Planteamiento del Problema</i>	<i>15</i>
<i>Justificación e Importancia</i>	<i>16</i>
<i>Objetivo General del Proyecto</i>	<i>16</i>
<i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>16</i>
<i>Hipótesis de Investigación</i>	<i>17</i>
<i>Área de estudio.....</i>	<i>17</i>
<i>Factores climáticos</i>	<i>19</i>
<i>Tipos de arcillas.....</i>	<i>19</i>
<i>Propiedades de las arcillas</i>	<i>20</i>
<i>Propiedades de la Geomembrana</i>	<i>22</i>
<i>Descripción situación actual relleno sanitario de Tulcán</i>	<i>23</i>
<i>Área de Implantación</i>	<i>23</i>
<i>Método de operación</i>	<i>23</i>
<i>Generación de Residuos.....</i>	<i>24</i>
<i>Celda diaria.....</i>	<i>25</i>
<i>Sistema de drenaje de lixiviados.....</i>	<i>26</i>
<i>Sistema de drenaje de Biogas.....</i>	<i>28</i>
<i>Sistema de drenaje de aguas lluvias.....</i>	<i>28</i>

<i>Sistema de tratamiento de lixiviados</i>	28
<i>Instalaciones complementarias</i>	29
<i>Principales afectaciones ambientales</i>	30
<i>Área de Extracción de Arcilla</i>	31
Capítulo II: Materiales y Métodos	32
<i>Levantamiento Topográfico</i>	32
<i>Ensayos de Laboratorio</i>	34
Capítulo III: Resultados y Discusión	36
<i>Resultados</i>	36
<i>Discusión</i>	38
Capítulo IV: Conclusiones	41
<i>Recomendaciones</i>	42
Capítulo V: Bibliografía	43

Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Coordenadas del área de estudio</i>	17
Tabla 2 <i>Producción total de residuos sólidos confinados en el relleno sanitario</i>	25
Tabla 3 <i>Composición de los residuos sólidos en la ciudad de Tulcán</i>	25
Tabla 4 <i>Resultados ensayo Proctor Estándar de arcillas</i>	36
Tabla 5 <i>Resultados de clasificación granulométrica y plasticidad</i>	37
Tabla 6 <i>Resultados del ensayo de permeabilidad con el método de carga variable</i> ...	38
Tabla 7 <i>Tabla de comparación de las propiedades de la geomembrana y de la arcilla</i>	39
Tabla 8 <i>Grado de permeabilidad del suelo</i>	40

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Mapa de ubicación relleno sanitario de Tulcán</i>	18
Figura 2 <i>Operación método de rampa o terraplén</i>	24
Figura 3 <i>Celda diaria de disposición de los residuos sólidos</i>	26
Figura 4 <i>Salida de lixiviados parte baja del relleno sanitario</i>	27
Figura 5 <i>Ubicación del filtro de lixiviados parte baja del relleno</i>	29
Figura 6 <i>Esquema del Sistema de Tratamiento de Lixiviados</i>	29
Figura 7 <i>Instalaciones complementarias</i>	30
Figura 8 <i>Yacimiento de Arcilla</i>	31
Figura 9 <i>Mapa topográfico Relleno Sanitario de Tulcán</i>	33
Figura 10 <i>Ensayo Proctor Estándar</i>	37

Resumen

La ciudad de Tulcán desde el año 1998 cuenta con un relleno sanitario en el que se realiza la disposición final de los residuos sólidos urbanos. Este relleno sanitario está por cumplir su vida útil, por lo tanto, es necesario implementar un plan de cierre técnico para impermeabilizar la capa de final de cobertura en las celdas de residuos. El objetivo de la presente investigación es impermeabilizar la capa final de cobertura en el cierre técnico del relleno sanitario para minimizar impactos ambientales y sociales. Mediante un método de investigación comparativo entre el uso de geomembrana y arcillas, se analizará parámetros técnicos, económicos y ambientales. Con esta esta investigación se espera establecer la factibilidad técnica y económica en la colocación de arcilla para impermeabilizar el suelo minimizando así futuros impactos ambientales. Los resultados obtenidos, permiten definir un coeficiente de uniformidad granulométrico menor a 5 que las clasifica dentro de arcillas limosas; son arcillas de media a baja plasticidad (CL), con un índice de plasticidad (IP) entre 16 y 17, y un porcentaje de humedad óptima de 19 a 20. Además, el coeficiente de permeabilidad resultante de los ensayos realizados bajo la norma ASTM D 2434-68 es de $K=1,67 \times 10^{-7}$ cm/s, por lo se puede concluir que es una arcilla apta para la construcción de barreras impermeables ideal para evitar problemas como agrietamientos y escorrentías. La instalación de una capa de cobertura final con arcilla, resulta económicamente rentable en el cierre técnico del relleno sanitario de la ciudad de Tulcán, con un costo aproximado por metro cúbico de 0,50 dólares.

Palabras clave:

- **GEOMEMBRANA**
- **IMPERMEABILIZACIÓN DE SUELOS**
- **ARCILLA**
- **RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS**
- **COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD**

Abstract

Since 1998, the city of Tulcán has a sanitary landfill in which the final disposal of urban solid waste is carried out. This sanitary landfill is about to reach its useful life, therefore, it is necessary to implement a technical closure plan to waterproof the final covering layer in the waste cells. The objective of the present investigation is to waterproof the final covering layer in the technical closure of the sanitary landfill to minimize environmental and social impacts. By means of a comparative research method between the use of geomembrane and clays, technical, economic and environmental parameters will be analyzed. With this research, it is expected to establish the technical and economic feasibility in the placement of clay to waterproof the soil, thus minimizing future environmental impacts. The results obtained allow defining a granulometric uniformity coefficient of less than 5 that classifies them within silty clays; They are clays of medium to low plasticity (CL), with a plasticity index (IP) between 16 and 17, and an optimum humidity percentage of 19 to 20. Also, the permeability coefficient resulting from the tests carried out under the ASTM D 2434-68 standard is $K = 1.67 \times 10^{-7}$ cm / s, so it can be concluded that it is a clay suitable for the construction of waterproof barriers, ideal to avoid problems like cracking and runoff. The installation of a final covering layer with clay is economically profitable in the technical closure of the sanitary landfill in the city of Tulcán, with an approximate cost per cubic meter of 0.50 dollars

Keywords:

- **GEOMEMBRANE**
- **SOIL WATERPROOFING**
- **CLAY**
- **URBAN SOLID WASTE**
- **COEFFICIENT OF PERMEABILITY**

CAPÍTULO I

Introducción

Antecedentes

En Latinoamérica los desechos sólidos urbanos se siguen acumulando en botaderos o vertederos a cielo abierto, el aumento de la población y sus hábitos consumistas son la principal razón del aumento en la generación de desechos que se pueden convertir en principales fuentes de contaminación ambiental, afectando al suelo, agua y aire en las zonas de influencia de dichos vertederos (Noguera & Olivero, 2010).

Cabe destacar, que el déficit de servicios y la ausencia de infraestructuras sanitarias para la disposición final de los residuos sólidos municipales, han originado la formación de botaderos en las ciudades, donde se disponen sin las mínimas medidas sanitarias y de seguridad, propiciando la proliferación de vectores, prácticas insalubres de segregación y alimentación de animales con residuos sólidos (Eguizabal & Marizol, 2009).

Por lo mencionado, existe la necesidad de realizar un adecuado manejo de los rellenos sanitarios con un sistema integral de manejo de residuos y control de vertederos a cielo abierto realizando remediación y cierre de los mismos con monitoreos periódicos de agua, suelo y aire en la zona de influencia, para evitar que se conviertan en foco de contaminación luego de finalizadas sus operaciones (De Cortázar & Llamas, 2017).

En la actualidad, la impermeabilización de rellenos sanitarios ha adquirido una notable importancia al existir una directa relación entre la eliminación o atenuación de los vectores contaminantes y un buen diseño y construcción de un sello (Rodríguez, 2003). Por tal motivo, en el cantón Tulcán, el relleno sanitario que recibe aproximadamente 60 toneladas de basura al día el mismo que se encuentra en funcionamiento desde 1998 con todos los permisos habilitantes, respetando la normativa ambiental vigente, y que, además, su vida útil está por concluir, es importante y necesario un adecuado cierre del relleno.

Planteamiento del Problema

El manejo de los residuos sólidos urbanos constituye uno de los mayores problemas de carácter ambiental, económico y social a nivel mundial, principalmente porque el volumen de residuos crece más rápido que la población. (Flechas & González, 2016).

Además, la eliminación y manejo de residuos sólidos domésticos son problemas críticos en las áreas urbanas de América Latina, por ejemplo, en Ecuador en el 2016, el porcentaje de rellenos sanitarios en la Sierra fue de 50,5%, en la Costa de 14,3%, en la Amazonía de 61,0% y en la Región Insular de 33,33% (INEC & AME, 2016), mencionando también que en la actualidad los rellenos sanitarios poseen diversidad de problemas operativos, encontrándose con mayor frecuencia el inadecuado tratamiento de los lixiviados (Noguera & Olivero, 2010).

Por otra parte, es importante señalar que los residuos sólidos municipales tienen un gran potencial de reciclaje, puesto que dentro de su composición se encuentran material inorgánico tal como vidrio, papel, cartón, PET, plásticos, chatarra, textiles, componentes electrónicos, caucho, entre otros, los cuales son susceptibles de ser reinsertados en nuevos ciclos productivos (Álvaro & Olives, 2013).

Como parte final de los rellenos sanitarios, la utilización de geomembrana como barrera o recubrimiento ha sido exitosa ya que este material presenta facilidad de instalación y de adaptación a cualquier forma dando un gran beneficio ambiental. (Pazmiño 2010).

Otro material que puede ser utilizado en rellenos sanitarios como material de recubrimiento son las arcillas cuyas propiedades impermeabilizantes o de sellado se basa fundamentalmente en algunas de sus características, como son: su elevada superficie específica, gran capacidad de hinchamiento, buena plasticidad y lubricidad, alta impermeabilidad, baja compresibilidad. Las arcillas más utilizadas para este fin son las sódicas (García & Suárez, 2004).

Finalmente, el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Tulcán cuenta con un relleno sanitario cuya vida útil está por terminar por lo que debe existir una propuesta

técnicamente rentable para realizar la impermeabilización del suelo en el cierre del mismo.

Justificación e Importancia

Los vertederos y botaderos a cielo abierto utilizados a nivel nacional son considerados como áreas con alto riesgo de contaminación, su mala gestión desde el inicio hasta el final de su vida útil, ha desencadenado desastres ambientales que afectan el agua, suelo y aire de su zona de influencia (Chinga & Pin, 2013).

También, en el ámbito social la mala gestión de los residuos sólidos urbanos no solo afecta a las viviendas y comunidades cercanas sino también a los trabajadores y personas que día a día realizan la recolección de los desechos por toda la ciudad (Hinojosa, 2018).

Resulta entonces, necesario para el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Tulcán, realizar un cierre técnico del relleno sanitario con una impermeabilización adecuada del suelo para así cuidar y preservar el ambiente, además, es necesario dar un adecuado uso a los terrenos que serán clausurados en el relleno sanitario.

Objetivo General del Proyecto

Comparar técnica y económicamente el uso de geomembrana o arcilla en la capa final de cobertura, para minimizar impactos ambientales en el cierre técnico del relleno sanitario de Tulcán.

Objetivos Específicos

- a) Definir la morfología y el área que será intervenida en el relleno sanitario mediante el levantamiento topográfico a detalle con un GPS RTK Geomax.
- b) Determinar las propiedades físico-mecánicas de la arcilla, realizando ensayos de granulometría, permeabilidad, plasticidad y humedad en laboratorios acreditados en base a las normas ASTM 98.

- c) Calcular el coeficiente de permeabilidad de la arcilla, según la norma ASTM D 2434 – 68, que garantice la impermeabilización del suelo para evitar escorrentías que puedan contaminar el suelo y el agua.
- d) Analizar las características técnicas de la geomembrana, tipos, tiempo de vida útil, ventajas y desventajas de su instalación en rellenos sanitarios.
- e) Analizar la factibilidad de impermeabilizar el suelo con arcilla o geomembrana en el cierre técnico del relleno sanitario de manera sustentable para minimizar futuros impactos ambientales realizando controles y monitoreos de calidad de agua, suelo y aire, una vez finalizadas las operaciones.

Hipótesis de Investigación

La impermeabilización de la capa de cobertura final con arcilla en rellenos sanitarios es una alternativa ambiental y económicamente rentable en comparación con el uso de geomembrana.

Área de estudio

El área de estudio se encuentra localizada en la Provincia del Carchi, Cantón Tulcán, Parroquia Tulcán, Sector la Palizada (ver Figura 1), abarcando una superficie de 9,6 hectáreas, que están limitadas por las coordenadas UTM, referenciadas al DATUM WGS84, cuyos vértices se muestran en la Tabla 1.

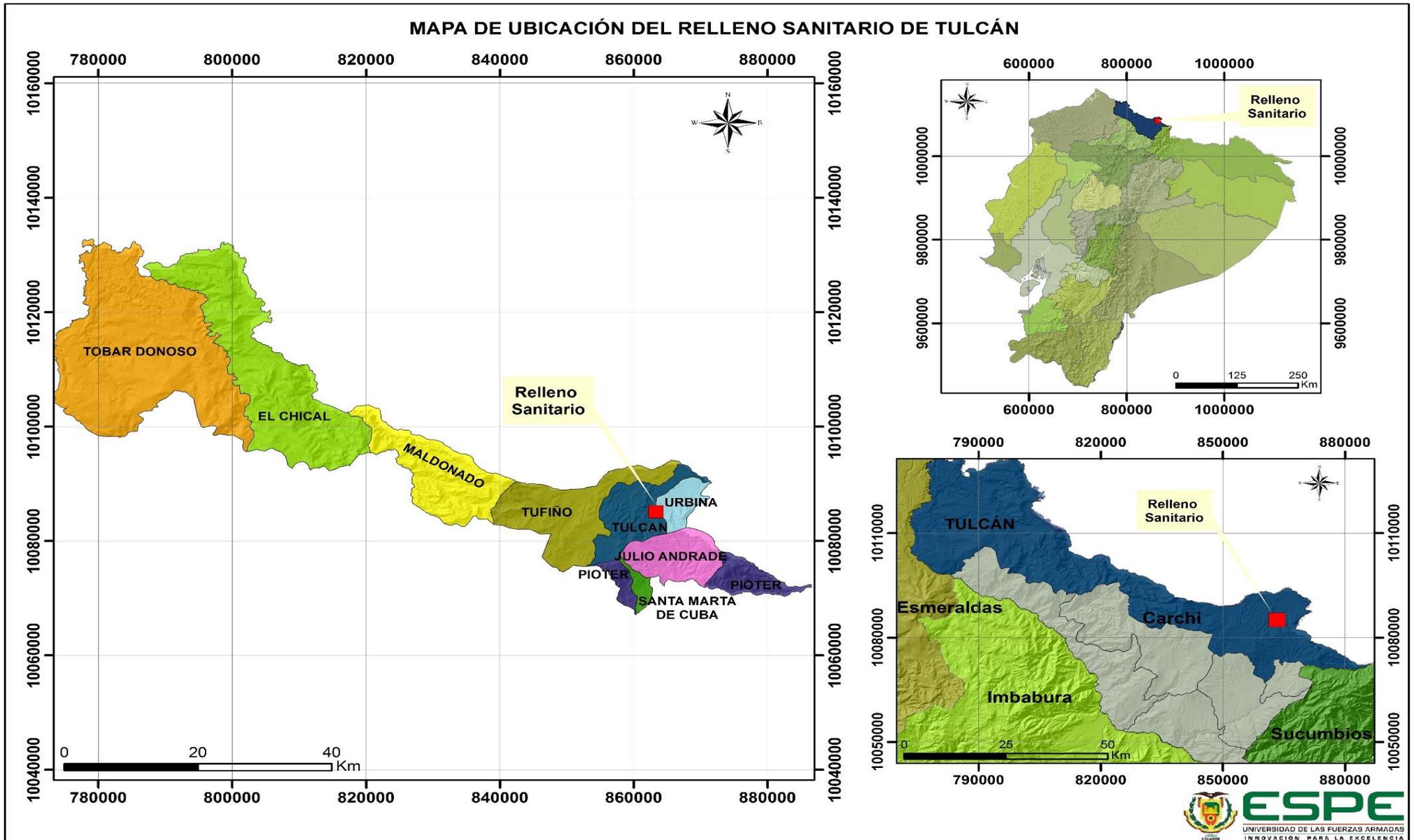
Tabla 1

Coordenadas del área de estudio

Ubicación Política	Parroquia	Cantón	Provincia
	Tulcán	Tulcán	Carchi
	Punto	X (E)	Y (N)
Ubicación Geográfica	PP	196056	10085241
	1	196139	10085172
	2	196085	10085071
	3	195982	10085170

Figura 1

Mapa de ubicación relleno sanitario de Tulcán



Factores climáticos

Dentro de la parroquia Tulcán, la temperatura oscila entre los 4 a 22 grados centígrados con un relieve que va desde los 2800 hasta los 3200 metros sobre en el nivel del mar.

Las precipitaciones en la zona presentan una variación de entre 750 a 1000 mm al año (PDOT, 2016).

Tipos de arcillas

El término arcilla desde el punto de vista mineralógico, engloba a un grupo de minerales (minerales de la arcilla), filosilicatos en su mayor parte, cuyas propiedades fisico-químicas dependen de su estructura y de su tamaño de grano, muy fino (inferior a 2 mm). Según (Baez T et al., 2009), los minerales arcillosos se agrupan en cuatro grupos importantes: caolinita, montmorillonita, illita y clorita.

➤ GRUPO DE LA CAOLINITA

De los diferentes minerales de estos grupos, la caolinita es la de importancia comercial. La caolinita no se expande al incrementar su contenido de agua y es apreciable un reemplazamiento del aluminio por otros metales. Las grandes concentraciones de caolinita pura son formadas por procesos: hidrotermal, meteorización y sedimentario, tales depósitos son fuentes de arcillas de alto grado (caolin), usadas en cerámica, para papel y en refractarios. (Baez T et al., 2009)

➤ GRUPO DE LA MONTMORILLONITA

Se diferencia de la caolinita en varios otros aspectos:

- 1) La estructura básica.
- 2) El magnesio puede reemplazar en gran parte al aluminio.
- 3) La montmorillonita tiene una estructura “reticular expansiva”.
- 4) Los iones de calcio, sodio o potasio, muestran una elevada capacidad de “intercambio de iones” de cualquiera de los minerales arcillosos.

Es el principal constituyente de la bentonita que se expande, y de ciertas arcillas adsorbentes. Ambos materiales son de importancia económica. (Baez T et al., 2009)

➤ **GRUPO DE LA ILLITA**

Illita es el término general usado para los minerales arcillosos parecidos a las micas. En el registro micrográfico, la illita se presenta como pequeñas escamas pobremente definidas, a veces agrupada en agregados irregulares. La illita es el mineral arcilloso más abundante en las arcillas y predominante en las lutitas. (Baez T et al., 2009)

➤ **GRUPO DE LA CLORITA**

Estructuralmente las cloritas se asemejan a la illita. La clorita constituyente de las arcillas es muy difícil de detectar y no se le ha estudiado como a los otros grupos. Aparentemente es un mineral abundante en los materiales arcillosos. (Baez T et al., 2009)

Propiedades de las arcillas

➤ **Superficie específica**

La superficie específica o área superficial de una arcilla se define como el área de la superficie externa más el área de la superficie interna (en el caso de que esta exista) de las partículas constituyentes por unidad de masa, expresada en m^2/g .

Las arcillas poseen una elevada superficie específica, muy importante para ciertos usos industriales en los que la interacción sólido-fluido depende directamente de esta propiedad. (Romero, E. G., & Barrios, M. S. 2002)

➤ **Capacidad de Intercambio catiónico**

Es una propiedad fundamental de las esmectitas. Son capaces de cambiar fácilmente los iones fijados en la superficie exterior de sus cristales, en los espacios interlaminares, o en otros espacios interiores de las estructuras, por otros existentes en las soluciones acuosas envolventes. (Romero, E. G., & Barrios, M. S. 2002)

➤ **Capacidad de absorción**

Algunas arcillas encuentran su principal campo de aplicación en el sector de los absorbentes ya que pueden absorber agua u otras moléculas en el espacio interlaminar (esmeclitas) o en los canales estructurales (sepiolita y paligorskita).

La capacidad de absorción está directamente relacionada con las características texturales (superficie específica y porosidad) y se puede hablar de dos tipos de procesos que difícilmente se dan de forma aislada: absorción (cuando se trata fundamentalmente de procesos físicos como la retención por capilaridad) y adsorción (cuando existe una interacción de tipo químico entre el adsorbente, en este caso la arcilla, y el líquido o gas adsorbido, denominado adsorbato).

La capacidad de adsorción se expresa en porcentaje de adsorbato con respecto a la masa y depende para una misma arcilla, de la sustancia de que se trate. La absorción de agua de arcillas absorbentes es mayor del 100% con respecto al peso. (Romero, E. G., & Barrios, M. S. 2002)

➤ **Hidratación e hinchamiento**

La hidratación y deshidratación del espacio interlaminar son propiedades características de las esmeclitas, y cuya importancia es crucial en los diferentes usos industriales. Aunque hidratación y deshidratación ocurren con independencia del tipo de catión de cambio presente, el grado de hidratación sí está ligado a la naturaleza del catión interlaminar y a la carga de la lámina. (Romero, E. G., & Barrios, M. S. 2002)

➤ **Plasticidad**

Las arcillas son eminentemente plásticas. Esta propiedad se debe a que el agua forma una cobertura sobre las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas.

La elevada plasticidad de las arcillas es consecuencia, nuevamente, de su morfología laminar, tamaño de partícula extremadamente pequeño (elevada área superficial) y alta capacidad de hinchamiento. (Romero, E. G., & Barrios, M. S. 2002)

➤ **Tixotropía**

La tixotropía se define como el fenómeno consistente en la pérdida de resistencia de un coloide, al amasarlo, y su posterior recuperación con el tiempo. Las arcillas tixotrópicas cuando son amasadas se convierten en un verdadero líquido. Si a continuación, se las deja en reposo recuperan la cohesión, así como el comportamiento sólido. (Romero, E. G., & Barrios, M. S. 2002)

Propiedades de la Geomembrana

Las geomembranas, son láminas fabricadas con resina virgen de polietileno de alta densidad (HDPE) o de Policloruro de vinilo (PVC) de muy alta calidad, formuladas para determinados usos cuya principal característica es una baja permeabilidad, flexibilidad y una alta resistencia, y su principal aplicación es la impermeabilización y/o contención de líquidos y sólidos evitando que no se filtren al subsuelo. El HDPE es el material más usado para el revestimiento en depósitos de desechos sólidos de minas, rellenos y otras aplicaciones de contención de líquidos (es el indicado para proyectos donde el requerimiento de permeabilidad sea bajo y la resistencia a los rayos UV y químicos sea excepcionalmente alto) (Parra, 2012).

Sus principales características:

- Químicamente inerte con el agua.
- Tiempo de degradación muy longevo.
- Resistente a Hidrocarburos Alifáticos.
- Resistente a solventes clorinados oxigenados y del petróleo crudo.
- Resistente a ácidos orgánicos e inorgánicos, metales pesados y sales.
- Más de 20 años de tiempo de degradación.
- Avance de obra rápido debido a la presentación y tamaño de los rollos.

Principales usos

- Revestimientos en canales de conducción de agua
- Rellenos Sanitarios
- Impermeabilización dentro de Túneles

- Lagos Artificiales
- Lagunas de Oxidación
- Biodigestores
- Tanques de Almacenamiento de Hidrocarburos
- Tanques de Melaza.

<http://geomembranasdelsur.com/blog> (2014).

Descripción situación actual relleno sanitario de Tulcán

Para la descripción y análisis de la gestión de residuos en el relleno sanitario de Tulcán, se analizarán documentos y estudios anteriores, así como también datos que fueron obtenidos en campo.

Área de Implantación

El sitio de implantación del relleno sanitario es una ladera de suave inclinación, que se encuentra a una altura aproximada de 3000 metros sobre el nivel del mar; en una zona de orografía ondulada. De acuerdo al estudio de suelos, presenta una estratigrafía conformada por limo arcilloso y arenas limosas de compactación relativamente suelta, seguido de limos arcillosos café oscuro, cafés claros y negros. Según datos del INAMHI 2018, la temperatura máxima media es de 11,8° C, con una precipitación fluvial de 875 mm al año. No existen cauces fluviales en este sitio, se estima que la capa freática, se encuentra a una profundidad de 7 metros.

Método de operación

El área de intervención del relleno sanitario es de 9,6 Ha.; aprovechadas para la disposición de residuos sólidos en función de su topografía, siendo el método de operación del relleno sanitario de rampa o terraplén.

Figura 2

Operación método de rampa o terraplén



En la Figura 2 se muestra la disposición de las celdas y áreas específicas en el relleno sanitario de Tulcán; en donde se puede observar un área reforestada, el área de celdas clausuradas, las celdas que se encuentran activas, las piscinas de lixiviados, la zona de protección y área de oficinas administrativas.

Generación de Residuos

La cantidad de residuos sólidos que son encaminados al relleno sanitario del cantón Tulcán, tienen dos fuentes de generación, los cantones Tulcán y San Pedro de Huaca.

La generación de residuos sólidos en la Ciudad de Tulcán para el año 2020, según datos proporcionados por la Jefatura de Residuos del GADMT es la siguiente:

- Población total: 79.213 habitantes
- % Cobertura del servicio urbano: 92%
- Población servida: 72.875 habitantes
- Producción per cápita: 0,740 Kg/hab. Día
- Generación de residuos: 46,74 T/día
- Cantidad de residuos recogida: 42,20 T/día

Con los aspectos detallados anteriormente, se considera que la cantidad de residuos sólidos que llegan al relleno sanitario del Cantón Tulcán se muestran en la Tabla 2:

Tabla 2

Producción total de residuos sólidos confinados en el relleno sanitario

Cantón		Residuos sólidos (t/día)
Tulcán	Ciudad de Tulcán	42,20
	Parroquias Rurales	11,12
San Pedro de Huaca	Huaca y Mariscal Sucre	4,11
Total		57,43

Nota: Recuperado de Municipio de Tulcán

Por otro lado, es importante determinar la composición de los residuos sólidos, en función a su futuro aprovechamiento (Tabla 3).

Tabla 3

Composición de los residuos sólidos en la ciudad de Tulcán

Componentes	%
Materia Orgánica	66,9
Papel	6,9
Cartón	5,7
Plástico	8,5
Latas	0,2
Otros (Escombros)	3,1
Cuero	0,0
Textiles	1,4
Papel Higiénico	3,7
Vidrio	3,4
Madera	0,2
Total	100,0

Nota: Recuperado de Municipio de Tulcán

Celda diaria

Los residuos sólidos que llegan al sitio de destino final son confinados diariamente en una celda que avanza conforme se van clausurando las diferentes etapas del proyecto, es decir las diferentes plataformas.

La celda diaria como se muestra en la Figura 3, está definida por el frente de trabajo que es de 5 m., el avance diario depende de la cantidad de basura que llega diariamente

al relleno y el grado de compactación que se obtenga mediante los procesos operativos, la altura de la celda es de 1 m. y el espesor de la cobertura es de 0,20 m.

Como se había indicado en la generación de residuos, el relleno sanitario de Tulcán recibe en promedio diario 57 toneladas que son dispuestas, confinadas, compactadas y recubiertas mediante el uso de una retroexcavadora de orugas que permanece en el proyecto, esto permite operar técnicamente la celda diaria, evitando que los residuos sólidos queden a la intemperie generando problemas ambientales.

El material de cobertura se lo obtiene del mismo sitio, conforme avanzan las diferentes etapas del proyecto.

Figura 3

Celda diaria de disposición de los residuos sólidos.



Sistema de drenaje de lixiviados

Conforme a lo especificado en los diseños del relleno sanitario, este debe contar con un sistema de drenaje de lixiviados en la base de las diferentes plataformas, el mismo que debe estar dispuesto en forma de espina de pescado y distribuido uniformemente en el área de intervención.

Los drenes de este sistema, conforme a lo especificado en el diseño inicial, deben tener una sección de 0,40 m. x 0,30 m. y rellenos de grava de diámetro máximo de 3 cm. y piedra bola de diámetro máximo de 7,5 cm.

Es importante señalar, que el diseño inicial del relleno sanitario no contempla la colocación de un sistema de impermeabilización en la base, pudiendo ser este el uso de geomembranas, debido a las características de permeabilidad del suelo del sitio.

En este contexto no se ha podido verificar visualmente tanto la construcción de los drenes de lixiviado como la no existencia de geomembrana en la base, en vista de que el relleno se encuentra en operación y se han realizado ya rellenos en el sitio; sin embargo, es importante señalar que si se evidencia el drenaje de lixiviados en la parte baja del terreno por medio de una alcantarilla que conduce estos líquidos al sistema de tratamiento. Figura 4

Figura 4

Salida de lixiviados parte baja del relleno sanitario



Sistema de drenaje de Biogas

El relleno sanitario tiene implementadas chimeneas de drenaje de biogás, éstas han sido construidas en función de lo especificado en el diseño inicial del proyecto.

Estas chimeneas tienen una sección transversal de 0,45 m. x 0,45 m., y están hechas con palos como material de soporte, recubiertos con malla hexagonal y en su interior contienen material granular. Para el remate final de la chimenea, una vez esté culminando el relleno, se coloca tubos de hormigón simple de 0,30 m. de diámetro, siendo el primero perforado y el final sin perforaciones para poder realizar la quema efectiva del biogás.

Sistema de drenaje de aguas lluvias

El contar con un sistema de drenaje de aguas lluvias nos permite minimizar el ingreso de esta agua hacia el área de intervención del relleno sanitario y con esto a la minimización de la generación de lixiviados. Los diseños iniciales del proyecto recomiendan la construcción de una cuneta de coronación de sección trapezoidal de 0,60 m. de base mayor, 0,30 m. de base menor y una altura de 0,30 m. sin recubrimiento, localizada en la parte alta del terreno.

En la visita al sitio no se constató la existencia de esta cuneta de coronación, sin embargo, existe un drenaje lateral conformado de tuberías semi enterradas y discontinuo, lo que generaría problemas en el flujo normal de las aguas lluvias.

Sistema de tratamiento de lixiviados

El mayor problema que presenta el relleno sanitario de la ciudad de Tulcán es el manejo y tratamiento de los lixiviados; actualmente se puede mencionar que existen drenajes inferiores de lixiviados hacia la parte baja, en donde se encuentra un tanque de sedimentación y un filtro (Ver Figura 5) que está colapsado, por su mal funcionamiento, se produce acumulación de lixiviados y en ciertos casos vertido incontrolado de los mismos. En situaciones de acumulación de lixiviados se procede a recircularlo en las partes bajas del relleno sanitario.

El diseño del proyecto especifica un sistema de tratamiento constituido de un lecho de contacto y un sistema de pulido de efluente (Ver Figura 6) compuesto de una fosa séptica de doble cámara, un segundo lecho de contacto y un estanque de estabilización; finalmente, el efluente se especifica ser descargado en un campo de infiltración.

Figura 5

Ubicación del filtro de lixiviados parte baja del relleno



Figura 6

Esquema del Sistema de Tratamiento de Lixiviados



Instalaciones complementarias

Como elementos complementarios (Ver Figura 7) del relleno sanitario existen los siguientes:

- Puerta de Ingreso.
- Rótulos Informativos.
- Vivienda de Guardianía y Bodegas.
- Cerramiento perimetral de alambre de púas.
- Accesos desde la carreta principal por medio de un camino empedrado.
- Vías internas.

Figura 7

Instalaciones complementarias



Principales afectaciones ambientales

El relleno presenta varios problemas en su operación lo que ocasiona actualmente impactos ambientales negativos, tales como:

- Se ha recibido quejas de los moradores del sector, respecto al tránsito de los vehículos recolectores en especial porque se ha evidenciado el derrame de desperdicios en la vía.
- El relleno cuenta con maquinaria permanente, este factor contribuye al recubrimiento diario de los residuos; sin embargo, en el área de intervención del relleno sanitario se puede evidenciar desperdicios esparcidos, lo que presenta

una mala apariencia al lugar; además, se ha podido evidenciar la presencia de neumáticos y escombros acumulados en varios lugares del terreno.

- Los lixiviados que se generan en el relleno sanitario no reciben tratamiento, el sistema actual está colapsado, el filtro de los lixiviados no ha recibido mantenimiento periódico.
- No existe un control total de los vectores sanitarios
- La vida útil del relleno sanitario está por terminar.

Área de Extracción de Arcilla

El yacimiento de arcilla (Ver Figura 8) se encuentra dentro del libre aprovechamiento de materiales de construcción “Las Peñas”, concesionado por el Gobierno Municipal de Tulcán, y puede ser extraído de forma mecanizada con maquinaria municipal.

Figura 8

Yacimiento de Arcilla



CAPÍTULO II

Materiales y Métodos

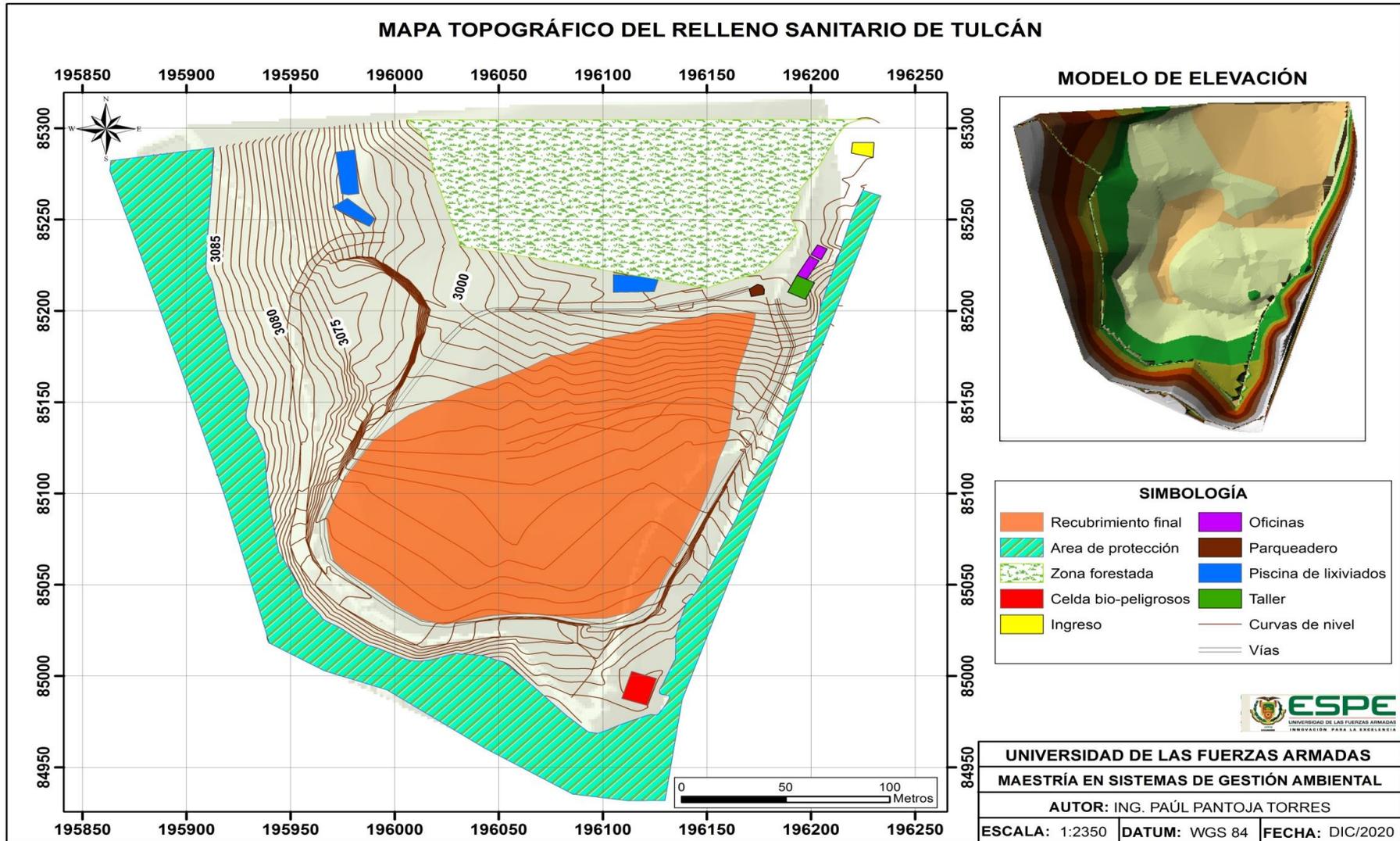
Levantamiento Topográfico

Se realizó el estudio técnico y descriptivo del terreno o levantamiento topográfico, para obtener los puntos de geoposicionamiento y posteriormente las curvas de nivel, utilizando un equipo especializado de topografía un GPS RTK Geomax Zenith 25 Pro, en DATUM WGS84, zona 18N.

Abarcando toda la superficie del relleno sanitario y sobre todo la celda donde se depositan los residuos sólidos urbanos. Ver Figura 9.

Figura 9

Mapa topográfico Relleno Sanitario de Tulcán



Ensayos de Laboratorio

La clasificación de las arcillas se realizó de acuerdo a las normas internacionales del sistema unificado de clasificación de suelo (SUCS) y de la AASHTO.

➤ Ensayo Proctor Estándar

La prueba consiste en compactar el suelo a emplear en tres capas dentro de un molde de forma y dimensiones normalizadas, por medio de 25 golpes en cada una de ellas, con un pisón de 2,5 [kg] de peso, que se deja caer libremente desde una altura de 30,5 [cm] (Barcena, 2011).

Con este ensayo se busca determinar el comportamiento de la arcilla ya que a determinada energía de compactación existe un valor de “Humedad Óptima”, con el cual puede alcanzarse la “Máxima Densidad Seca”.

El Ensayo Proctor Estándar también es conocido como Ensayo AASHTO T-99 (American Association of State Highway and Transportation Officials – Asociación Americana de Agencias Estatales de Carreteras y Transportes).

➤ Determinación de Granulometría de las Partículas Método del Tamizado

El ensayo consiste en clasificar y separar el material mediante una serie de varias fracciones granulométricas de tamaño decreciente. La masa de las partículas retenidas en los diferentes tamices se expresa respecto a la masa inicial del material (Castro, 2006).

➤ Determinación del Coeficiente de Permeabilidad

Las muestras fueron preparadas en el laboratorio siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM D5084-16a.

La conductividad hidráulica se obtiene utilizando un permeámetro de carga variable de volumen constante de 220,6cm³ de suelo, seleccionando el método considerando que brinda mayor exactitud para arcilla y limo. Así, durante el ensayo se registra el peso de la muestra, las caídas de nivel de agua en el tubo de medición y el intervalo de tiempo del ensayo. Finalmente, con los datos obtenidos se determina el coeficiente de permeabilidad aplicando la ley de Darcy, a través de la siguiente fórmula:

$$k = 2,3 \frac{a \cdot L}{A \cdot \Delta t} * \log \frac{h_1}{h_2} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

k= Coeficiente de permeabilidad [L/T]

a= Área del tubo recto de medición [L²]

L= Longitud del permeámetro [L]

A= Área transversal del permeámetro [L²]

h₁= Altura inicial de medición [L]

h₂= Altura final de medición [L]

Δt= Intervalo de tiempo entre alturas de medición [T]

CAPÍTULO III

Resultados y Discusión

Resultados

Como resultado del levantamiento topográfico se obtuvo el siguiente mapa topográfico ver Figura 9

La morfología del relleno sanitario es irregular con pendiente moderada, abarca una extensión de 9,6 hectáreas donde se encuentran todas las instalaciones y se desarrollan las operaciones para la disposición final de los residuos urbanos.

El área de la celda que será clausurada y necesita el recubrimiento final es de 25545m².

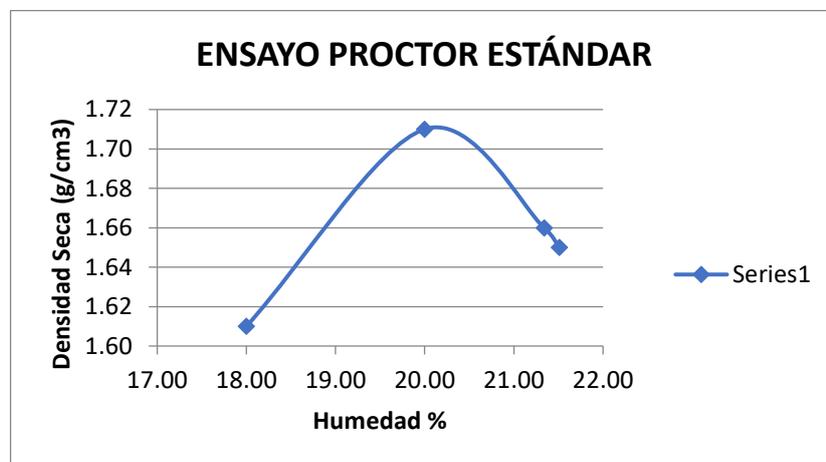
Los resultados de los ensayos de Proctor Estándar realizados a las muestras de arcilla se muestran en la Tabla 4

Tabla 4

Resultados ensayo Proctor Estándar de arcillas

Ensayos proctor estándar para arcillas				
Nº Muestra	%W Opt.	pd-max (g/cm³)	0.95 pd-max(g/cm³)	Rango W opt. (%)
M1	21,51	1,67	1,78	19-22
M2	21,34	1,66	1,75	19-22
M3	20,00	1,71	1,87	19-22
M4	18,00	1,61	1,72	17-20

En la Figura 10 se puede observar la tendencia del material arcilloso para alcanzar su humedad óptima.

Figura 10*Ensayo Proctor Estándar*

En la Tabla 5 se presenta los resultados obtenidos a partir de los ensayos de granulometría y plasticidad, a la muestra de arcilla.

Donde:

LL: Límite Líquido

LP: Límite Plástico

IP: Índice de Plasticidad

CL: Arcilla de baja plasticidad

Tabla 5*Resultados de clasificación granulométrica y plasticidad*

Nº Muestra	Clasificación de las arcillas						% W Natural	(SUCS)
	% pasa #200	% pasa #4	LL (%)	LP (%)	IP (%)			
M1	52	100	38	21,2	17,2	19,3	CL	
M2	53	100	37	22,1	16,3	21,4	CL	
M3	51	100	36,5	22,6	16,4	18,5	CL	

La determinación del coeficiente de permeabilidad que se realizó en el laboratorio mediante el ensayo de carga variable se muestra en la Tabla 6. Utilizando la ley de Darcy Ec. 1 se obtuvo

Tabla 6

Resultados del ensayo de permeabilidad con el método de carga variable

Ensayo de permeabilidad de carga variable				
Nº Muestra	Q (cm3)	A(cm3)	T(s)	k(cm/s)
M1	1,78	81,07	172800	1,24E-07
M2	2,34	81,07	172800	1,89E-07
M3	1,36	81,07	172800	1,89E-07
Promedio				1,67E-07

Discusión

Colombia y Ecuador tienen modelos de gestión de residuos sólidos muy similares con el uso de botaderos o vertederos a cielo abierto, en donde se evidencia el poco aprovechamiento de los residuos que tiene un gran potencial de ser reciclados y reutilizados alargando así la vida útil de los rellenos sanitarios (Noguera & Olivero, 2010).

Los resultados del levantamiento topográfico muestran un relieve irregular que abarca toda la zona de operaciones del relleno sanitario con pendientes moderadas; tal como lo explica el autor Cortázar (2017), los estudios topográficos para la implantación de rellenos sanitarios y estabilidad de taludes en la conformación de celdas debe realizarse tomando en cuenta las pendientes del terreno natural.

Según los resultados del ensayo Proctor Estándar, realizando el promedio de las cuatro muestras tomadas, indican que la densidad máxima seca de la arcilla con una saturación al 95% de humedad es de 1,78 g/cm³; lo que demuestra que con una buena compactación se puede mejorar las propiedades de los suelos, la arcilla presenta características de baja permeabilidad y es un material plástico que puede ser utilizado como material de cobertura en rellenos sanitarios y con aplicaciones en diferentes obras civiles y de ingeniería tal como lo plantea Barcena, (2011).

El análisis granulométrico nos permite determinar el comportamiento ingenieril de los materiales, cuando se trata de arcillas o limos este ensayo debe ir acompañado de un ensayo de plasticidad (IP), tal como lo demuestra los estudios realizados por Bárcena (2011), para determinar las propiedades de permeabilidad del suelo.

La geomembrana ha demostrado ser un material muy utilizado para impermeabilizar áreas definidas en diferentes obras de ingeniería y cuyas propiedades se muestran y se comparan con las de la arcilla en la Tabla 7.

Tabla 7

Tabla de comparación de las propiedades de la geomembrana y de la arcilla

Geomembrana		Arcilla	
Parámetro	Valoración	Parámetro	Valoración
Permeabilidad	Impermeable ($k=10^{-13}$)	Permeabilidad	Impermeable ($k=10^{-7}$)
Resistencia Corrosión	Alta	Resistencia Corrosión	Alta
Resistencia Altas temperaturas	Alta (>100°C)	Resistencia Altas temperaturas	Alta (>200°C)
Resistencia Ácidos	Alta	Resistencia Ácidos	Alta
Vida Útil	200 años	Vida Útil	No definida
Costo Instalación	8 \$/m ²	Costo Instalación	0,5 \$/m ²
Costo Total:	\$204,360	Costo Total:	\$38,317.50

El proceso de instalación de arcilla es un proceso relativamente sencillo ya que el material presenta una granulometría uniforme, la compactación de la arcilla es una de las etapas de mayor importancia luego de vertido el material con camiones tipo volqueta un rodillo debe realizar la compactación del mismo dejando una capa de espesor mínimo de 0.30 cm en concordancia con los estudios realizados por Chamba-Morales 2019.

La instalación de la geomembrana se realiza de acuerdo a las especificaciones del fabricante para garantizar su efectividad y perdurabilidad conforme lo indica Ávila A. 2018, por lo que el costo considerado de 8 \$/m² ya considera la instalación por parte del proveedor.

Una de las propiedades que caracteriza a la arcilla como material impermeabilizante fue estudiada por el autor Chamba-Morales, 2019 para la construcción de reservorios

siendo este un precedente para la aplicación de este material en otras obras de ingeniería civil.

Estos datos indican que la arcilla es un material que, por sus propiedades de permeabilidad ($k=10^{-7}$), (Ver Tabla 8), puede ser utilizado como barrera impermeabilizante en diferentes obras de ingeniería y puede ser aprovechado debido a su bajo costo de implantación; contribuyendo así a minimizar los futuros impactos ambientales de los rellenos sanitarios (Chamba-Morales, 2019).

Tabla 8

Grado de permeabilidad del suelo

Grado de permeabilidad	Conductividad hidráulica cm/s
Elevada	Superior a 10^{-1}
Media	10^{-1} a 10^{-3}
Baja	10^{-3} a 10^{-5}
Muy baja	10^{-5} a 10^{-7}
Prácticamente impermeable	menor de 10^{-7}

Nota: Recuperado de Whitlow, 1194

CAPITULO IV

Conclusiones

- La superficie del relleno sanitario de la ciudad de Tulcán es de 9,6 hectáreas, presenta una morfología irregular, pendiente moderada con un rango que varía entre 15% a 30% y la superficie que debe ser impermeabilizada con una capa de cobertura final es de 25545 m².
- Los resultados obtenidos en los análisis de las muestras, permiten definir que estas presentan un coeficiente de uniformidad granulométrico menor a 5 que las clasifica dentro de arcillas limosas, con un coeficiente de permeabilidad promedio $K=1,67 \times 10^{-7}$ cm/s; son arcillas de media a baja plasticidad (CL), con un índice de plasticidad (IP) entre 16 y 17, y un porcentaje de humedad óptima de 19 a 20.
- El coeficiente de permeabilidad resultante de los ensayos realizados bajo la norma ASTM D 2434-68 es de $K=1,67 \times 10^{-7}$ cm/s, por lo se puede concluir que es una arcilla apta para la construcción de barreras impermeables ideal para evitar problemas como agrietamientos y escurrimientos.
- La geomembrana es un material muy utilizado en muchos rellenos sanitarios del país, existen algunos tipos de acuerdo a su composición, entre los más utilizados está la de polietileno de alta densidad (HDPE) y polietileno de baja densidad (LLDPE), ya que presentan propiedades como: resistencia a la corrosión, resiste a altas temperaturas (>100°C), presenta un coeficiente de permeabilidad de $k=10^{-13}$, la vida útil es de 200 años. Además, el costo de implantación calculado para el relleno sanitario de Tulcán es de 8 \$/m² lo que significa que para el área a ser clausurada es de aproximadamente 204360 dólares.
- La instalación de una capa de cobertura final con arcilla, resulta económicamente rentable en el cierre técnico del relleno sanitario de la ciudad de Tulcán, con un costo aproximado por metro cúbico de 0,50 dólares ya que la arcilla se extraerá del Libre Aprovechamiento concesionado por el Municipio de Tulcán, además, se encuentra a una distancia de 2,5 km, utilizando también la maquinaria municipal para la

extracción, transporte y compactación de la arcilla, siendo esta una alternativa que ayudará a minimizar los impactos ambientales.

Recomendaciones

- Se recomienda realizar más estudios de las propiedades de las arcillas en el Ecuador ya que debido a la variedad de formaciones geológicas la composición mineralógica es diferente en cada región, por lo que sus potenciales usos son muy variados.
- Se sugiere realizar monitoreos ambientales tanto de suelo, agua y aire en la zona de influencia, después de realizada la clausura total o parcial del relleno sanitario.
- Esta investigación busca brindar una alternativa económicamente rentable y ambientalmente sustentable para que los gobiernos autónomos descentralizados cantonales puedan utilizar en sus rellenos sanitarios y en otras obras de ingeniería como diques y reservorios de agua, ya que mediante análisis de parámetros técnicos puedan caracterizar las arcillas que tienen en sus territorios para poder aprovechar sus propiedades singulares.

CAPITULO V

Bibliografía

Avila, A., Teodoro, J., & Santafé Velasquez, J. D. (2018). Uso y Comportamiento de la Geomembrana como delantal en Presa de Tierra. Universidad de Guayaquil. Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas ... ,

BAEZ T Napoleón, LOACHAMIN O Rafael, TIRADO S Rodrigo, NUÑEZ A Raúl (2009). Rocas y minerales Industriales en el Ecuador. Editorial Universitaria. Quito – Ecuador.

Bárcena, Y. A., & Hurtado, J. E. A. (2011). ENSAYOS DE PERMEABILIDAD EN MATERIALES DE BAJA DE PERMEABILIDAD COMPACTADOS.

Benavides, L. (1993). Guía para la definición y clasificación de residuos peligrosos. In Guía para la definición y clasificación de residuos peligrosos: CEPIS.

Cardenas Muga, J. L., & Pacheco, J. (2002). *Industria ceramica en el Ecuador: evaluación de las materias primas no-metalicas* (Bachelor's thesis).

Castro, F. A., & Eyzaguirre, F. M. (2006). Granulometría y textura de los peloides españoles/Granulometry and texture of spanish peloids. In *Anales de Hidrología Médica* (Vol. 1, p. 79). Universidad Complutense de Madrid.

Collazos Peñaloza, H. J. B. E. C. d. I. R. e. (2008). Diseño y operación de rellenos sanitarios. 18.

De Cortázar, A. L. G., Narea, M. S., & Llamas, S. (2017). Cierre, sellado y reinsertión de antiguos vertederos. experiencias en iberoamérica. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32, 123-139.

Díaz, L. A., & Torrecillas, R. (2002). Arcillas cerámicas: una revisión de sus distintos tipos, significados y aplicaciones.

Eguizabal, B., & Marizol, R. (2009). Guía de diseño, construcción, operación, mantenimiento y cierre de relleno sanitario manual.

Felipe, L., Uribe, P., & Hernando, S. R. J. U. M. (2010). Análisis de las características físico químicas de los suelos empleados como cobertura final en el Relleno Sanitario Doña Juana.

- Flechas, S. H., & González, L. R. C. (2016). Reflexiones sobre la importancia económica y ambiental del manejo de residuos en el siglo XXI. *Revista de Tecnología*, 15(1), 57-76.
- González Blandón, C. M., & Romo Organista, M. P. J. I. s. (2011). Estimación de propiedades dinámicas de arcillas. (84), 1-23.
- García Romero, E., & Suárez Barrios, M. (2004). Las arcillas: propiedades y usos. *Universidad de Madrid; Universidad de Salamanca*. Obtenido de <http://campus.usal.es/~delcien/doc/GA.PDF>.
- Hinojosa Pedraza, K. I. (2018). Relación entre la implementación de la ley general del medioambiente y la gestión ambiental sostenible de las municipalidades del cono norte de Lima.
- Chamba-Morales, M., Bailon-Abad, E., Calva-Jiménez, D., Chamba-Ontaneda, M., & Vásquez, E. (2019). Caracterizaciones físico-mecánicas de las arcillas de Loja y Azuay con fines de impermeabilización de reservorios. *Bosques Latitud Cero*, 9(2), 115-123.
- Chinga Gorozabel, C. V., & Pin Pico, M. E. (2013). *Incidencia de la contaminación ambiental y su repercusión en la salud de los pobladores del Sector del Botadero Municipal de la Ciudad de Portoviejo en el año 2010* (Doctoral dissertation).
- Gómez, J. M. M. (2004). Impermeabilización de embalses y vertederos con geomembrana de polietileno de alta densidad (PEAD). *Ingeopres: Actualidad técnica de ingeniería civil, minería, geología y medio ambiente*, (128), 54-58.
- Noguera, K., & Olivero, J. J. R. d. I. A. C. d. C. E., Físicas y Naturales. (2010). Los rellenos sanitarios en Latinoamérica: caso colombiano. 34(132), 347-356.
- Merino Rodriguez, P. A. (2003). *Construcción de sistemas de impermeabilización mediante geomembranas en rellenos sanitarios* (Doctoral dissertation, Universidad Andrés Bello).
- Morales, C. J. (2007). Estudio para remoción de metales pesados en los lixiviados de rellenos sanitarios. *Departamento de Ingeniería Química*.

PARRA, N., & OVANDO, E. (2012). Efecto de la velocidad de deformación en la resistencia a la tensión de geomembranas HDPE.

Pazmiño Oquendo, L. F. (2010). *Relleno sanitario de la Isla San Cristóbal, Provincia de Galápagos: Diseño e impermeabilización* (Bachelor's thesis, Quito: USFQ, 2010).

Piedrahita, N. P., Shelley, E. O., Lara, M. T., & Contreras, R. Aspectos geotécnicos de los rellenos sanitarios en México.

Ponce, R., & Yadin, B. (2018). Evaluación del comportamiento del CBRE impermeabilidad de un suelo areno-arcilloso usando el estabilizador químico sistema Consolid.

Röben, E. J. M. d. L. E. (2002). Diseño, construcción, operación y cierre de rellenos sanitarios municipales.

Romero, E. G., & Barrios, M. S. (2002). Las arcillas: propiedades y usos. Obtenido de <http://campus.usal.es/~delcien/doc/GA.PDF>

Tembrás, C. *Diseño de barreras de fondo en rellenos sanitarios de alta eficiencia en la retención de metales* (Bachelor's thesis).

Uribe, R. A. (2015). Investigaciones de materias primas minerales no metálicas en el Ecuador. *Revista Politécnica*, 36(3), 34-34.

Vásquez, Ó. C. J. R. i. d. c. a. (2011). Gestión de los residuos sólidos municipales en la ciudad del Gran Santiago de Chile: desafíos y oportunidades. 27(4), 347-355.

Bibliografía web

Geomembranas del sur. (2014). Obtenido de <http://geomembranasdelsur.com/blog>