



**UNIVERSIDAD  
DEL AZUAY**

**UNIVERSIDAD DEL AZUAY**

**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GERENCIA DE  
CONSTRUCCIONES**

**Análisis de Asentamientos y Estabilidad de Taludes de la  
Fase Dos del Relleno Sanitario de Pichacay de la ciudad de  
Cuenca**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:**

**INGENIERO CIVIL CON ÉNFASIS EN GERENCIA DE  
CONSTRUCCIONES**

**Autores:**

**PAÚL SEBASTIÁN MOREIRA MENDIETA**

**ANA ISABEL PATIÑO ORELLANA**

**Directora:**

**ING. MARÍA BELÉN ARÉVALO DURAZNO. MS.**

**CUENCA, ECUADOR**

**2021**

## **DEDICATORIA**

En primer lugar, dedico mi esfuerzo en el presente trabajo a Dios, quien es el pilar fundamental de mi espiritualidad, ya que su presencia en mi vida me ha mantenido de pie en medio de las adversidades y quien me ha motivado a mejorar día a día. A mi familia, especialmente para mis padres, pues son ellos quienes con su esfuerzo y dedicación me han formado y constituyen los motores que me impulsan a forjarme mis propias metas y a trabajar por ellas. Y, por último, para todas aquellas personas que han estado conmigo a lo largo de este camino.

### **PAÚL SEBASTIÁN MOREIRA MENDIETA**

Primero a Dios, es él quien con su infinita gracia y sabiduría ha sabido guiarme en este camino. A mis amados padres, quienes han hecho de mí una mujer valiente y con decisión para afrontar todo proyecto y reto trazado en mí día a día. A mis hermanas, quienes jamás soltaron mi mano en este arduo camino. A Lucho, quien tuvo fe en mi desde el día uno. Gracias.

### **ANA ISABEL PATIÑO ORELLANA**

## **AGRADECIMIENTO**

Nuestro agradecimiento más profundo a Dios, puesto que bajo su guía e iluminación ha sido posible la exitosa culminación del presente trabajo de titulación.

A nuestros padres, ya que con su apoyo tanto moral y presencial en los momentos necesarios del proceso, como su soporte económico para solventar los gastos, ha posibilitado el desarrollo de este proyecto.

A la Ing. María Belén Arévalo Durazno. MS y al Ing. Luis Antonio Matute Díaz. MS, por haber guiado correctamente con empeño y compromiso la realización de este trabajo y por haber contribuido con sus conocimientos, tiempo y experiencia.

Finalmente, a la Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca (EMAC EP) por la confianza depositada en nosotros al habernos proporcionado el material necesario para realizar la experimentación de este proyecto; especialmente al Ing. Mateo Centeno quien es el administrador del Relleno Sanitario de Pichacay de la ciudad de Cuenca.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTO .....	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE TABLAS .....	xvi
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xviii
RESUMEN.....	xix
ABSTRACT.....	xix
INTRODUCCIÓN .....	1
OBJETIVO GENERAL .....	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
<b>CAPÍTULO 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....</b>	<b>4</b>
1.1. Residuos Sólidos .....	4
1.1.1. Generalidades.....	4
1.1.1.1. Definición.....	4
1.1.1.2. Problema.....	4
1.1.2. Clasificación de los residuos sólidos .....	5
1.1.3. Caracterización de los residuos sólidos.....	6
1.1.3.1. Generación.....	6
1.1.3.2. Propiedades de los residuos sólidos .....	8
1.1.3.2.1. Propiedades físicas.....	8
1.1.3.2.1.1. Composición porcentual .....	8
1.1.3.2.1.2. Contenido de humedad.....	9



1.1.3.2.1.3. Densidad.....	10
1.1.3.2.2. Propiedades químicas .....	12
1.1.3.2.3. Propiedades mecánicas .....	12
1.1.3.2.3.1. Compresibilidad .....	13
1.1.3.2.3.2. Resistencia al corte.....	13
1.1.3.2.3.2.1. Cohesión.....	16
1.1.3.2.3.2.2. Ángulo de fricción interna.....	16
1.1.4. Gestión integral de los residuos sólidos.....	17
1.1.5. Normativa nacional .....	18
1.2. Relleno Sanitario .....	19
1.2.1. Generalidades.....	19
1.2.1.1. Botadero de basura a cielo abierto.....	19
1.2.1.2. Definición.....	20
1.2.1.3. Principios básicos .....	21
1.2.1.4. Vida útil.....	21
1.2.2. Tipos.....	22
1.2.2.1. Relleno sanitario mecanizado.....	22
1.2.2.2. Relleno sanitario semimecanizado .....	23
1.2.2.3. Relleno sanitario manual .....	23
1.2.3. Métodos de construcción .....	23
1.2.3.1. Método de zanja o trinchera .....	23
1.2.3.2. Método de área .....	25
1.2.3.3. Método de rampa.....	26
1.2.3.4. Método combinado.....	27
1.2.4. Ventajas y desventajas .....	28

1.2.5.	Lixiviados y biogás .....	29
1.2.5.1.	Lixiviados .....	29
1.2.5.2.	Biogás .....	30
1.2.6.	Asentamientos .....	31
1.2.7.	Impacto ambiental .....	32
1.3.	Estabilidad de Taludes .....	34
1.3.1.	Generalidades .....	34
1.3.1.1.	Definición de talud .....	34
1.3.1.2.	Definición de estabilidad .....	35
1.3.2.	Movimientos en taludes .....	35
1.3.2.1.	Desprendimientos superficiales .....	36
1.3.2.2.	Deslizamientos .....	36
1.3.2.2.1.	Rotacionales .....	37
1.3.2.2.1.1.	Falla por volcamiento .....	37
1.3.2.2.1.2.	Falla circular .....	38
1.3.2.2.2.	Traslacionales .....	39
1.3.2.2.2.1.	Rotura plana .....	40
1.3.2.2.2.2.	Falla en cuña .....	41
1.3.3.	Análisis de estabilidad de taludes .....	42
1.3.3.1.	Factores que afectan a la estabilidad .....	42
1.3.3.2.	Métodos para el análisis de estabilidad .....	44
1.3.3.2.1.	Método ordinario o de Fellenius .....	48
1.3.3.2.2.	Método de Bishop simplificado .....	50
1.3.3.2.3.	Método de Janbu simplificado .....	52
1.3.3.2.4.	Método de Spencer .....	53

1.3.3.2.5. Método de elementos finitos.....	53
<b>CAPÍTULO 2. RELLENO SANITARIO DE PICHACAY .....</b>	<b>55</b>
2.1. Antecedentes .....	55
2.2. Ubicación.....	57
2.3. Características generales .....	60
2.4. Aspectos sociales.....	61
2.4.1. Contraloría social.....	62
2.4.2. Rendición de cuentas .....	62
2.4.3. Desarrollo humano.....	62
2.4.4. Plan de emergencias .....	63
2.4.5. Certificados internacionales.....	63
2.5. Procesos operativos .....	64
2.5.1. Conformación e impermeabilización del suelo de fondo .....	64
2.5.2. Construcción de drenes de lixiviados .....	65
2.5.3. Construcción de los ductos de gases.....	67
2.5.4. Ingreso y salida de vehículos .....	68
2.5.5. Disposición final de los residuos sólidos.....	68
2.5.6. Almacenamiento de materiales reciclables.....	71
2.5.7. Manejo de los lixiviados .....	72
2.5.8. Manejo del biogás.....	74
2.5.9. Monitoreo ambiental.....	76
2.5.10. Control de vectores sanitarios.....	77
2.6. Usos futuros.....	78
<b>CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE ASENTAMIENTOS Y CONSOLIDACIÓN ....</b>	<b>80</b>
3.1. Cálculo de densidad.....	81

3.2. Asentamientos y consolidación en rellenos sanitarios .....	85
3.3. Teoría de consolidación.....	89
3.4. Cálculo de asentamientos en el Relleno Sanitario de Pichacay .....	90
3.5.1. Determinación de los polígonos de asentamientos.....	91
3.5.2. Puntos de análisis topográfico.....	93
3.5.3. Función matemática .....	96
<b>CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES .....</b>	<b>101</b>
4.1. Consideraciones iniciales .....	101
4.2. Análisis de estabilidad de taludes del Relleno Sanitario de Pichacay.....	105
4.2.1. Modelado de los taludes .....	105
4.2.2. Parámetros utilizados.....	108
4.2.2.1. Suelo de cobertura.....	108
4.2.2.2. Residuos sólidos.....	109
4.2.3. Análisis de estabilidad .....	112
4.2.3.1. Perfil 1 .....	113
4.2.3.2. Perfil 2.....	114
4.2.3.3. Perfil 3.....	115
4.2.3.4. Perfil 4.....	116
4.2.3.5. Perfil 5.....	117
4.3. Análisis de las diferentes alternativas de mejoramiento de los taludes inestables .....	119
4.3.1. Perfil 2 .....	119
4.3.2. Perfil 3 .....	121
4.4. Geometría máxima posible.....	123
<b>CAPÍTULO 5. RECOMENDACIONES DE CIERRE Y USO FUTURO .....</b>	<b>127</b>

5.1. Introducción.....	127
5.2. Problemas y alternativas.....	127
5.3. Clausura.....	128
5.4. Mantenimiento post clausura.....	130
5.4.1. Inspecciones rutinarias.....	130
5.4.2. Mantenimiento de la infraestructura.....	131
5.4.3. Sistema de supervisión ambiental.....	132
5.5. Opciones de recuperación y reinserción.....	133
5.5.1. Recuperación.....	134
5.5.1.1. Aislamiento o sellado.....	134
5.5.1.2. Retirada.....	135
5.5.1.3. Recuperación in situ.....	135
5.5.2. Reinserción.....	135
5.5.2.1. Espacio abierto y recreación.....	136
5.5.2.2. Construcción y desarrollo urbano.....	141
5.5.2.3. Uso agrícola.....	142
5.6. Ejemplos de reinserción de rellenos sanitarios clausurados.....	144
5.6.1. Tel Aviv (Israel).....	145
5.6.2. Madrid (España).....	147
5.6.3. Medellín (Colombia).....	149
5.6.4. Pensilvania (Estados Unidos).....	150
5.6.5. Georgia (Estados Unidos).....	151
5.7. Cierre y uso futuro del Relleno Sanitario de Pichacay.....	153
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>155</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>158</b>

**BIBLIOGRAFÍA..... 160**  
**ANEXOS ..... 170**

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> Comportamiento de los residuos bajo ensayos de corte, modelo de interacción entre las fuerzas de fricción y tracción.....	15
<b>Figura 1.2.</b> Abandono de la basura en un botadero a cielo abierto.....	19
<b>Figura 1.3.</b> Vista en sección de un relleno sanitario.....	20
<b>Figura 1.4.</b> Método de zanja o trinchera para la construcción de un relleno sanitario. .....	24
<b>Figura 1.5.</b> Método de área para la construcción de un relleno sanitario.....	25
<b>Figura 1.6.</b> Método de rampa para la construcción de un relleno sanitario.....	26
<b>Figura 1.7.</b> Método combinado de zanja o trinchera y área para la construcción de un relleno sanitario.....	27
<b>Figura 1.8.</b> Tipos de taludes.....	34
<b>Figura 1.9.</b> Tipos de movimientos en taludes.....	36
<b>Figura 1.10.</b> Esquemas de mecanismos de rotura por deslizamiento rotacional y traslacional.....	37
<b>Figura 1.11.</b> Esquema general de la falla al volteo.....	38
<b>Figura 1.12.</b> Esquema de la falla circular al pie del talud.....	39
<b>Figura 1.13.</b> Condiciones para la rotura plana.....	40
<b>Figura 1.14.</b> Condiciones para la rotura en cuña.....	41
<b>Figura 1.15.</b> Análisis de estabilidad por el método ordinario de dovelas.....	49
<b>Figura 1.16.</b> Análisis de estabilidad por el método de Bishop simplificado.....	51
<b>Figura 1.17.</b> Malla típica para el análisis de un talud vertical por el método de elementos finitos (MEF).....	54
<b>Figura 2.1.</b> Parque Alborada ubicada en la parroquia El Vecino.....	55
<b>Figura 2.2.</b> Ecoparque El Valle.....	56

<b>Figura 2.3.</b> Relleno Sanitario de Pichacay [Fotografía].....	57
<b>Figura 2.4.</b> Ubicación del Relleno Sanitario de Pichacay.....	58
<b>Figura 2.5.</b> Fase Norte I y Fase Norte II del Relleno Sanitario Pichacay [Ortofoto]. .....	59
<b>Figura 2.6.</b> Asociación de Recicladores.....	62
<b>Figura 2.7.</b> Plan de emergencia para el caso de: (a) derrame de lixiviados; (b) prevención contra incendios.....	63
<b>Figura 2.8.</b> Certificaciones Internacionales de las Normas ISO y OHSAS.....	64
<b>Figura 2.9.</b> Conformación e impermeabilización del suelo de fondo: (a) geomembrana de polietileno; (b) utilización de neumáticos.....	65
<b>Figura 2.10.</b> Construcción del sistema de drenaje para los lixiviados.....	66
<b>Figura 2.11.</b> Representación gráfica de un drenaje central de lixiviados.....	66
<b>Figura 2.12.</b> Construcción y colocación de la estructura y los ductos de gases.....	67
<b>Figura 2.13.</b> Pesaje de los vehículos al ingreso y salida del relleno.....	68
<b>Figura 2.14.</b> Disposición de la basura encima del sellado del suelo de fondo.....	69
<b>Figura 2.15.</b> Disposición de la basura directamente del camión recolector.....	70
<b>Figura 2.16.</b> Cierre de una terraza del relleno sanitario.....	71
<b>Figura 2.17.</b> Separación de los materiales reciclables que llegan al relleno sanitario. .....	72
<b>Figura 2.18.</b> Piscinas para la recolección de los lixiviados [Fotografía]. .....	73
<b>Figura 2.19.</b> Caseta de incineración del biogás.....	74
<b>Figura 2.20.</b> Pozo #27 que extrae el gas metano producto de la descomposición de la basura [Fotografía]. .....	75
<b>Figura 2.21.</b> (a) Bioprocesador; (b) equipo generador de energía eléctrica [Fotografía]. .....	76



<b>Figura 2.22.</b> Monitoreo ambiental del relleno sanitario: (a) calidad de agua superficial; (b) calidad de agua subterránea; (c) ruido ambiental; (d) emisiones gaseosas.....	77
<b>Figura 2.23.</b> Control de vectores sanitarios. ....	78
<b>Figura 2.24.</b> Áreas verdes de la Fase Norte I y II del Relleno Sanitario de Pichacay [Fotografía]. ....	79
<b>Figura 3.1.</b> Densidad de los residuos sólidos dispuestos en el Relleno Sanitario de Pichacay con el paso del tiempo. ....	84
<b>Figura 3.2.</b> Curva teórica de compresibilidad propuesta por Grisolia y Napoleoni (1995). ....	88
<b>Figura 3.3.</b> Ocurrencia de los diferentes mecanismos de asentamientos y su clasificación temporal de acuerdo a varios autores.....	90
<b>Figura 3.4.</b> Polígono 1 de análisis definida por la superficie de asentamientos. ....	92
<b>Figura 3.5.</b> Polígono 2 de análisis de acuerdo a la topografía del año 2019.....	93
<b>Figura 3.6.</b> Asentamientos en los puntos de análisis topográficos del polígono 1. ..	94
<b>Figura 3.7.</b> Asentamientos en los puntos de análisis topográficos del polígono 2. ..	95
<b>Figura 3.8.</b> Relación entre los asentamientos y la altura de la columna de residuos del Relleno Sanitario de Pichacay en un año. ....	97
<b>Figura 3.9.</b> Relación entre los asentamientos y la altura de la columna de residuos del Relleno Sanitario de Pichacay en diez años. ....	98
<b>Figura 4.1.</b> Ecuador, zonas sísmicas para propósitos de diseño y valor del factor de zona Z.....	104
<b>Figura 4.2.</b> Taludes y terrazas del perfil 1 del Relleno Sanitario de Pichacay.....	106
<b>Figura 4.3.</b> Taludes y terrazas del perfil 2 del Relleno Sanitario de Pichacay.....	106
<b>Figura 4.4.</b> Taludes y terrazas del perfil 3 del Relleno Sanitario de Pichacay.....	107
<b>Figura 4.5.</b> Taludes y terrazas del perfil 4 del Relleno Sanitario de Pichacay.....	107
<b>Figura 4.6.</b> Taludes y terrazas del perfil 5 del Relleno Sanitario de Pichacay.....	108

<b>Figura 4.7.</b> Parámetros geotécnicos recomendados para el diseño de rellenos sanitarios. ....	110
<b>Figura 4.8.</b> Valores de factor de seguridad locales y global del perfil 1.....	113
<b>Figura 4.9.</b> Valores de factor de seguridad locales y global del perfil 2.....	115
<b>Figura 4.10.</b> Valores de factor de seguridad global del perfil 3.....	116
<b>Figura 4.11.</b> Valores de factor de seguridad locales y global del perfil 4.....	117
<b>Figura 4.12.</b> Valores de factor de seguridad locales y global del perfil 5.....	118
<b>Figura 4.13.</b> Alternativa 1 para el mejoramiento de los taludes inestables del perfil 2. ....	120
<b>Figura 4.14.</b> Alternativa 2 para el mejoramiento de los taludes inestables del perfil 2. ....	121
<b>Figura 4.15.</b> Alternativa 1 para el mejoramiento del talud inestable del perfil 3....	122
<b>Figura 4.16.</b> Alternativa 2 para el mejoramiento del talud inestable del perfil 3....	123
<b>Figura 4.17.</b> Factores de seguridad locales y global de la geometría máxima propuesta. ....	126
<b>Figura 5.1.</b> Contención y rehabilitación de un botadero de basura.....	129
<b>Figura 5.2.</b> Ejemplo para un plan de arborización en un relleno sanitario. ....	138
<b>Figura 5.3.</b> Desviación del viento por un cerco vivo. ....	140
<b>Figura 5.4.</b> Relleno Sanitario Hiriya ubicado a las afueras de Tel Aviv, Israel [Fotografía]. ....	146
<b>Figura 5.5.</b> Propuesta de reinserción del antiguo relleno al Parque Ariel Sharon. .	147
<b>Figura 5.6.</b> Antiguo relleno de Valdemingómez de la ciudad de Madrid, España [Fotografía]. ....	148
<b>Figura 5.7.</b> Espacios de recreación del antiguo relleno sanitario de Valdemingómez [Fotografía]. ....	148
<b>Figura 5.8.</b> Relleno Sanitario de Moravia absorbido por el núcleo poblacional [Fotografía]. ....	149

**Figura 5.9.** Reconstrucción paisajística del relleno sanitario de Moravia [Fotografía].  
..... 150

**Figura 5.10.** Dos generadores eólicos instalados en el relleno sanitario de Frey Farm  
[Fotografía]. ..... 151

**Figura 5.11.** Utilización de paneles solares en el relleno sanitario de Hickory Ridge  
[Fotografía]. ..... 153

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1.</b> Fuentes de generación de residuos sólidos.....	6
<b>Tabla 1.2.</b> Composición porcentual de las diferentes fuentes de la ciudad de Cuenca. .....	9
<b>Tabla 1.3.</b> Densidades en función del grado de compactación. ....	11
<b>Tabla 1.4.</b> Programas, Políticas, Decretos, Resoluciones y Reglamentos especiales en los Países de América.....	18
<b>Tabla 1.5.</b> Posibilidad de deslizamientos causado por sismos. ....	44
<b>Tabla 1.6.</b> Métodos de análisis de estabilidad de taludes.....	45
<b>Tabla 2.1.</b> Características técnicas del Rellenos Sanitario de Pichacay.....	60
<b>Tabla 3.1.</b> Historial de pesos de residuos sólidos en el período de análisis establecido.....	81
<b>Tabla 3.2.</b> Volúmenes de corte y relleno de acuerdo a los diferentes períodos de análisis.....	82
<b>Tabla 3.3.</b> Cálculo de la densidad de los residuos sólidos dispuestos en el Relleno Sanitario de Pichacay. ....	83
<b>Tabla 3.4.</b> Tiempo en meses y días de los períodos de análisis establecidos.....	83
<b>Tabla 3.5.</b> Proyección de densidades de acuerdo al número de días desde su disposición. ....	84
<b>Tabla 3.6.</b> Rangos de asentamientos en el análisis del polígono 1. ....	94
<b>Tabla 3.7.</b> Rangos de asentamientos en el análisis del polígono 2. ....	96
<b>Tabla 3.8.</b> Parámetros utilizados para la ecuación del asentamiento. ....	99
<b>Tabla 4.1.</b> Factores de seguridad mínimos.....	103
<b>Tabla 4.2.</b> Valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada.....	104
<b>Tabla 4.3.</b> Parámetros resistentes del suelo de cobertura del Relleno Sanitario de Pichacay. ....	109

<b>Tabla 4.4.</b> Parámetros de resistencia al corte en rellenos sanitarios obtenidos por distintos autores a nivel global.....	110
<b>Tabla 4.5.</b> Parámetros resistentes de los residuos sólidos del Relleno Sanitario de Pichacay. ....	112
<b>Tabla 4.6.</b> Valores de pendientes de inclinación máxima de acuerdo a diferentes geometrías. ....	124
<b>Tabla 4.7.</b> Porcentajes de volumen adicional de las diferentes geometrías propuestas. ....	125
<b>Tabla 5.1.</b> Puntos de inspección, frecuencia y problemas potenciales que se deben observar en un relleno sanitario clausurado. ....	130
<b>Tabla 5.2.</b> Opciones de Recuperación y Reinserción de Rellenos Sanitarios. ....	133
<b>Tabla 5.3.</b> Usos recreacionales y de espacio abierto para rellenos sanitarios clausurados. ....	137
<b>Tabla 5.4.</b> Arborización del relleno (Sierra). ....	139
<b>Tabla 5.5.</b> Construcción y desarrollo urbano en rellenos sanitarios clausurados....	142
<b>Tabla 5.6.</b> Usos agrícolas en rellenos sanitarios clausurados.....	143
<b>Tabla 5.7.</b> Tipos de plantas que crecen naturalmente en los rellenos sanitarios de Loja y Macas. ....	143

**ÍNDICE DE ANEXOS**

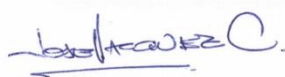
<b>Anexo 1.</b> Ensayos de laboratorio del suelo de cobertura M1. ....	170
<b>Anexo 2.</b> Ensayos de laboratorio del suelo de cobertura M2. ....	179
<b>Anexo 3.</b> Volúmenes de corte y relleno de las topografías 2018-2019. ....	188
<b>Anexo 4.</b> Volúmenes de corte y relleno de las topografías 2018-2020. ....	190
<b>Anexo 5.</b> Volúmenes de corte y relleno de las topografías 2019-2020. ....	192
<b>Anexo 6.</b> Cálculo de alturas de columnas de residuos sólidos y asentamientos de los puntos de análisis topográficos. ....	194
<b>Anexo 7.</b> Parámetros de resistencia al corte en rellenos sanitarios obtenidos por distintos autores a nivel global. ....	210
<b>Anexo 8.</b> Composición porcentual de los residuos sólidos municipales para diferentes lugares del mundo. ....	218
<b>Anexo 9.</b> Factores de seguridad obtenidos de diferentes geometrías para 6 terrazas de 5 metros de altura cada una. ....	221
<b>Anexo 10.</b> Factores de seguridad obtenidos de diferentes geometrías para 3 terrazas de 10 metros de altura cada una. ....	224
<b>Anexo 11.</b> Factores de seguridad obtenidos de diferentes geometrías para 2 terrazas de 15 metros de altura cada una. ....	226
<b>Anexo 12.</b> Factores de seguridad obtenidos de diferentes geometrías para 1 terraza de 30 metros de altura. ....	228
<b>Anexo 13.</b> Planos de ortofoto, topografías y perfiles del Relleno Sanitario de Pichacay. ....	229

**ANÁLISIS DE ASENTAMIENTOS Y ESTABILIDAD DE TALUDES DE LA  
FASE DOS DEL RELLENO SANITARIO DE PICHACAY DE LA CIUDAD  
DE CUENCA**

**RESUMEN**

El presente trabajo de titulación contiene una caracterización de la fase dos del Relleno Sanitario de Pichacay de la ciudad de Cuenca, la cual incluye el diagnóstico de su comportamiento mediante la determinación de los asentamientos y los parámetros geomecánicos recopilados de la literatura indagada para el correcto análisis de estabilidad de los taludes y la obtención de la geometría óptima posible de acuerdo a las características de los materiales previamente obtenidos con el fin de aumentar su capacidad volumétrica y por tanto su tiempo de vida útil. Por último, el estudio aporta criterios para la buena gestión de los residuos sólidos depositados y la sustentabilidad, que permita diseños con el fin de ser reutilizados a futuro.

**Palabras Clave:** Asentamientos, capacidad volumétrica, estabilidad de taludes, factor de seguridad, relleno sanitario, residuos sólidos.



---

Ing. José Fernando Vázquez Calero. MS

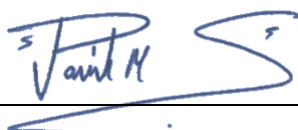
**Coordinador de Escuela**



---

Ing. María Belén Arévalo Durazno. MS

**Directora de Tesis**



---

Paúl Sebastián Moreira Mendieta

**Tesista**



---

Ana Isabel Patiño Orellana

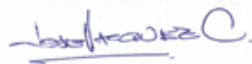
**Tesista**

**ANALYSIS OF SETTLEMENTS AND SLOPE STABILITY OF PHASE TWO  
OF THE PICHACAY SANITARY LANDFILL OF THE CITY OF CUENCA**

**ABSTRACT**

This research work contains a characterization of phase two of the Pichacay Sanitary Landfill of the city of Cuenca. It included the diagnosis of its behavior by determining the settlements and the geomechanical parameters collected from the literature investigated for the correct analysis stability of the slopes. It also got the optimal geometry possible according to the characteristics of the materials previously obtained in order to increase their volumetric capacity and therefore their useful life. Finally, the study will be based on the good management of deposited solid waste and sustainability, which allows designs in order to be reused in the future.

**Keywords:** Settlements, volumetric capacity, slope stability, safety factor, sanitary landfill, solid waste.



---

Ing. José Fernando Vázquez Calero. MS

**Coordinador de Escuela**



---

Paúl Sebastián Moreira Mendieta

**Tesista**



---

Ing. María Belén Arévalo Durazno. MS

**Directora de Tesis**

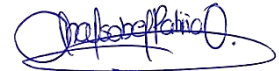


---

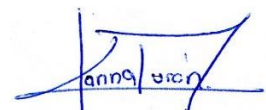
Ana Isabel Patiño Orellana

**Tesista**

**Translated by:**



Paúl Moreira and Ana Isabel Patiño





Paúl Sebastián Moreira Mendieta

Ana Isabel Patiño Orellana

Trabajo de Titulación

Ing. María Belén Arévalo Durazno. MS

Julio, 2021

**ANÁLISIS DE ASENTAMIENTOS Y ESTABILIDAD DE TALUDES DE LA  
FASE DOS DEL RELLENO SANITARIO DE PICHACAY DE LA CIUDAD  
DE CUENCA**

**INTRODUCCIÓN**

Los residuos sólidos comprenden todos los desechos provenientes de las actividades humanas, por lo que el crecimiento demográfico en la población y los cambios en los patrones de consumo y producción, conllevan al aumento en la generación de los mismos. Es por ello que, estos materiales exigen ser depositados y almacenados definitivamente en establecimientos de acopio aptos y con condiciones de seguridad estables denominados rellenos sanitarios.

Dentro del marco de la disposición final de los residuos sólidos, se plantea utilizar por un lado la geotecnia, la cual garantice la estabilidad de estos terrenos mediante el correcto diseño de sus bermas y taludes en la construcción del relleno sanitario, como también un adecuado manejo ambiental, la cual ayuda a recuperar estos espacios contaminados y abandonados, en lugares paisajísticamente agradables y seguros.

En el Relleno Sanitario de Pichacay, ubicado en la parroquia de Santa Ana de la ciudad de Cuenca, se disponen los residuos sólidos generados de la zona urbana y rural del cantón; este entró en operación el 3 de septiembre de 2001 con la primera fase hasta el 2009 y actualmente se opera la segunda fase, la cual se centra la presente investigación, prevista hasta el año 2021, recibiendo un promedio de aproximadamente 521 toneladas/día de acuerdo a la estadística del año 2019. Para un futuro, se tiene

previsto empezar con la tercera fase la cual está proyectada funcionar hasta el año 2031 (EMAC EP, 2019).

Uno de las incertidumbres más importantes que se presenta en un relleno sanitario son los grandes asentamientos a corto y largo plazo que se producen tanto por compresión mecánica (asentamiento elástico y consolidación) como por la descomposición biológica de los residuos sólidos dispuestos. El comportamiento de los residuos sólidos es bastante complejo ya que cada sociedad produce su propia basura, variable con el clima, características culturales, situación económica y hábitos de consumo. Adicionalmente, los valores de asentamiento pueden llegar a alcanzar hasta un 25% de la altura de los residuos depositados, lo que conlleva un problema en el estudio de estabilidad y capacidad real del relleno (Di Stefano, 1996).

Es por ello que la presente investigación considera proporcionar un modelo de talud tipo mediante la evaluación de las condiciones de estabilidad del Relleno Sanitario de Pichacay con el objetivo de evitar accidentes de deslizamiento a futuro y, además, aprovechar la máxima capacidad de este sitio de disposición final de la basura.

Como resultado del análisis de toda la información recopilada en el desarrollo del presente estudio, se ha plasmado recomendaciones que ayuden a mitigar los impactos medioambientales, de salud y seguridad del relleno sanitario durante su emplazamiento, diseño, construcción, operación, cierre y monitoreo a corto y largo plazo.

## **OBJETIVO GENERAL**

Calcular los asentamientos producidos dentro del período Febrero 2018 a Enero 2020 de la fase dos del Relleno Sanitario de Pichacay y desarrollar modelos de estabilidad que permitan mejorar las condiciones existentes.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Recopilar y analizar la información teórica y técnica del Relleno Sanitario de Pichacay de la ciudad de Cuenca, con el fin de conocer su diseño y comportamiento en el período de estudio establecido.
2. Determinar y analizar los asentamientos de los residuos depositados en la fase dos del Relleno Sanitario de Pichacay.
3. Modelar y calcular taludes estables desde el punto de vista técnico y ambiental para mejorar los diseños actuales y para la construcción de futuros rellenos sanitarios en la ciudad de Cuenca.
4. Proveer recomendaciones de cierre y uso futuro que se pueda dar al suelo al término de la vida útil del Relleno Sanitario de Pichacay de la ciudad de Cuenca.

## **CAPÍTULO 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA**

### **1.1. Residuos Sólidos**

#### **1.1.1. Generalidades**

##### **1.1.1.1. Definición**

De acuerdo a la Ordenanza que regula la gestión integral de los desechos y residuos sólidos en el cantón Cuenca (2014), un residuo es un “material propenso a ser reciclado, reutilizado o aprovechado de alguna forma después de haber cumplido el ciclo de vida para el cual fue creado”, muy diferente al desecho que lo define como un “material el cual no es susceptible de ser reaprovechado”.

Por otra parte, y de manera más completa y específica, el Ministerio de Desarrollo Económico de Colombia (2005) define al residuo sólido como:

Cualquier objeto, material, sustancia o elemento sólido resultante del consumo o uso de un bien en actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales o de servicios, que el generador abandona, rechaza o entrega y que es susceptible de aprovechamiento o transformación en un nuevo bien, con valor económico o de disposición final (...). Igualmente, se consideran aquellos provenientes del barrido y limpieza de áreas públicas (p. 6).

De esta forma se podría definir formalmente a los residuos sólidos como cualquiera de los muchos materiales sólidos que se desechan, eliminan o descartan como inservibles (Tchobanoglous, Theisen y Vigil, 1993), para luego ser manejados a través de un sistema de reutilización, reciclaje o tratamiento antes de su disposición final.

##### **1.1.1.2. Problema**

La inadecuada gestión de los residuos sólidos constituye uno de los grandes problemas comunes que se encuentran presentes en los países en vía de desarrollo, debido a algunos factores como: el aumento y concentración de la población, el desarrollo industrial, los cambios en los hábitos de consumo, la escasa participación ciudadana y

el uso de materiales desechables, que incrementan la cantidad de los residuos de manera considerable (Jaramillo, 2002).

Estos residuos al mezclarse, además de disminuir o perder su potencial valor comercial, afectan a la salud pública, incrementa la contaminación de los recursos naturales y deteriora la calidad de vida de las personas, las cuales se encuentran en total exposición a toda clase de enfermedades y accidentes. Es por ello, que las autoridades municipales se encuentran en la necesidad de buscar soluciones para el adecuado manejo y disposición final (Jaramillo, 2002).

### **1.1.2. Clasificación de los residuos sólidos**

De acuerdo al Ministerio del Ambiente (2015), en Ecuador se clasifican los residuos sólidos de acuerdo a su origen, manejo y composición, detallando cada una a continuación:

- Según su origen:
  - Residuos sólidos domiciliarios.
  - Residuos sólidos comerciales.
  - Residuos sólidos de construcción y demolición.
  - Residuos sólidos del barrido de calles.
  - Residuos sólidos de la limpieza de parques y jardines.
  - Residuos sólidos hospitalarios.
  - Residuos sólidos institucionales.
  - Residuos sólidos industriales.
- Según su tipo de manejo:
  - Residuos sólidos peligrosos.
  - Residuos sólidos especiales.
  - Residuos sólidos no especiales.
- Según su composición química:
  - Residuos sólidos orgánicos.
  - Residuos sólidos inorgánicos.

### 1.1.3. Caracterización de los residuos sólidos

#### 1.1.3.1. Generación

Diariamente se consume y se desecha a la basura una gran cantidad de productos, convirtiéndolos en residuos. En 2012, se recogieron alrededor de 1.300 millones de toneladas de residuos sólidos en todo el mundo y se estima que podría aumentar hasta los 2.200 millones para el año 2025 (Hoorweg y Bhada-Tata, 2012).

Este incremento en la generación de residuos sólidos provendrá, en su mayoría, de los países desarrollados y se deberá además a varios factores, entre los que más destacan: el crecimiento urbano, el desarrollo industrial, las modificaciones tecnológicas y el cambio de hábito en el consumo de la población, entre otras (SEMARNAT, 2016). Generalmente, cuanto mayor es el desarrollo económico, mayor es la cantidad de residuos sólidos producidos.

A continuación, en la Tabla 1.1, se encuentran las principales fuentes de generación de residuos sólidos, con los sitios de donde proviene cada uno y los componentes de estas actividades generadoras.

*Tabla 1.1. Fuentes de generación de residuos sólidos.*

<b>Fuente generadora</b>	<b>Sitios de generación</b>	<b>Componentes</b>
<b>Residencial y Domiciliario</b>	Viviendas unifamiliares y multifamiliares, departamentos, etc.	Desperdicios de cocina, papel, cartón, plásticos, textiles, cuero, recortes de jardín, madera, vidrio, latas, aluminio, residuos especiales (aparatos electrónicos y derivados), residuos domésticos peligrosos.
<b>Comercial</b>	Almacenes, tiendas, restaurantes, mercados, oficinas, hoteles, moteles,	Papel, cartón, plásticos, madera, residuos de comida,

	imprentas, gasolinerías, talleres automotrices, etc.	vidrio, metales, residuos especiales y peligrosos.
<b>Institucional</b>	Escuelas, colegios, universidades, hospitales, prisiones, centros gubernamentales.	Semejante al comercial.
<b>Construcción y Demolición</b>	Construcciones de vivienda, carreteras, reparaciones y trabajos de obra civil.	Madera, acero, concreto, tierra, etc.
<b>Servicios Municipales</b>	Limpieza de parques, calles, callejones y áreas públicas.	Residuos especiales, basura, basura de las calles, recorte de árboles, residuos generales de parques, playas y áreas recreativas.
<b>Plantas de tratamiento; incineradores municipales</b>	Procesos de tratamiento de aguas, residuales, industriales, etc.	Lodos residuales.
<b>Industrial</b>	Fabricación, manufactura ligera y pesada, refinerías, centrales eléctricas, etc.	Residuos de procesos industriales, materiales de chatarra, etc. Incluye residuos de comida, cenizas, residuos de construcción y demolición, residuos especiales y peligrosos.
<b>Agrícola</b>	Cosechas en campo, huertas, ganado, granjas, etc.	Residuos alimenticios echados a perder, residuos agrícolas, basura, residuos peligrosos.

*Fuente: Adaptado de Tchobanoglous et al. (1993, pp. 47-48).*

La generación de los residuos, además, varía de acuerdo a la región de donde se producen. Por ejemplo, en América Latina, la cantidad total de residuos generados al año, es de 160 millones de toneladas, con valores per cápita que oscilan entre 0,11 y 5,5 kg/habitante/día, con un promedio de 1,1 kg/habitante/día (Hoornweg y Bhada-Tata, 2012). Según las proyecciones realizadas por este mismo autor, Ecuador pasará su valor de generación per cápita de 1,13 a 1,5 kg/habitante/día desde el año 2012 al 2025.

### **1.1.3.2. Propiedades de los residuos sólidos**

Los residuos sólidos, al ser un material heterogéneo, posee propiedades físicas, químicas y mecánicas muy variadas, las cuales son importante considerar al momento de realizar un estudio para prever el comportamiento de este material en sus distintas etapas en un relleno sanitario. Múltiples accidentes se han producido debido al desconocimiento de estas propiedades y de su evolución en el tiempo.

#### **1.1.3.2.1. Propiedades físicas**

Es importante conocer las características físicas de los residuos sólidos para determinar el comportamiento del material en lo que respecta a la resistencia y respuesta de este ante cargas y otros eventos a los que puedan estar sometidos. Además, estos parámetros ayudan al momento de tomar decisiones para la implementación de acciones en el mejoramiento de los sistemas de manejo y disposición final de los residuos sólidos (Sandoval, 2010). Entre las propiedades físicas más importantes se detallan:

##### **1.1.3.2.1.1. Composición porcentual**

Los residuos sólidos están compuestos por materiales orgánicos e inorgánicos, por lo que, la composición porcentual de los mismos en un relleno sanitario es bastante heterogénea, pudiendo variar considerablemente de una región a otra, ya que esta depende del desarrollo social y económico de cada una de las regiones. Según Jaramillo (2002), los resultados de estudios latinoamericanos sobre composición de



los residuos coinciden en destacar un mayor porcentaje de materia orgánica, misma que está directamente vinculada con el contenido de humedad, permeabilidad y densidad, características que influyen en el comportamiento del material.

En el caso de Cuenca, Fiallo (2020) realizó un estudio sobre la composición de los residuos sólidos en diferentes fuentes de la ciudad, dividiéndolas en tres grupos que pertenecen a un gran porcentaje de generadores de residuos. La Tabla 1.2 muestra los valores promedios de la composición porcentual o gravimétrica obtenido de este estudio. Ahí se puede afirmar que existe una cantidad considerable de materia orgánica, la cual puede afectar directamente en las propiedades mecánicas del material que conforma las celdas de disposición en los rellenos sanitarios.

*Tabla 1.2. Composición porcentual de las diferentes fuentes de la ciudad de Cuenca.*

	<b>Domiciliarios</b>	<b>Centros Educativos</b>	<b>Comerciales</b>
<b>Materia Orgánica</b>	60,95%	46,70%	54,34%
<b>Reciclaje</b>	25,76%	33,71%	33,34%
<b>Desechables</b>	11,14%	16,73%	12,32%
<b>Otros</b>	2,14%	2,86%	0,00%

*Fuente: Elaboración Propia.*

Se debe tener en cuenta que, para este estudio las fuentes domiciliarias se clasificaron en urbano y rural, los centros educativos en particulares, fiscales y universidades, y los comerciales se dividieron en bares, restaurantes y hoteles.

#### **1.1.3.2.1.2. Contenido de humedad**

El contenido de humedad de cualquier residuo varía de acuerdo a factores, como la composición inicial de los residuos, proceso de operación en el relleno, tasa de descomposición biológica, época del año y condiciones climáticas locales, particularmente la lluvia (Palma, Espinace y Valenzuela, 1995); sin embargo, se la puede estimar conociendo la fracción porcentual de cada uno de sus componentes.

Otro de los factores a tomar en cuenta es la transferencia de humedad en el camión de basura, es decir, un componente absorbe gran parte de los desechos líquidos que se encuentran mezclados en el camión, aumentando su humedad sustancialmente. Por

ejemplo, el papel periódico tiene un contenido de humedad promedio del 7% a medida que se deposita en el basurero, pero puede alcanzar y hasta superar un contenido del 20% de humedad cuando proviene del camión de la basura (Worrell y Vesilind, 2012).

Además, se puede dar también, acumulaciones de humedad en los componentes depositados en los rellenos, debido a la presencia de materiales que retienen o bien absorben líquidos en su estructura.

#### **1.1.3.2.1.3. Densidad**

La densidad de los residuos sólidos es la relación que existe entre la masa y su unidad de volumen, este valor indica de manera directa la cantidad de residuos que pueden ser contenidos en un determinado volumen. En un relleno sanitario, esta densidad varía notablemente, dependiendo de la localización geográfica, la estación del año, la compactación y la profundidad del material, su edad, su composición y su contenido de humedad (Davis y Masten, 2005).

Según Landva y Clark (1990), Siegel, Robertson y Anderson (1990), Singh y Murphy (1990), Fassett, Leonard y Reppeto (1994) y Kavazanjian, Matasović, Bonaparte y Schmertmann (1995), los valores de densidad de los residuos se pueden situar en un rango entre 0,30 a 1,50 ton/m<sup>3</sup>. Los valores bajos corresponden a rellenos mal compactados y los valores altos a los rellenos operados adecuadamente o bien compactados.

Por su parte, Fassett et al. (1994) ordenaron estos valores de densidad de acuerdo a la energía de compactación, como se puede apreciar en la Tabla 1.3, dividiéndoles en tres grupos: mala compactación (rellenos con deficiente o nula compactación de los residuos), compactación moderada (rellenos antiguos) y buena compactación (rellenos con prácticas actuales). Estos últimos, refiere a rellenos bastante densos.

*Tabla 1.3. Densidades en función del grado de compactación.*

	<b>Mala Compactación</b>	<b>Compactación Moderada</b>	<b>Buena Compactación</b>
<b>Rango de densidad total (ton/m<sup>3</sup>)</b>	0,30 – 0,94	0,52 – 0,78	0,89 – 1,07
<b>Promedio de densidad total (ton/m<sup>3</sup>)</b>	0,54	0,70	0,97
<b>Rango de densidad seca (ton/m<sup>3</sup>)</b>	0,19 – 0,35	0,35 – 0,54	-
<b>Promedio de densidad seca (ton/m<sup>3</sup>)</b>	0,27	0,46	-

*Fuente: Fassett et al. (1994).*

De acuerdo a Jaramillo (2002), el aumento de la densidad de los residuos sólidos depositados en el relleno sanitario se logra disminuyendo su volumen, es decir, mediante:

- La compactación diaria mediante el rodillo o los pisones de mano.
- El pase de los vehículos recolectores por encima de las celdas ya conformadas.
- La práctica del reciclaje, mediante la separación y recuperación de materiales voluminosos.
- Los procesos de descomposición de la materia orgánica.
- El peso propio de las capas o celdas superiores que producen mayor carga sobre los residuos.

Es importante determinar la densidad de los residuos, debido a que, este parámetro es necesario para estimar la capacidad de rellenos y para los estudios de estabilidad (Palma et al., 1995). La estimación de esta densidad se puede determinar mediante ensayos de campo. También, a partir de los levantamientos topográficos del relleno, que ayudan a determinar su volumen, y con el registro histórico de pesos. Otra de las alternativas es determinando las densidades de cada uno de los componentes que conforman la basura, mediante el peso en porcentaje de cada uno de ellos, obteniendo así una densidad total (Moreno, 2013).

#### **1.1.3.2.2. Propiedades químicas**

Son aquellas capaces de cambiar la composición de los residuos sólidos, por lo que, es importante determinar las propiedades químicas de los componentes que conforman estos residuos, para así, obtener el tipo de tratamiento o recuperación más adecuado que se les pueda dar a los mismos (UNEP, 2005a). Si este aprovechamiento se basa en la recuperación de energía, las propiedades más destacadas incluyen los contenidos de humedad y el valor calorífico superior e inferior (Diosa, 2016), y si los residuos van a utilizarse o se caracterizan como combustibles, las propiedades más importantes a considerar son: análisis físico, punto de fusión de las cenizas, análisis químico elemental y contenido energético de los componentes de los residuos.

Cuando el contenido de materia orgánica de los residuos va a aprovecharse ya sea como compostaje o como alimento para la elaboración de otros productos de conversión biológica, no solamente es importante obtener información sobre la composición química de los elementos mayoritarios de los residuos, sino también de los elementos en pequeñas cantidades o “cantidades traza” que se puedan encontrar en su composición (Tchobanoglous et al., 1993).

#### **1.1.3.2.3. Propiedades mecánicas**

Uno de los mayores desafíos que presenta la ingeniería geotécnica es entender y cuantificar las propiedades mecánicas de los residuos sólidos, las cuales son importantes para el diseño de rellenos sanitarios y sistemas auxiliares (UNEP, 2005a). Estos materiales, al igual que los suelos, están compuestos por una parte sólida, líquida y gaseosa, y se comporta más como un suelo orgánico fibroso que como un suelo ordinario. Sin embargo, de acuerdo a Espinosa y González (2001) su comportamiento mecánico se diferencia de los residuos sólidos en dos aspectos:

- a) Los sólidos de los residuos son en un alto porcentaje biodegradables, lo cual, se descomponen al estar confinados dando lugar a gases y lixiviados.
- b) La humedad que contienen los residuos se va liberando mediante la compresión a medida que se apilan los residuos y además por la acción de la descomposición de los componentes biodegradables.

Por otra parte, Knochenmus, Wojnarowicz y Van Impe (1998) definen al análisis de compresibilidad y la resistencia al corte como dos de las más importantes propiedades mecánicas de los residuos sólidos a ser consideradas en el estudio de estabilidad de taludes en rellenos sanitarios. La interpretación de los resultados de ensayos de laboratorio y pruebas de campo de los residuos, están sujetas a incertidumbre por lo difícil y costoso que conlleva la obtención de información representativa y confiable.

#### **1.1.3.2.3.1. Compresibilidad**

La compresibilidad de los residuos sólidos es un factor importante para predecir el comportamiento de un relleno sanitario, ya que estos residuos sufren grandes asentamientos ya sea inmediatamente después de la colocación de las cargas, debido al reacomodamiento del material y los procesos de compactación, como los producidos a lo largo del tiempo, debido a la dispersión de presión intersticial y gas de los espacios vacíos de la masa de residuos, además de los procesos de degradación que se desarrollan en el interior del relleno sanitario (Sowers, 1973).

Es importante cuantificar los asentamientos y el tiempo que se extenderán, no solo por el aumento en la capacidad del relleno, debido a la reducción del volumen de vacíos de los residuos, sino también a la hora de definir la posible utilización posterior que se le pueda dar al relleno (Turcumán, Fiore y Vázquez, 2009).

La producción de los asentamientos en un relleno varía con la edad, condición fundamental en la estabilidad de este, presentando velocidades que van disminuyendo con el tiempo, pero que se mantienen apreciables durante varios años. Además, se ha comprobado que, los asentamientos son importantes durante los 10 primeros años cuando los residuos que conforman el relleno presentan un alto contenido de materia orgánica (Turcumán et al., 2009).

#### **1.1.3.2.3.2. Resistencia al corte**

Según Howland y Landva (1992), la resistencia de los residuos sólidos es de carácter friccional. Sin embargo, Mitchell R. y Mitchell J. (1992) incluyen un componente cohesivo en las evaluaciones de resistencia al corte, tomando en cuenta que la

naturaleza cohesiva de los residuos no ha sido adecuadamente caracterizada. Estos autores no hablan de una verdadera cohesión, sino creen que es el resultado que existe de la trabazón y el traslape entre las partículas que componen los residuos. La suposición se basa en la estabilidad del relleno por largos períodos de tiempo después de haber realizado un corte totalmente vertical y de gran altura en el suelo.

Por otra parte, Kölsch (1995) determina que el comportamiento de los rellenos sanitarios es similar a los rellenos de tierra armada, basado en sus resultados de ensayos de corte y triaxial de los residuos sólidos. Esta teoría añade unas fuerzas de tracción a la masa de residuos debido a los materiales fibrosos (maderas, plásticos, textiles, papel, etc.) que se encuentran en su composición. De esta forma, la resistencia al corte dependerá de la interacción potencial de las fuerzas de fricción y tracción durante una deformación por corte del material fibroso a tensión normal constante. En la Figura 1.1 se ilustra esta interacción mediante una curva esfuerzo-deformación, la cual está dividida en 4 fases:

- Fase I: Surgen fuerzas de fricción al principio causadas por pequeñas deformaciones.
- Fase II: Las fibras empiezan a ser traccionadas y la fuerza de tracción aumenta hasta alcanzar un valor máximo de esfuerzo cortante ( $Z_{max}$ ).
- Fase III: A partir del valor máximo, las fibras se rompen o se desprenden causando una disminución en las fuerzas de tracción.
- Fase IV: Con mayor deformación, el esfuerzo cortante cae a la magnitud de la fricción.

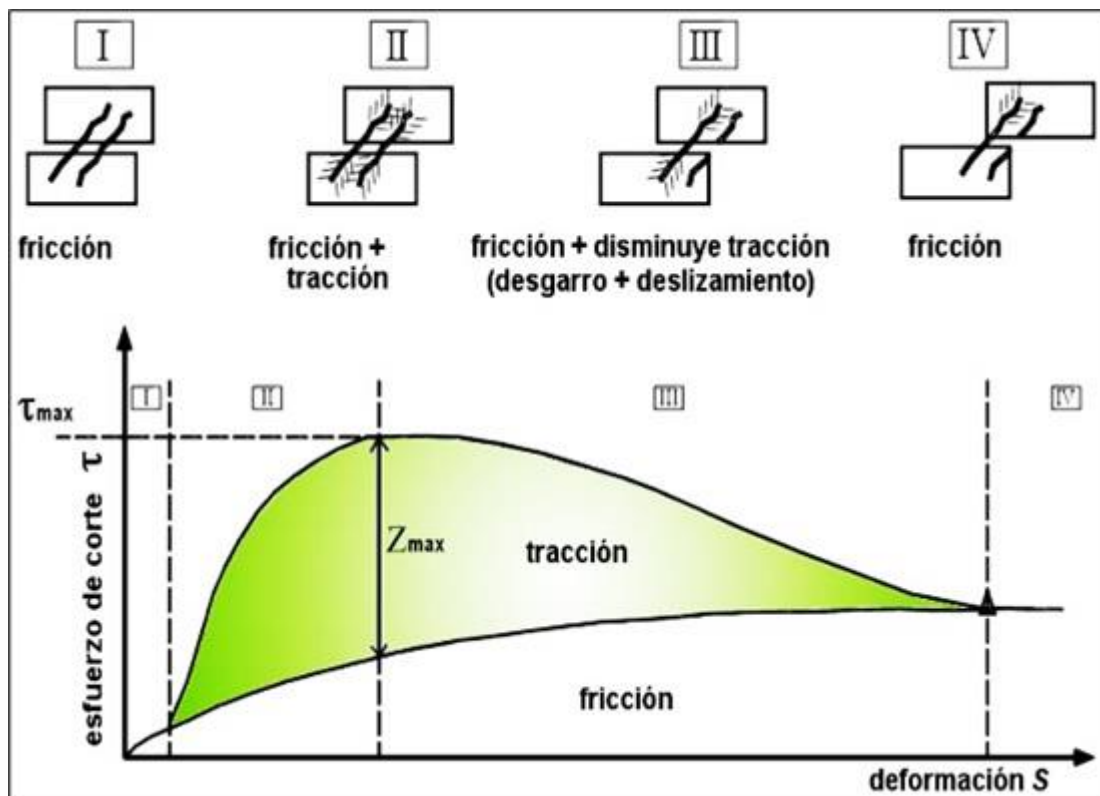


Figura 1.1. Comportamiento de los residuos bajo ensayos de corte, modelo de interacción entre las fuerzas de fricción y tracción.

Fuente: Adaptado de Kölsch (1995, p. 712).

Además de los múltiples ensayos de laboratorio para estudiar la resistencia al corte de un suelo, es posible también utilizar la teoría de Mohr-Coulomb, la cual está dada por la Ecuación 1 para condición drenada, y la Ecuación 2 para condición no drenada.

$$\tau_f = c' + \sigma' * \tan\phi' \quad (1)$$

$$\tau_f = c ; \phi = 0 \quad (2)$$

Donde:

$\tau_f$  = Esfuerzo cortante en el plano de falla.

$c'$  = Esfuerzo de cohesión efectivo.

$\sigma'$  = Esfuerzo efectivo.

$\phi'$  = Ángulo de fricción efectivo.

Al igual que en los suelos, existe una gran dificultad para determinar los parámetros resistentes de los residuos sólidos, como la cohesión y el ángulo de fricción interna, debido a la gran variedad de factores que interfieren. Sin embargo, la determinación de dichos parámetros se puede estimar a través de tres formas: ensayos de laboratorio (corte directo, triaxial), ensayos in situ y back-analysis de datos de campo (Moreno, 2013).

#### **1.1.3.2.3.2.1. Cohesión**

A diferencia de la mecánica de suelos, la cohesión en la resistencia al corte de los residuos sólidos está gobernado principalmente por la tracción que se genera debido a las partículas que componen los residuos llamadas fibras (maderas, plásticos, textiles, papel, etc.), puesto que cada material tendrá una resistencia distinta (Gomes, Lopes y Venda, 2013). Estas fibras se caracterizan por soportar esfuerzos a tensión y desarrollan sus propiedades ante deformaciones bajo esfuerzos normales. Por lo que, es importante diferenciar la cohesión de la mecánica de suelos debido a la diferencia que existe por las condiciones en las que se va desarrollando, es decir, si bien este parámetro sigue entendiéndose como el intercepto de la envolvente de falla para esfuerzo normal nulo, en los residuos sólidos no se presenta físicamente una adhesión entre partículas como sucede en los suelos finos, sin embargo, tanto el porcentaje de la fracción de suelo ordinario como la fracción de materia orgánica, contribuye a la cohesión mediante la propiedad aditiva de los residuos (Díaz e Iguarán, 2015).

#### **1.1.3.2.3.2.2. Ángulo de fricción interna**

Cuando los esfuerzos de corte sobrepasan a la “rigidez o firmeza” del material, éste llega a romperse, después de haberse encontrado en condiciones de flujo estable. Esta resistencia al corte puede estimarse mediante el conocimiento del ángulo de fricción interna del material (Manilla, Garnica y Pérez, 2003).

Por otra parte, el mecanismo friccionante de los residuos se define como el proceso que aporta a la resistencia mecánica de los mismos mediante el ángulo de fricción interna del material. Manassero, Van Impe y Bouazza (1997) definen a la “pasta” como



un compuesto heterogéneo o una mezcla de materiales que no presentan comportamiento tensionante. Sin embargo, éstas pueden generar rozamiento o fricción entre sus componentes cuando están sometidos a esfuerzos.

#### **1.1.4. Gestión integral de los residuos sólidos**

La fracción orgánica de los residuos sólidos es un componente importante, no solo porque constituye una fracción considerable de los residuos en un país de desarrollo, sino también por su potencial impacto adverso sobre la salud pública y la calidad del medio ambiente. Es por ello que, estos residuos deben ser gestionados adecuadamente, con el objetivo de proteger la salud de la población y mantener un ambiente agradable y sano (UNEP, 2005a).

De acuerdo al Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, por sus siglas en inglés), la gestión integral de los residuos sólidos refiere a un enfoque estratégico de la gestión sostenible de los residuos sólidos, que abarca una serie de actividades relacionadas al control en la generación, separación, almacenamiento, recolección, transporte, barrido, tratamiento y eliminación de manera integrada, haciendo énfasis en la maximización de la eficiencia de los recursos.

Muchos de los países a nivel global, afronta este reto de la gestión integral de residuos, concentrándose en disminuir sus volúmenes finales y generar fondos necesarios para dicha gestión. La posibilidad de desviar la mayoría de los residuos hacia generar valor de los recursos, lograría disminuir el volumen final de los residuos de una manera importante, por lo que los recursos recuperados podrían generar ingresos que ayuden a financiar toda la gestión de los residuos. Esto establece la premisa de un buen sistema integrado de residuos sólidos basado en el principio de las 3R: reducir, reutilizar y reciclar (UNEP, 2010).

### 1.1.5. Normativa nacional

Existen países que cuentan con instrumentos legales ya sean leyes, reglamentos, programas, políticas, decretos y/o resoluciones que indican los procedimientos a seguir sobre temas específicos del manejo adecuado de los residuos sólidos. En la Tabla 1.4 se presentan los instrumentos legales para el caso de Ecuador.

*Tabla 1.4. Programas, Políticas, Decretos, Resoluciones y Reglamentos especiales en los Países de América.*

<b>PAÍS</b>	<b>PROGRAMAS, POLÍTICAS, DECRETOS Y RESOLUCIONES</b>	<b>FECHA</b>	<b>ENTIDAD EMISORA</b>
	Programa Nacional para la Gestión Integral de Desechos Sólidos.	Abril de 2010	Ministerio del Ambiente
<b>ECUADOR</b>	Decreto N.º 3.516 – Políticas Nacionales de Residuos Sólidos.	4 de mayo de 2015	Título II, Libro VI: De la Calidad Ambiental, del Texto Unificado de la Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente.

*Fuente:* Adaptado de la Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS, 2018, p. 26).

## 1.2. Relleno Sanitario

### 1.2.1. Generalidades

#### 1.2.1.1. Botadero de basura a cielo abierto

El botadero de basura a cielo abierto es una de las técnicas de disposición final más antiguas que se ha utilizado para eliminar la basura que se generan en diversas actividades cotidianas. Se denomina botadero al área de vertido en la que los residuos sólidos son abandonados indiscriminadamente sin la debida planificación ni control sanitario, esto quiere decir que tanto el aire como el agua y el suelo son deteriorados o contaminados debido a la formación de gases y lixiviados que los residuos generan con el tiempo (Jaramillo, 2002).

Como se aprecia en la Figura 1.2, además de la existencia de comercios ilegales y la suciedad que se genera en los botaderos, estos representan un peligro para la salud y la seguridad humana, debido a que son cuna y hábitat de animales como: insectos, roedores, perros, cerdos, entre otros, que pueden ser transmisores de enfermedades.



*Figura 1.2. Abandono de la basura en un botadero a cielo abierto.*

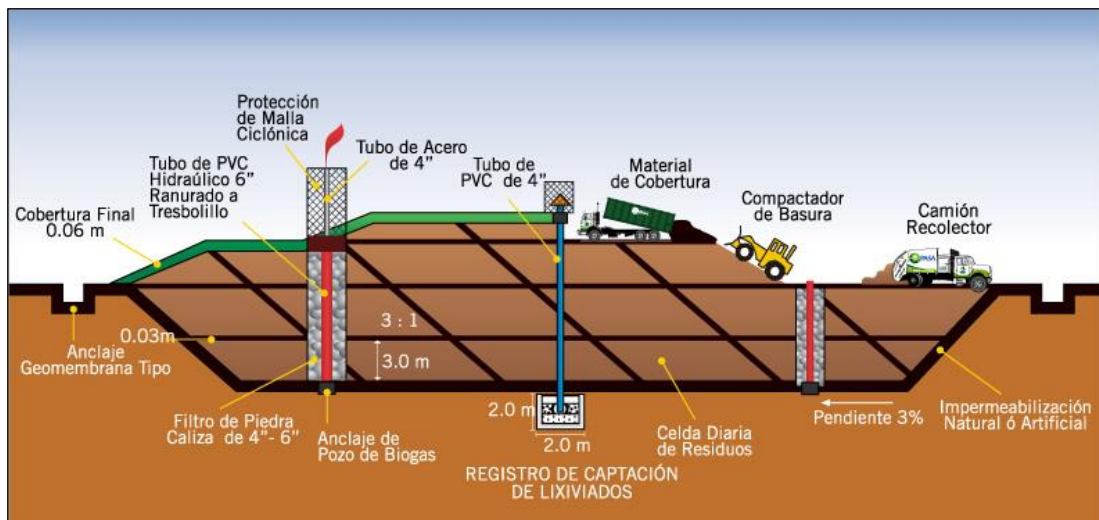
*Fuente: Jaramillo (2002, p. 41).*

Actualmente, el abandono de basura en botaderos a cielo abierto se considera una práctica irresponsable tanto para las generaciones presentes como para las futuras, debido a que esta actividad se opone al principio de desarrollo sostenible (Jaramillo, 2002).

**1.2.1.2. Definición**

El relleno sanitario se diferencia notablemente de los botaderos de basura a cielo abierto debido a que estos últimos, son lugares en el que simplemente se vierten los residuos, mientras que los rellenos sanitarios son operaciones de ingeniería diseñadas y operadas de acuerdo con las normas de cada país (Worrell y Vesilind, 2012). Por tanto, desde el punto de vista técnico y económico, el relleno sanitario es la técnica que mejor se adapta para disponer de manera sanitaria los residuos sólidos (Palma, 2018).

Por otro lado, diversos autores también han definido de forma concreta el concepto de relleno sanitario, destacando el de Jaramillo (2002) como “una técnica de disposición final de los residuos sólidos en el suelo que no causa molestia ni peligro para la salud o la seguridad pública; tampoco perjudica el ambiente durante su operación ni después de su clausura” (p. 42). Esta técnica utiliza principios de ingeniería para depositar, esparcir, acomodar, compactar y cubrir la basura en la menor área posible, además de optimizar la operación y control de los lixiviados y gases producidos por efecto de la descomposición de los residuos. En la Figura 1.3 se muestra la representación gráfica de un relleno sanitario.



*Figura 1.3. Vista en sección de un relleno sanitario.*

*Fuente: Ambiental Blog (2010).*

Así pues, el relleno sanitario es siempre el último paso en todos los sistemas de tratamiento de los residuos, debido a que, incluso con la implementación de las

técnicas de minimización en la producción de residuos, reciclaje y transformación, la eliminación de los residuos en rellenos sigue siendo un elemento importante en su adecuado sistema de gestión (Rodrigo, 2020).

#### **1.2.1.3. Principios básicos**

Los principios básicos que se deben de tomar en cuenta para el correcto funcionamiento de un relleno sanitario según Jaramillo (2002) son:

- Supervisión constante y diaria a cargo de una persona responsable de la construcción, operación y mantenimiento del relleno.
- Desviación de las aguas de escorrentía evitando su ingreso al relleno sanitario.
- Controlar la altura de las celdas diarias para disminuir problemas tanto de hundimientos como de estabilidad.
- Cubrir diariamente la basura con una capa de 0,10 a 0,20 metros de espesor con tierra o material similar.
- Una buena compactación de los residuos sólidos con capas de 0,20 a 0,30 metros cubriendo a toda la celda, para alcanzar mayor densidad y vida útil del relleno.
- Alcanzar una mayor densidad, lo cual es conveniente desde el punto de visto económico y ambiental.
- Control y drenaje de líquidos lixiviados y gases que produce el relleno, para mantener las mejores condiciones de operación, y a su vez, protegiendo al ambiente.
- Cubierta final con una sola capa de 0,40 a 0,60 metros de espesor de tierra o material similar que pueda generar y sostener vegetación, misma que va a ayudar en el mejoramiento del paisaje del relleno al momento de su clausura.

#### **1.2.1.4. Vida útil**

La vida útil del relleno depende principalmente del área del sitio de disposición final, además de estar determinada por otros parámetros como: profundidad del relleno, cantidad y características de los residuos, velocidad de distribución y la práctica de

operación. Este sitio debe seleccionarse de tal manera que la vida útil del relleno sea suficiente para recuperar la inversión del capital. En general, se recomienda que un relleno sanitario debe estar diseñado para una vida útil de al menos 10 años (UNEP, 2005a). El cálculo de la vida útil de un relleno sanitario se puede determinar mediante la Ecuación 3:

$$L = \frac{V_T}{365[Q_p(1 + F_{Q_s})]} \quad (3)$$

Donde:

$L$ = tiempo de vida útil en años.

$V_T$ = Volumen del sitio seleccionado en  $m^3$ .

$Q_p$ = Cantidad de residuos sólidos en  $m^3/día$ .

$F_{Q_s}$ = Cantidad de material de cubierta expresada como una fracción de  $Q_p$  en  $m^3/día$ .

### 1.2.2. Tipos

En relación con el mecanismo de disposición final de los residuos sólidos, más específicamente al tipo de compactación que se emplee, Jaramillo (2002) propone tres tipos de rellenos sanitarios que son los más destacados y comunes:

#### 1.2.2.1. Relleno sanitario mecanizado

El relleno sanitario mecanizado es aquel que se diseña para ciudades grandes que lleguen a generar más de 40 toneladas de residuos al día. Por lo que, al ser un proyecto sumamente complejo, no solamente requiere de la utilización de maquinaria pesada, sino que se debe tomar en cuenta factores tan importantes como: cantidad y tipo de residuos, la planificación y selección del sitio, las dimensiones del terreno, el diseño y la ejecución del relleno, etc. Para la operación de este tipo de relleno se necesita del uso de maquinaria especializada como: compactador de residuos sólidos, tractor de oruga, retroexcavadora, cargador, volqueta, entre otras (Jaramillo, 2002).

#### **1.2.2.2. Relleno sanitario semimecanizado**

El relleno sanitario semimecanizado es aquel que se diseña para poblaciones que generen entre 16 y 40 toneladas de residuos al día. En este caso, es conveniente utilizar la maquinaria pesada como complemento al trabajo y la operación manual, con el objetivo de que exista una buena compactación de la basura, estabilizar los terraplenes y aumentar la vida útil del relleno sanitario (Jaramillo, 2002).

#### **1.2.2.3. Relleno sanitario manual**

El relleno sanitario manual es aquel diseñado para pequeñas poblaciones que generen menos de 15 toneladas de residuos al día y que no tengan la posibilidad de adquirir maquinaria pesada para el manejo del relleno debido a sus condiciones económicas, es decir, por sus altos costos de operación y mantenimiento que requiere el relleno. El término “manual” refiere a la operación de los residuos mediante una cuadrilla de hombres con el empleo de algunas herramientas (Jaramillo, 2002).

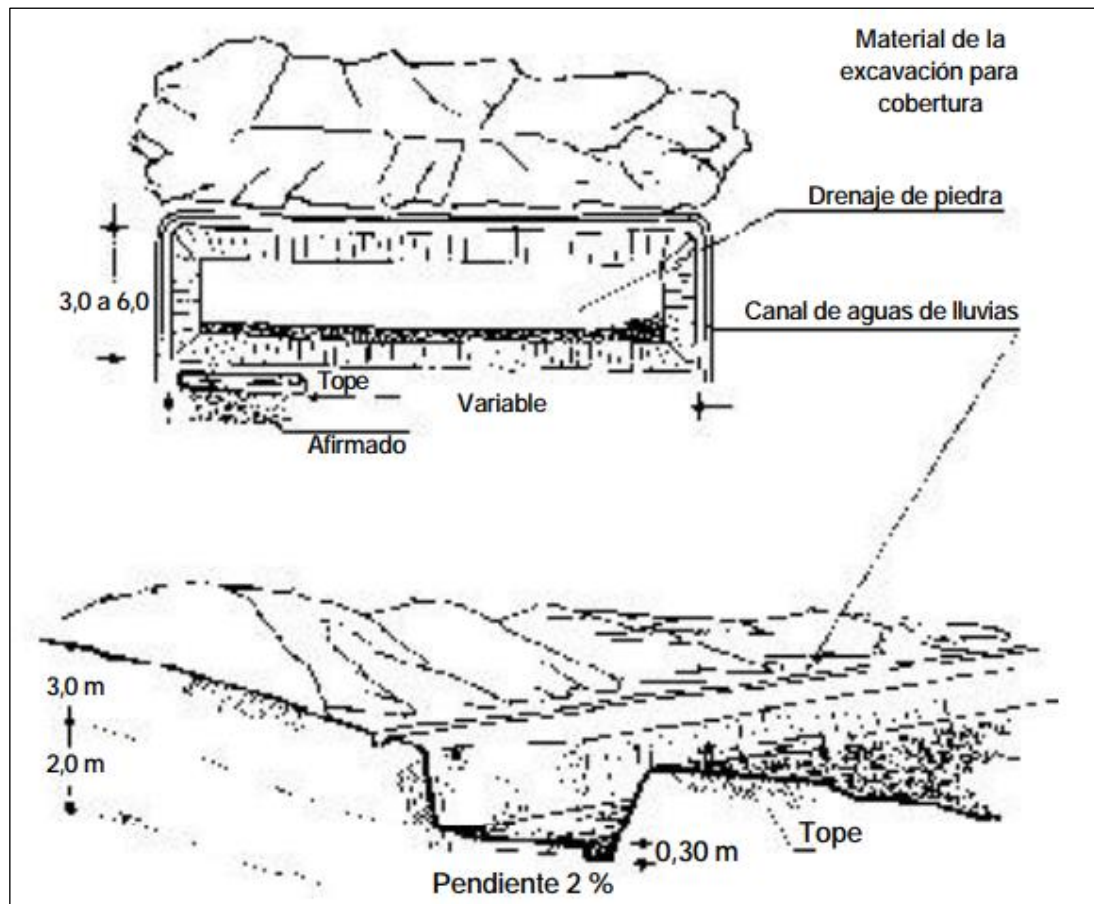
### **1.2.3. Métodos de construcción**

El método constructivo y la posterior operación de un relleno sanitario dependen principalmente de la topografía del terreno, aunque también se encuentra condicionado por el tipo de suelo y la profundidad del nivel freático (Jaramillo, 2002). De acuerdo a Collazos (2008), existen 4 métodos para la construcción de un relleno sanitario:

#### **1.2.3.1. Método de zanja o trinchera**

Este método se utiliza generalmente en terrenos con pendientes planas y exige condiciones favorables tanto en la profundidad del nivel freático como al tipo de suelo. La Figura 1.4 muestra este método, el cual consiste en realizar una zanja de 2 o 3 metros de profundidad con la ayuda de maquinaria pesada como una retroexcavadora o un tractor de orugas. Las dimensiones de la zanja se determinan en cada caso, ya que existen experiencias en donde se han excavado zanjas de hasta 7 metros de profundidad. Luego de realizada la excavación, los residuos sólidos son depositados,

acomodados y compactados, formando celdas que al final serán cubiertas con la tierra extraída de la misma zanja, siendo una gran ventaja debido a que no existe desperdicio del material. Sin embargo, no se recomienda este método para terrenos con niveles freáticos altos o próximos a la superficie debido al riesgo de contaminación, ni terrenos rocosos debido a las dificultades de excavación (Jaramillo, 2002).



*Figura 1.4. Método de zanja o trinchera para la construcción de un relleno sanitario.*

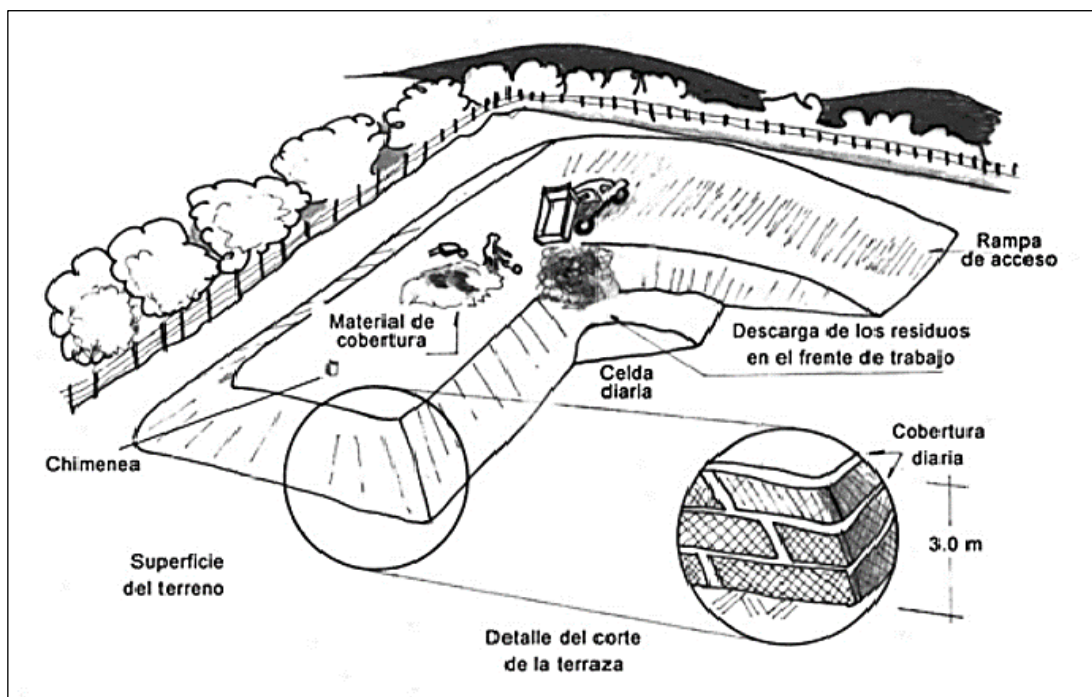
*Fuente: Jaramillo (2002, p. 46).*

Para zonas de alta precipitación se debe tener en cuenta el manejo de las aguas de escorrentía mediante canales perimétricos, debido a que estas aguas pueden ingresar a las zanjas o trincheras, aumentando la cantidad de lixiviados. En casos extremos, se realiza la construcción de un techo sobre el relleno o también mediante el bombeo del agua (Jaramillo, 2002).



**1.2.3.2. Método de área**

El método de área se emplea en terrenos o áreas planas, donde no es factible excavar zanjas o trincheras para disponer los residuos y confinarlos. Las características propias del lugar determinarán si es posible la extracción de la capa superficial como material de cobertura, caso contrario deberá ser transportado desde otros sitios. Dependiendo de las características del suelo natural, se debe nivelar e impermeabilizar el lugar previo a la disposición de los residuos. En la Figura 1.5 se observa este método constructivo, el cual consiste en depositar la basura directamente en el suelo natural ya acondicionado, para luego esparcir, compactar y recubrir diariamente con una capa de tierra. Se inicia esta operación en un extremo del área y se avanza hasta terminar en el otro extremo, conservando una pendiente suave en el talud para evitar deslizamientos en la construcción de las celdas (Jaramillo, 2002).



*Figura 1.5. Método de área para la construcción de un relleno sanitario.*

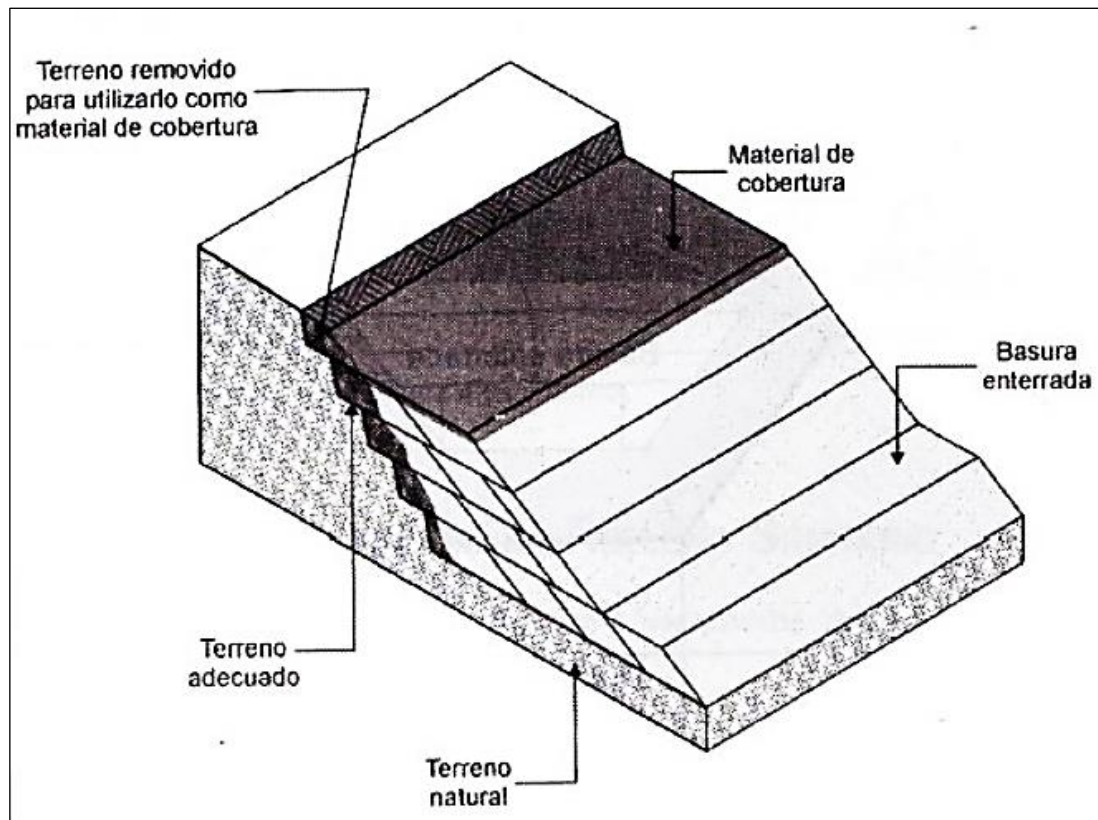
*Fuente: Jaramillo (2002, p. 46).*

Además, este método también se emplea para rellenar depresiones naturales, canteras abandonadas, pozos producidos por la extracción de materiales, terrenos adyacentes a los ríos u otros similares de algunos metros de profundidad. La operación de descarga

y construcción de las celdas debe iniciarse desde las partes más profundas hasta las más altas (Collazos, 2008).

### 1.2.3.3. Método de rampa

El método de rampa se emplea generalmente en terrenos con pendientes moderadas o más o menos pronunciadas y puede planearse de tal manera que se vayan formando escalones, como se observa en la Figura 1.6, haciendo pequeñas excavaciones en el terreno natural que puede servir como recubrimiento posteriormente. Una vez preparado el sitio, se depositan, conforman y compactan los residuos para luego ser cubiertos con dicho material inerte (Collazos, 2008).

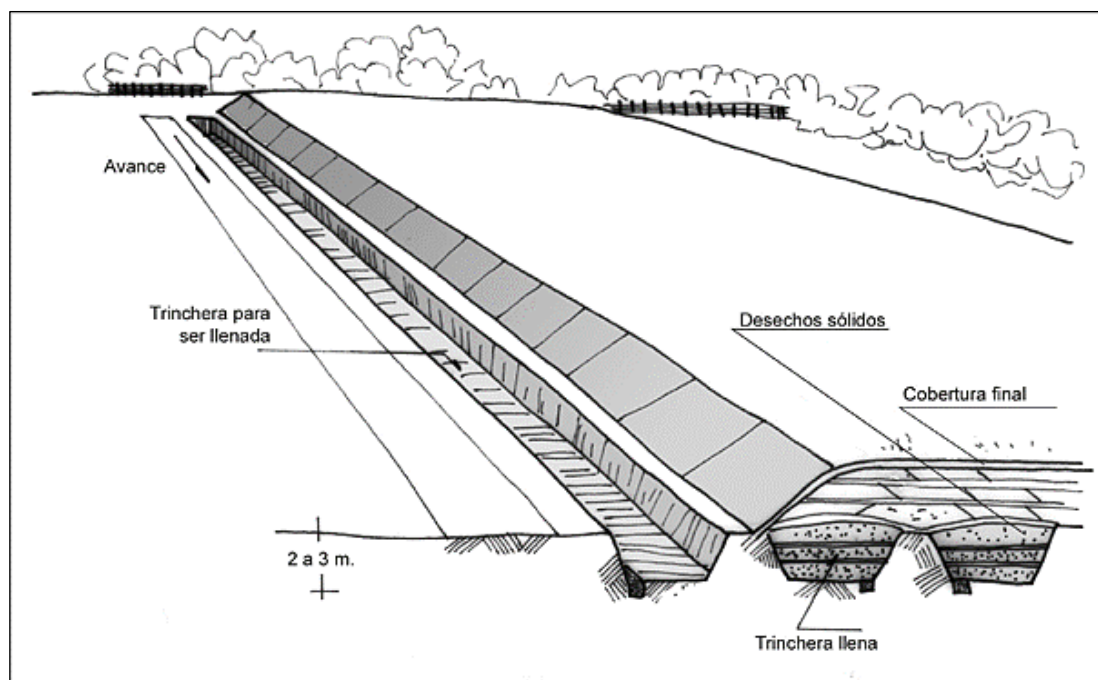


*Figura 1.6. Método de rampa para la construcción de un relleno sanitario.*

*Fuente: Collazos (2001, p. 53).*

#### 1.2.3.4. Método combinado

Este método combina el de zanja o trinchera con el de área y se emplea cuando las condiciones geohidrológicas, topográficas y físicas del sitio escogido para la construcción del relleno sanitario sean las adecuadas. Como se aprecia en la Figura 1.7, este método se aplica en terrenos planos, donde se inicia la operación por el método de zanja o trinchera y posteriormente se continúa y se culmina en la parte superior con el de área (Jaramillo, 2002).



*Figura 1.7. Método combinado de zanja o trinchera y área para la construcción de un relleno sanitario.*

*Fuente: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (OPS/CEPIS, 1997, p. 28).*

Además, este método es considerado el más eficiente debido a las siguientes ventajas que posee:

- Uso de menor área para lograr mayor volumen de disposición final de los residuos.
- Aprovechamiento del material de cobertura extraído de la excavación del mismo sitio.
- Ahorro en el transporte del material de cobertura (siempre y cuando exista en el lugar).

Sin embargo, la aplicación de este método solo es posible en lugares donde sea factible excavar, sin afectar el nivel freático y que, además, el suelo natural cuente con las características adecuadas para ser utilizado como material de recubrimiento (Eguizabal, 2011).

#### **1.2.4. Ventajas y desventajas**

Es importante destacar que los rellenos sanitarios presentan tanto ventajas como desventajas, las cuales Jaramillo (2002), resumen entre las principales:

##### **Ventajas**

- La inversión inicial de capital es menor a la que se requiere para implantar el tratamiento de los residuos, ya sea mediante las plantas de incineración o de compost.
- Menores costos de operación y mantenimiento que otros métodos de tratamiento de residuos.
- El relleno sanitario es un método completo y definitivo debido a su capacidad para recibir todo tipo de residuos, además de que puede comenzar a funcionar en corto tiempo.
- Genera empleo de mano de obra poco calificada.
- Recupera gas metano de los rellenos sanitarios que reciben más de 500 ton/día de residuos, los cuales se puede utilizar como fuente de energía.
- Reduce costos de transporte si los lugares de emplazamiento disponibles se encuentran cerca del área urbana.
- El terreno puede ser reutilizado para cualquier otra actividad, tornándolo útil para la construcción de parques, áreas verdes, etc.
- Es flexible debido a que se pueden depositar grandes cantidades de residuos diariamente sin necesidad de mucha maquinaria o personal capacitado.

##### **Desventajas**

- Difícil adquisición del terreno debido a la oposición de los habitantes del sector debido a múltiples factores como:

- Falta de conocimiento de la técnica del relleno sanitario.
  - Se asocia al relleno sanitario con el botadero de basura a cielo abierto.
  - Desconfianza en los administradores locales.
  - Falta del saneamiento físico legal del lugar.
  - Producción de lixiviados, gases y malos olores que emana el relleno.
- El rápido crecimiento territorial encarece los pocos terrenos disponibles, lo que obliga a alejar de los centros poblacionales estos sitios de disposición final.
  - Riesgo de transformación en un botadero de basura a cielo abierto debido a la falta de voluntad administrativa.
  - No se recomienda la construcción de obras pesadas al término de su vida útil debido a los asentamientos y hundimientos que presenta el relleno sanitario.
  - Se requiere del control y monitoreo del relleno luego de la clausura debido a los impactos medioambientales y el uso posterior que se le vaya a dar al terreno.
  - Devaluación de los predios o terrenos colindantes al relleno sanitario.
  - No recibe residuos peligrosos.

### **1.2.5. Lixiviados y biogás**

En el relleno sanitario, casi todos los residuos sufren cierto grado de descomposición, pero la parte orgánica es la que presenta más cambios, además de que es la causante de las emisiones de sustancias contaminantes que se pueden presentar tanto en fase líquida (lixiviados) como en fase gaseosa (biogás). Una mala gestión de estos contaminantes puede producir graves efectos negativos sobre la calidad del agua, aire y suelo (Rodrigo, 2020).

#### **1.2.5.1. Lixiviados**

El lixiviado o percolado es el líquido residual maloliente y de color negro que es generado por la descomposición o putrefacción de la basura en el relleno sanitario (Jaramillo, 2002). Dado que este líquido puede contener materiales potencialmente peligrosos, su recolección y tratamiento son un paso importante en los rellenos sanitarios de residuos sólidos (UNEP, 2005b).

El líquido ingresa en el relleno procedente de fuentes externas como: lluvia, drenaje superficial, aguas subterráneas y líquido contenido y producido debido a la descomposición de la basura (Davis y Masten, 2005). Además, contiene una gran variedad de compuestos orgánicos e inorgánicos en concentraciones relativamente bajas que pueden ser preocupante si se contaminan las aguas subterráneas y superficiales. La calidad de los lixiviados de un relleno sanitario depende principalmente de la composición de los residuos sólidos dispuestos en el relleno, el grado de compactación, la profundidad de llenado, el clima, la hidrogeología del sitio y la edad del relleno (Worrell y Vesilind, 2012).

La formación del lixiviado se produce durante toda la vida útil del relleno sanitario, incluso durante las fases de mantenimiento y después de la clausura, hasta la degradación total de los residuos, los cuales llegan a estabilizarse por completo (Ismail et al., 2011). Una vez los lixiviados son captados mediante un tubo de recogida en pendiente en el interior del relleno, son conducidos y almacenados temporalmente en tanques, bóvedas o estanques, hasta que se puedan tratar, recircular o transportar fuera del sitio para su tratamiento final y eliminación. Algunos de los posibles métodos de tratamiento de lixiviados son: lagunas aireadas, lodos activados, lagunas facultativas, extracción del metano y otros procesos biológicos que incluyen digestión anaerobia, filtración anaeróbica, entre otros (AIDIS, 2018).

#### **1.2.5.2. Biogás**

Los rellenos sanitarios contienen una fracción significativa de materia orgánica que produce distintas emisiones gaseosas. Estos gases del relleno sanitario, también denominado “biogás”, se origina en condiciones anaerobias debido a la descomposición de la basura. El biogás se genera del lixiviado y está compuesto por metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), junto con otros gases como el nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ), hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), oxígeno ( $\text{O}_2$ ) y otros compuestos en menores proporciones (Rodrigo, 2020).

El oxígeno no forma parte del biogás, sin embargo, su presencia se debe a la entrada de aire a través de los sistemas de ventilación del relleno, la cual provoca cambios en su composición, provocando una amenaza para el medio ambiente si se encuentra en

presencia del metano, debido a que si se mezcla en determinadas proporciones se puede generar riesgo de explosión (Rodrigo, 2020). Mientras las concentraciones de metano sean relativamente bajas, los gases suponen solo una molestia, pero se vuelve inflamable y explosivo si se concentra en el aire en una proporción del 5 al 15% en volumen. Si el metano llega a concentraciones más altas, simplemente se quema (UNEP, 2005a).

Según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés), el metano es 23 veces más peligroso como gas de efecto invernadero que el dióxido de carbono (Worrell y Vesilind, 2012). Sin embargo, el poder calorífico del metano es tan alto que tiene el suficiente valor económico para que muchos rellenos lo hayan recolectado con el fin de usarlo como fuente de energía (Davis y Masten, 2005).

Para la captura y conducción del biogás se instala una red de pozos verticales u horizontales dentro del relleno sanitario. Estos pozos se ventilan a la atmósfera o se conectan a un sistema de ventilación central que transporta al gas ya sea para quemarlo o para su proceso de tratamiento (Worrell y Vesilind, 2012).

#### **1.2.6. Asentamientos**

Los residuos sólidos dispuestos en un relleno sanitario experimentan grandes asentamientos que pueden prolongarse por varios años. Estos movimientos verticales pueden llegar a ser considerables ya que alcanzan hasta el 25% del espesor del relleno, los cuales influyen en el diseño, operación, clausura y uso futuro de estos sitios de disposición final (Di Stefano, 1996).

Los asentamientos, además, pueden producir grietas de varios tamaños por donde puede ingresar el agua hacia la estructura interna del relleno provocando un incremento en los lixiviados y gases y los encharcamientos de agua en la superficie que se transforman en una carga adicional para los residuos.

De acuerdo con Chen R. y Chen K. (2006), los mecanismos o principales procesos que provocan los asentamientos en un relleno sanitario de residuos sólidos son los siguientes:

- Procesos mecánicos: flexión, compresión.
- Procesos fisicoquímicos: corrosión, oxidación, combustión.
- Degradación bioquímica: descomposición, generación del biogás.
- Desgaste: erosión.
- Deslizamientos.
- Consolidación.

Por otra parte, la determinación de los asentamientos que se producen en un relleno sanitario es importante para cualquier proyecto de uso futuro, pues se necesita saber que tanto se asentarán estos lugares a largo plazo. Además, con esto se puede predecir el aumento de la capacidad volumétrica del relleno y por ende el incremento en su vida útil (Henriques, 2000).

En el apartado 3.2 se aborda más específicamente este tema de acuerdo a los requerimientos del presente estudio.

#### **1.2.7. Impacto ambiental**

La contaminación es uno de los factores más importantes de un relleno sanitario siempre y cuando los procesos de descomposición de los residuos persistan. Desafortunadamente, los procesos de descomposición continúan hasta mucho tiempo después de que el sitio ha sido cerrado (UNEP, 2005a).

Los impactos ambientales que produce un relleno sanitario generan efectos tanto para la salud de la población como para el medio ambiente, tomando en cuenta la contaminación que se da en el agua, aire y suelo.

La contaminación del agua y suelo son de los problemas más graves provocados por los rellenos sanitarios, debido a los líquidos generados por muchos de los residuos durante su proceso de descomposición, denominados lixiviados, los cuales arrastran productos tóxicos que se filtran y contaminan los cuerpos de agua adyacentes superficiales y subterráneos (Torres, Barrientos, Hernández, Gómez y Macedo, 2011).

La contaminación del aire ocurre cuando se liberan al aire grandes cantidades de gases, como el metano y dióxido de carbono, que tienen un efecto nocivo sobre la salud humana y que además son responsables del efecto invernadero. Estos gases se generan



en los sitios de disposición final de los residuos y generan problemas ambientales que van desde malos olores hasta la contribución en el aumento de la temperatura global (Kiss y Encarnación, 2006).

Sin embargo, la reducción de los impactos ambientales anteriormente mencionados, no deberían causar problemas en un relleno sanitario bien diseñado, de modo que se logre evitar la contaminación del medio en el que se encuentren. En este sentido, se deben tomar medidas para evitar la contaminación del agua, aire y suelo mediante la impermeabilización del relleno sanitario, la instalación de un sistema de recogida de los líquidos lixiviados y un sistema de recuperación de biogás (Hidalgo y Marrero, 2015).

### 1.3. Estabilidad de Taludes

#### 1.3.1. Generalidades

##### 1.3.1.1. Definición de talud

Se entiende por talud a cualquier superficie que se encuentre inclinada con respecto a la horizontal que adopte permanentemente una masa de suelo. A estas estructuras se las puede clasificar de dos maneras: natural y artificial, como se aprecia en la Figura 1.8. Los taludes naturales o “laderas” se producen sin intervención humana; en cambio, los taludes artificiales son hechos por el hombre ya sea en actividades como corte o relleno (De Matteis, 2003).

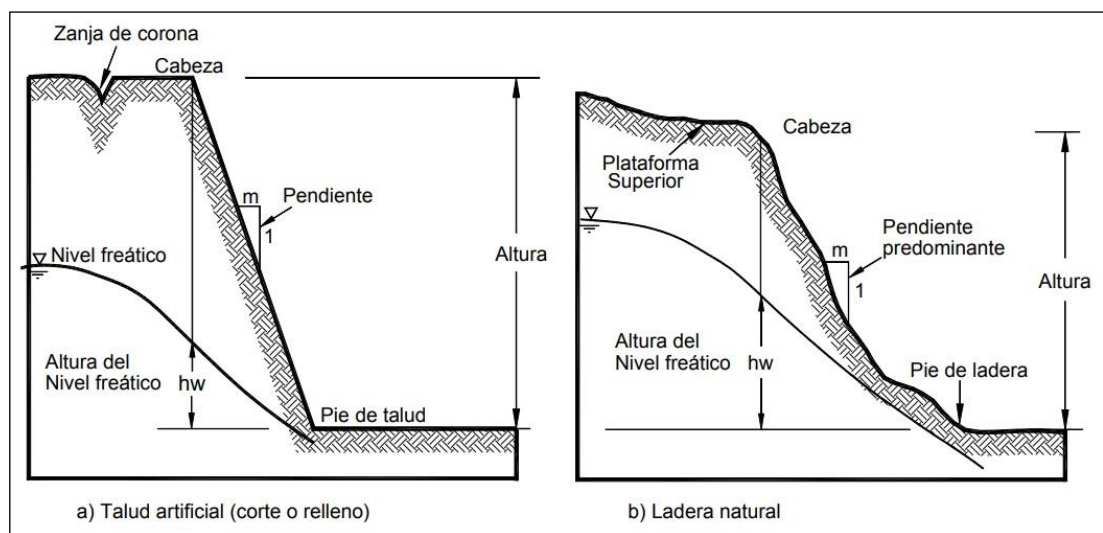


Figura 1.8. Tipos de taludes.

Fuente: Suárez (2009c, p. 3).

En algunas obras de la ingeniería civil es necesario la utilización del suelo en forma de talud como parte del resultado. Tal es el caso de los rellenos sanitarios, por ejemplo, donde se vuelve importante su análisis de estabilidad de taludes debido a que su estudio abarca problemas tanto geológicos como de mecánica de suelos (De Matteis, 2003).

Al encontrarse inclinada la masa del suelo, existe siempre la posibilidad que se produzca un deslizamiento. El resultado de esto puede ser a menudo desastroso, poniendo en peligro la pérdida de bienes y vidas humanas, así como de daños ambientales.

### **1.3.1.2. Definición de estabilidad**

Se entiende por estabilidad a la seguridad de la estructura de un suelo contra la falla o al movimiento ya sea rotacional o traslacional. La razón de su estudio es definir criterios de estabilidad de taludes, como la inclinación adecuada que debe tener un talud sin que éste llegue a caerse con el tiempo (De Matteis, 2003).

Los problemas relacionados con la estabilidad de taludes ya sean naturales o artificiales, difieren principalmente del material que lo constituye, además de las circunstancias en las que se formó el talud, las condiciones ambientales y la influencia del hombre durante su formación. Todo este proceso define aspectos tan importantes como entre otros, el flujo de las aguas subterráneas que circulan a través del suelo que conforman los taludes, el cual influye en sus condiciones de estabilidad (De Matteis, 2003).

### **1.3.2. Movimientos en taludes**

Desde el punto de vista geomecánico, los movimientos de masa constituyen desplazamientos del terreno o masas de material ayudado por la gravedad debido a que los esfuerzos cortantes superan la resistencia al corte del material, provocando lo que se considera como fallas o roturas en el talud (Moreno, 2001).

Las principales causas de estas inestabilidades en los taludes son debido a la erosión, empuje hidrostático, cambios climáticos, sismos, presiones intersticiales debido a las filtraciones, entre otras (Revelo, 2008). En la Figura 1.9 se muestran los diferentes tipos de movimientos de masas que se puedan dar para provocar la inestabilidad del suelo y por lo tanto las diferentes fallas en los taludes.

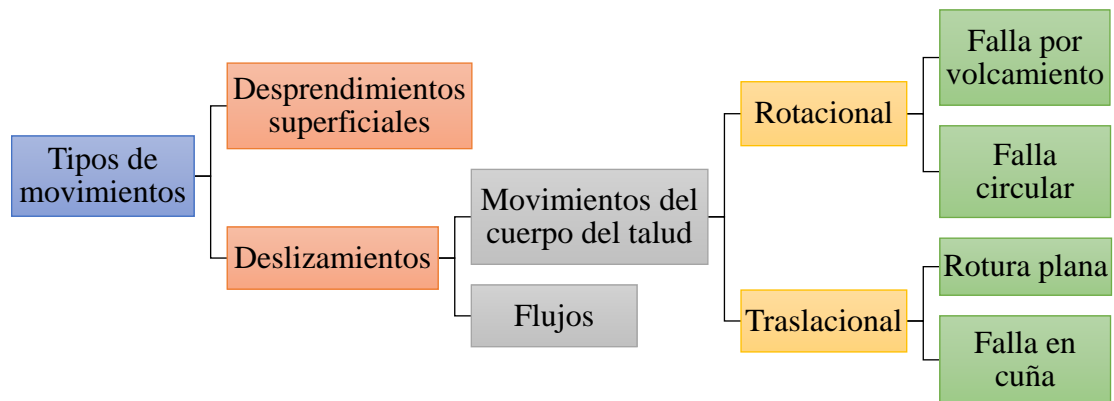


Figura 1.9. Tipos de movimientos en taludes.

Fuente: Elaboración Propia.

A continuación, se detallarán los modelos de fallas más frecuentes según diversos autores de la literatura, tomando en cuenta que los desprendimientos superficiales y los deslizamientos por flujos no son tan habituales en rellenos sanitarios.

### 1.3.2.1. Desprendimientos superficiales

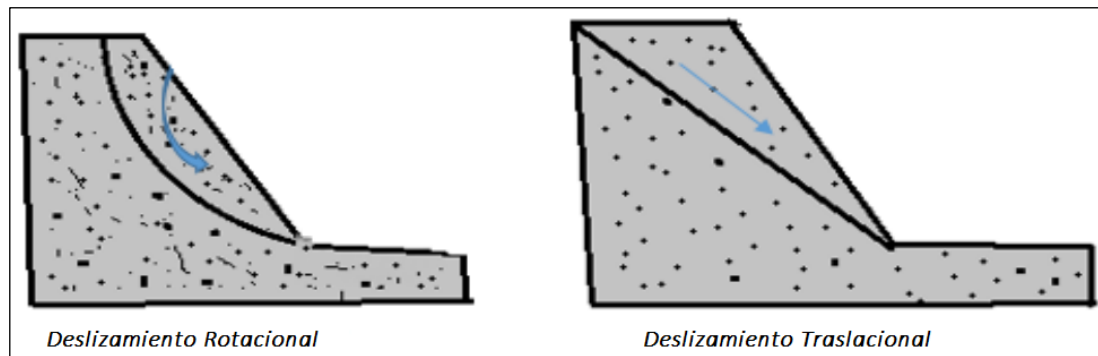
Los desprendimientos superficiales generalmente se inician debido a algunos fenómenos naturales ya sean climáticos o biológicos, provocando un movimiento hacia abajo de las partículas y porciones de suelo que se presenta en la zona superficial de los taludes (Prieto, 2011).

Estos desprendimientos pueden ser de dos clases: el estacional, el cual afecta a la corteza superficial del talud y el masivo, que afecta a las capas de suelo más profundas (De Matteis, 2003).

### 1.3.2.2. Deslizamientos

Los deslizamientos involucran la rotura y el movimiento pendiente abajo del suelo situado debajo de un talud bajo la influencia de la gravedad. Este desplazamiento ocurre a lo largo de una o varias superficies de falla donde existe una gran deformación al cortante y se genera como consecuencia entre otras, de excavaciones, rellenos, socavaciones al pie del talud, sismos y el aumento de las presiones intersticiales debido a las filtraciones del agua (De Matteis, 2003).

Según Varnes (1978), los deslizamientos se pueden clasificar según la forma que tiene dicha superficie de falla en: rotacionales y traslacionales, mismas que se ilustran en la Figura 1.10.



*Figura 1.10. Esquemas de mecanismos de rotura por deslizamiento rotacional y traslacional.*

*Fuente: Martínez (2016, p. 11).*

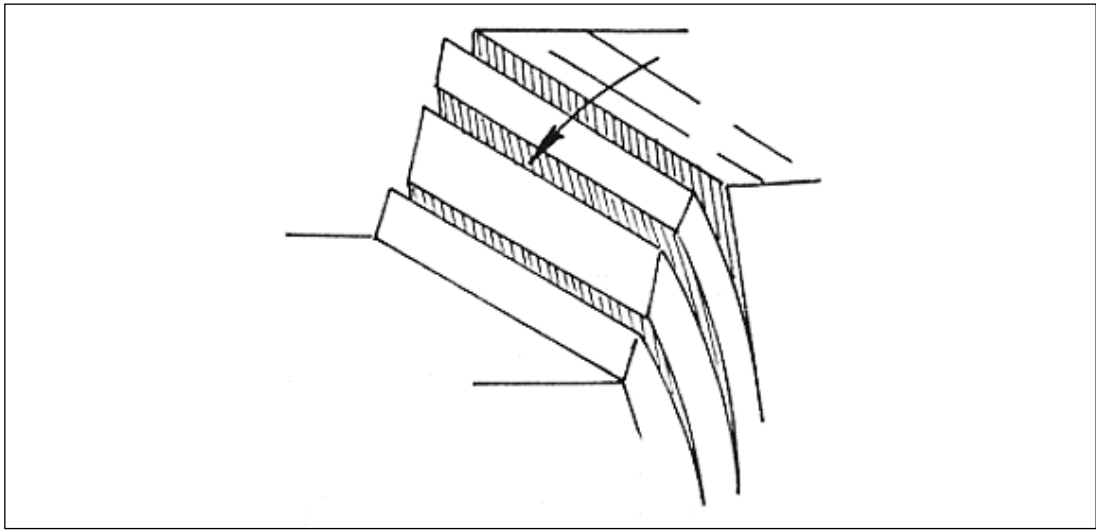
### **1.3.2.2.1. Rotacionales**

Las fallas rotacionales son movimientos del cuerpo del talud que se producen a lo largo de una superficie interna usualmente curva pero no necesariamente circular, lo cual es habitual en materiales residuales donde la resistencia al cortante incrementa con la profundidad a la que se encuentra (Suárez, 1998a). La velocidad de estos movimientos varía de acuerdo a la inclinación de la superficie de falla.

Los deslizamientos rotacionales pueden a su vez, clasificarse en: fallas por volcamiento y en fallas circulares.

#### **1.3.2.2.1.1. Falla por volcamiento**

La falla por volcamiento es un tipo de movimiento en masa en donde generalmente se produce una rotación hacia afuera del talud de uno o varios bloques del suelo desde un punto de giro situado en la parte inferior, como se puede apreciar en la Figura 1.11. Este tipo de movimiento puede darse debido a la acción de la gravedad, empujes de los bloques adyacentes o por la presión del agua que se encuentran en las grietas (Varnes, 1978).

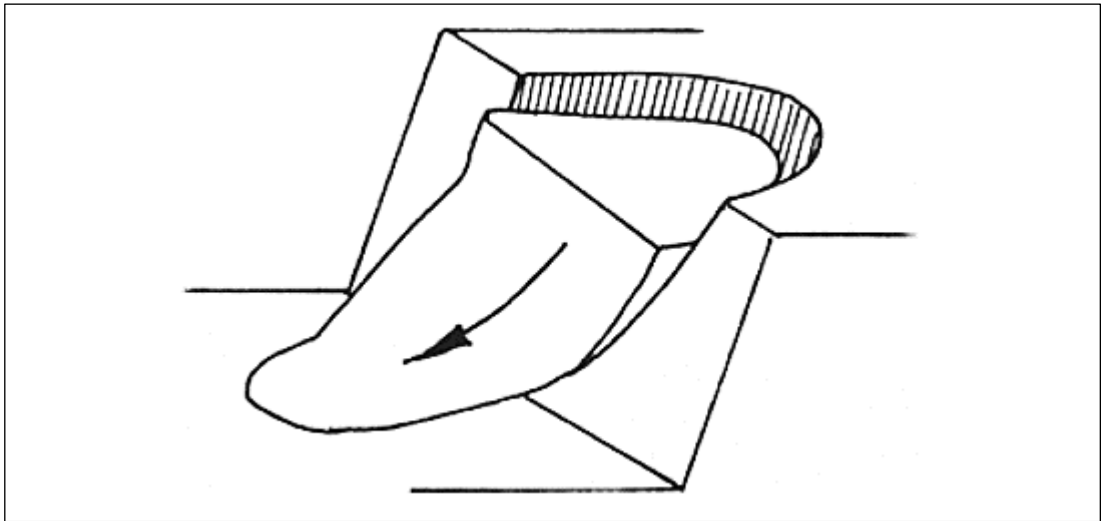


*Figura 1.11. Esquema general de la falla al volteo.*

*Fuente: Suárez (2009b, p. 324).*

#### **1.3.2.2.1.2. Falla circular**

Las fallas circulares se producen a lo largo de una superficie de rotura interna de forma aproximadamente circular. Este tipo de mecanismo de falla es el más frecuente en suelos y suele pasar su extremo inferior por el pie del talud, tal como se muestra en la Figura 1.12; sin embargo, puede también originarse en otras diferentes partes del talud, dependiendo de las características del material, altura, inclinación del talud, etc., generando así, deslizamientos de masa mucho más profundos (Ramírez y Alejano, 2004). El movimiento al ser completamente hacia abajo, forma una grieta en la parte superior donde comienza la falla, denominada grieta de tracción (Vanegas, 2010).



*Figura 1.12. Esquema de la falla circular al pie del talud.*

*Fuente: Hoek y Bray (1981, p. 29).*

Como ya se mencionó anteriormente, este tipo de falla es el más frecuente, por lo que, según Vanegas (2010), éstas pueden darse en:

- Taludes compuestos por suelo o materiales similares como por ejemplo los rellenos sanitarios.
- Terraplenes construidos.
- Cualquier tipo de relleno.
- Rocas gravemente fracturadas.

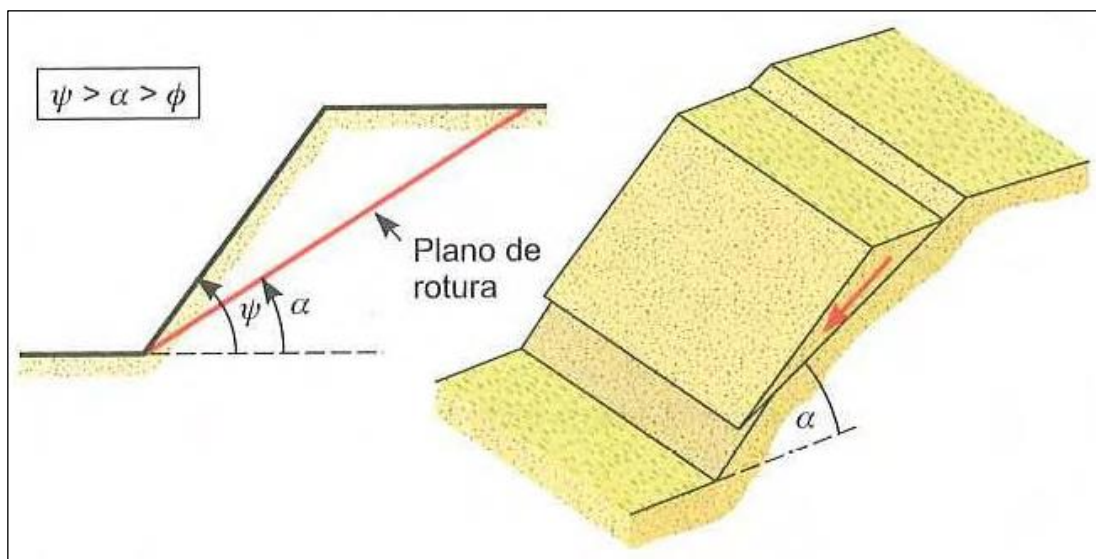
#### **1.3.2.2.2. Traslacionales**

Los desplazamientos traslacionales son los movimientos del cuerpo del talud que implica el desplazamiento hacia abajo y afuera a lo largo de la superficie de falla plano o más o menos ondulado, la cual es paralela al estrato débil cuando se encuentra a poca profundidad del talud (De Matteis, 2003). Estos movimientos generalmente se caracterizan por la gran masa que llegan a desplazar.

Los desplazamientos traslacionales pueden ser planares o en cuña.

### 1.3.2.2.1. Rotura plana

La rotura plana es un tipo de deslizamiento traslacional que se genera a partir de una única superficie plana, denominada plano de rotura, el cual, de acuerdo a González de Vallejo, Ferrer, Ortuño y Oteo (2002), su condición básica para que ocurra esta falla, es la discontinuidad que presenta el suelo buzando en la misma dirección que el talud, cumpliéndose la condición de que la discontinuidad debe presentar una menor pendiente que el talud ( $\psi > \alpha$ ) y que además, su buzamiento sea mayor que su ángulo de fricción interna ( $\alpha > \phi$ ), tal como se aprecia en la Figura 1.13.



*Figura 1.13. Condiciones para la rotura plana.*

*Fuente: González de Vallejo et al. (2002, p. 442).*

Este tipo de rotura depende principalmente de la distribución y las características de las discontinuidades del talud. Según González de Vallejo et al. (2002), las más frecuentes son:

- Rotura plana que surge en la cara o al pie del talud, con o sin grieta de tracción.
- Rotura plana paralela a la cara del talud, ya sea por erosión o por pérdida de la resistencia en el pie del talud.



### 1.3.2.2.2. Falla en cuña

La falla en cuña es un tipo de deslizamiento traslacional que ocurre cuando la rotura no es un plano, sino una intersección de dos o más planos de discontinuidades o superficies de debilidad (Ramírez y Alejano, 2004); véase los planos de discontinuidad A y B de la Figura 1.14. Para que se de este tipo de rotura, los planos deben surgir en la superficie del talud, además de cumplir las mismas condiciones que para la rotura plana ( $\psi > \alpha > \phi$ ).

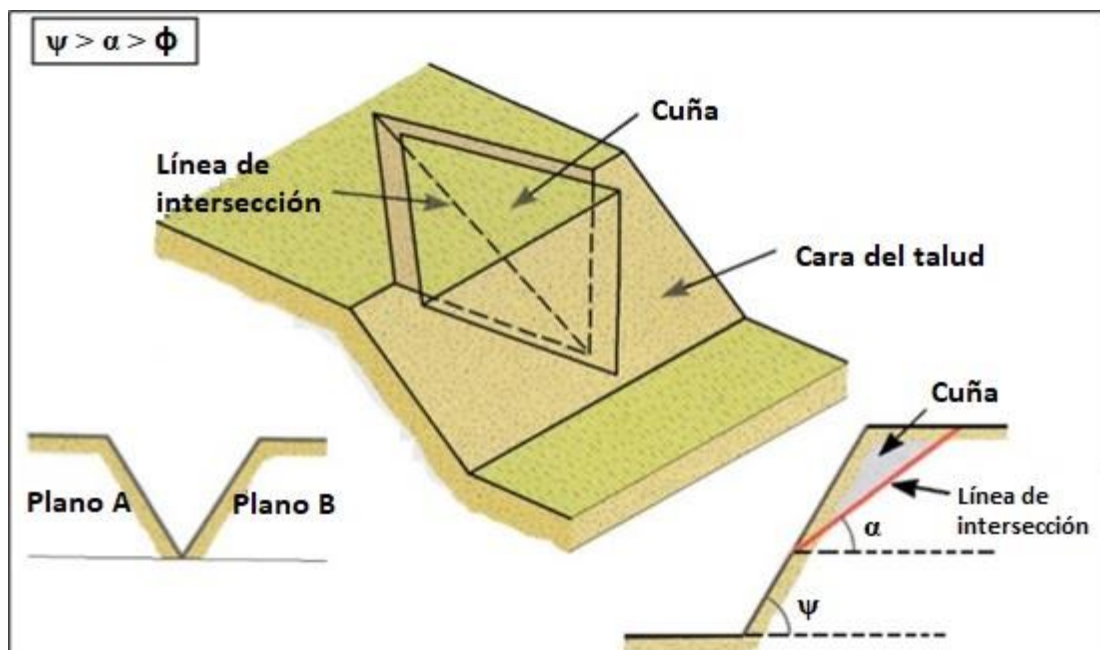


Figura 1.14. Condiciones para la rotura en cuña.

Fuente: Adaptado de González de Vallejo et al. (2002, p. 442).

Para que se produzca este tipo de falla en cuña, se deben satisfacer las siguientes condiciones básicas descritas por Markland (1972):

- La parte inferior de la línea de intersección entre los dos planos de discontinuidad debe surgir sobre la cara del talud, por encima del pie.
- La parte superior de la línea de intersección entre los dos planos de discontinuidad deben terminar por encima, en la superficie del talud o en la grieta de tracción.
- El buzamiento de la línea de intersección debe ser mayor que los ángulos de fricción de los planos de discontinuidad.

- Los esfuerzos a cortante del suelo deben ser mayor que la resistencia conjunta de los planos de discontinuidad que conforman la cuña.
- El ángulo de inclinación del talud debe exceder el ángulo de la línea de intersección que conforman los planos de discontinuidad.

### **1.3.3. Análisis de estabilidad de taludes**

#### **1.3.3.1. Factores que afectan a la estabilidad**

Los factores más importantes que afectan la estabilidad de un relleno sanitario según Shafer, Hargrove y Harris (2003) y Qian, Koerner y Gray (2002) son: la geometría, la resistencia al corte del suelo, la densidad de los residuos, la presión intersticial, los asentamientos y las operaciones realizadas en el relleno sanitario. Asimismo, Palma (2018) adiciona a otros factores como la erosión, sismicidad, infiltraciones, entre otros. A continuación, se detallarán cada uno de los mencionados:

La geometría del relleno sanitario, es decir, la altura, inclinación o pendiente, curvatura, largo y ancho de los taludes tienen un gran efecto y se deben incluir en el análisis de estabilidad del mismo, ya sea actuando de forma independiente o de manera conjunta (Espinace, Palma y Valenzuela, 2005).

De acuerdo con Shafer et al. (2003), las pendientes finales de los residuos se deben mantener tan lisas como sea práctico. Por otro lado, estos mismos autores recomiendan seleccionar los perfiles críticos para el análisis de estabilidad, esto es, seleccionar de las secciones transversales los taludes con mayores pendientes para realizar su análisis.

La resistencia al corte del suelo y las diferentes capas de material ya sean residuos o sea de cobertura, afectan a la estabilidad de los rellenos sanitarios, puesto que, esta resistencia soporta las roturas por la carga de residuos en la base del relleno. Shafer et al. (2003) recomiendan realizar ensayos de laboratorio mediante grandes cajas de corte para determinar las capas o interfaces de los diferentes materiales contenidos en el relleno.

La densidad de los residuos es un factor que afecta a las condiciones de carga del relleno sanitario. Según Shafer et al. (2003), los apilamientos de residuos sobre los rellenos existentes aumentan las cargas normales y por lo tanto consolida al suelo que

queda por debajo. Además, algunas actividades posteriores a la clausura del relleno pueden tanto incrementar como disminuir las cargas normales de la masa de residuos.

Los incrementos en las presiones intersticiales pueden tener impactos desfavorables en cuanto a la estabilidad de los rellenos. De igual manera, las disminuciones pueden estabilizar un relleno o talud. La estabilidad del relleno se puede ver afectada si no existe un control adecuado de los residuos líquidos, aguas subterráneas, infiltración del agua superficial y la recirculación de líquidos que se encuentran en la masa del relleno sanitario (Espinace et al., 2005).

Los asentamientos producidos en el relleno sanitario pueden estabilizar la masa de residuos o añadir factores para su desestabilización. Los asentamientos o depreciaciones localizadas son puntos de infiltración de aguas superficiales, los cuales incrementan la presión intersticial y por lo tanto el nivel piezométrico en el relleno (Espinace et al., 2005).

Las operaciones realizadas en el relleno sanitario generan un gran impacto en la estabilidad del mismo, por lo que Shafer et al. (2003) recomiendan mezclar los lodos con los residuos sólidos antes de ser dispuestos en el relleno, de tal manera que ocupen los espacios en los residuos cuando éstos se encuentren compactados.

Por otra parte, Palma (2018) adiciona otros factores los cuales serán importantes para el análisis de estabilidad de taludes como es la erosión, la infiltración y la sismicidad de la zona, debido a que estos fenómenos y procesos geológicos se encuentran relacionados con la degradación de la superficie del talud y por ende puede traer consigo posibles inestabilidades.

En consecuencia, la erosión del suelo es la remoción de las partículas superficiales provocadas por arrastres de viento, agua, etc. Este fenómeno es más notorio mientras más inclinadas se encuentren los taludes y se genera debido a la presencia del agua ya sea por las lluvias (pluvial) o por escurrimiento (escorrentía), que superan la resistencia a la cohesión o fricción de las partículas al estar en contacto con el suelo (Duque y Escobar, 2002).

Otro de los factores que más comúnmente se relaciona con las fallas en los taludes es el agua, debido a que la mayoría de los deslizamientos se dan después de las fuertes o largos períodos de lluvias. Es por ello, que es importante la localización de los puntos

o áreas de infiltración masiva del agua que pueden generarse en la parte superior del talud para analizar las condiciones de su estabilidad y así evitar posibles deslizamientos (Suárez, 1998b).

La ocurrencia de deslizamientos de tierra de gran magnitud es muy frecuente también en sismos, debido a que estos son fenómenos naturales causados por movimientos en la corteza terrestre de las fallas geológicas. Al darse un sismo, los esfuerzos cortantes del suelo pueden aumentar hasta tres veces más y la resistencia disminuir hasta en un 50% debido al incremento de la presión de poros y las deformaciones asociadas a esta actividad sísmica (Suárez, 2009a). En la Tabla 1.5 se puede apreciar la posibilidad de deslizamientos causados por los sismos.

*Tabla 1.5. Posibilidad de deslizamientos causado por sismos.*

<b>Magnitud del sismo</b>	<b>Tipo de deslizamiento producido</b>
<b>4.0</b>	Caídas de roca, deslizamientos de roca, caídas de suelo y alteración de masas de suelo.
<b>4.5</b>	Deslizamiento de traslación, rotación y bloques de suelo.
<b>5.0</b>	Flujos de suelo, esparcimientos laterales, deslizamientos subacuáticos.
<b>6.0</b>	Avalanchas de roca.
<b>6.5</b>	Avalanchas de suelo.

*Fuente: Suárez (2009c, p. 270).*

### **1.3.3.2. Métodos para el análisis de estabilidad**

Una de las metodologías más utilizadas para el análisis de estabilidad de taludes, según Shafer et al. (2003), es la del equilibrio límite. Esta metodología requiere información sobre la resistencia del material a analizar, mas no sobre su relación esfuerzo-deformación. Además, supone que tanto las fuerzas actuantes como las resistentes sean iguales a lo largo de toda la superficie de falla al momento que se produzca una falla, dando lugar a un factor de seguridad igual a la unidad.

Así pues, el sistema de equilibrio límite se puede analizar directamente con la toda la longitud de la superficie de falla o dividiéndola en rebanadas o dovelas a la masa de

suelo deslizada. Existen varios métodos que generalmente son de iteración y cada uno de ellos tiene su diferente grado de precisión (Suárez, 1998c). En la Tabla 1.6 se muestran algunos de ellos.

*Tabla 1.6. Métodos de análisis de estabilidad de taludes.*

<b>Método</b>	<b>Superficies de falla</b>	<b>Equilibrio</b>	<b>Características</b>
<b>Ordinario o de Fellenius (1927)</b>	Circular	De fuerzas	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ No tiene en cuenta las fuerzas entre dovelas.</li> <li>▪ No satisface equilibrio de fuerzas.</li> <li>▪ Muy utilizado por su procedimiento simple.</li> <li>▪ Muy impreciso para taludes planos con alta presión de poros.</li> <li>▪ Factores de seguridad bajos.</li> </ul>
<b>Bishop simplificado (1955)</b>	Circular	De momentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Asume que no hay fuerza cortante entre dovelas.</li> <li>▪ Solución sobredeterminada debido a que no se establecen condiciones de equilibrio para una dovela.</li> </ul>
<b>Janbu simplificado (1968)</b>	Cualquier forma	De fuerzas	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Asume que no hay fuerza cortante entre dovelas.</li> <li>▪ Solución sobredeterminada que no satisface completamente las condiciones de equilibrio de momentos.</li> <li>▪ Utiliza un factor de corrección <math>F_0</math>.</li> <li>▪ Factores de seguridad bajos.</li> </ul>

<b>Sueco modificado (1970)</b>	Cualquier forma	De fuerzas	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Supone que las fuerzas tienen la misma dirección que la superficie del terreno.</li> <li>▪ Factores de seguridad generalmente altos.</li> </ul>
<b>Lowe y Karafiath (1960)</b>	Cualquier forma	De fuerzas	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Asume que las fuerzas entre partículas se inclinan a un ángulo igual al promedio de la superficie del terreno y las bases de las dovelas.</li> <li>▪ No satisface el equilibrio de momentos.</li> <li>▪ Más preciso en equilibrio de fuerzas.</li> </ul>
<b>Spencer (1967)</b>	Cualquier forma	Fuerzas y momentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Asume la inclinación de las fuerzas laterales igual para cada dovela.</li> <li>▪ Satisface el equilibrio estático.</li> <li>▪ Asume la fuerza resultante entre dovelas con inclinación constante pero desconocida.</li> </ul>
<b>Morgenstern y Price (1965)</b>	Cualquier forma	Fuerzas y momentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Asume fuerzas laterales predeterminadas.</li> <li>▪ Asume que la fuerza resultante entre dovelas varía de acuerdo a una función arbitraria.</li> </ul>
<b>Sarma (1973)</b>	Cualquier forma	Fuerzas y momentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Asume magnitudes de fuerzas verticales predeterminado.</li> <li>▪ Utiliza el método de las dovelas para calcular el coeficiente sísmico requerido para la falla.</li> </ul>

			<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Desarrolla una relación entre el coeficiente sísmico y el factor de seguridad.</li> <li>▪ El factor de seguridad estático corresponde al caso de coeficiente sísmico nulo.</li> <li>▪ Satisface todas las condiciones de equilibrio.</li> </ul>
<b>Elementos finitos</b>	Cualquier forma	Analiza esfuerzos y deformaciones	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Satisface todas las condiciones de esfuerzo.</li> <li>▪ Se obtienen esfuerzos y deformaciones en los nodos de los elementos.</li> <li>▪ No se obtiene un factor de seguridad.</li> </ul>
<b>Espiral logarítmica (1953)</b>	Espiral logarítmica	Fuerzas y momentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Existen diferentes métodos con diversas condiciones de equilibrio.</li> </ul>

*Fuente: Adaptado de Suárez (1998, p. 122).*

El factor de seguridad (FS) es usado para el estudio de la estabilidad de un talud, el cual se obtiene de un análisis matemático de estabilidad. Este se encuentra condicionado por distintos factores como la geometría del talud, parámetros geológicos, cargas sísmicas, presencia de agua, propiedades gravimétricas del suelo, etc. Fellenius (1927) define al factor de seguridad como la relación que existe entre la resistencia y el esfuerzo al corte del material que se encuentra en el talud a lo largo de toda la superficie de falla. Esta relación se define en la Ecuación 4.

$$FS = \frac{\text{Resistencia al corte}}{\text{Esfuerzo al cortante}} \quad (4)$$

Para superficies circulares donde existe un centro de giro y momentos resistentes y actuantes, el factor de seguridad se define con la Ecuación 5.

$$FS = \frac{\textit{Momento resistente}}{\textit{Momento actuante}} \quad (5)$$

Y, para el caso de dividir la masa a estudiar en rebanadas o dovelas para realizar el equilibrio por separado, se analizan las condiciones de equilibrio de la sumatoria de fuerzas o momentos, tal como se define en la Ecuación 6.

$$FS = \frac{\Sigma \textit{Resistencias al corte}}{\Sigma \textit{Esfuerzos al cortante}} \quad (6)$$

Cabe mencionar que existen, además, otros métodos de cálculo para plantear el factor de seguridad, como por ejemplo los análisis probabilísticos, entre otros.

A continuación, se detallan algunos de los principales métodos conocidos para el cálculo del factor de seguridad aplicables en el análisis de estabilidad de taludes.

#### **1.3.3.2.1. Método ordinario o de Fellenius**

Este método fue propuesto por Fellenius en 1927, el cual asume superficies de falla circulares y consiste en dividir la masa de suelo deslizante en varias rebanadas o dovelas verticales, de tal forma que se pueda analizar por separado las fuerzas que actúan en cada una de ellas, tal como se aprecia en la Figura 1.15.



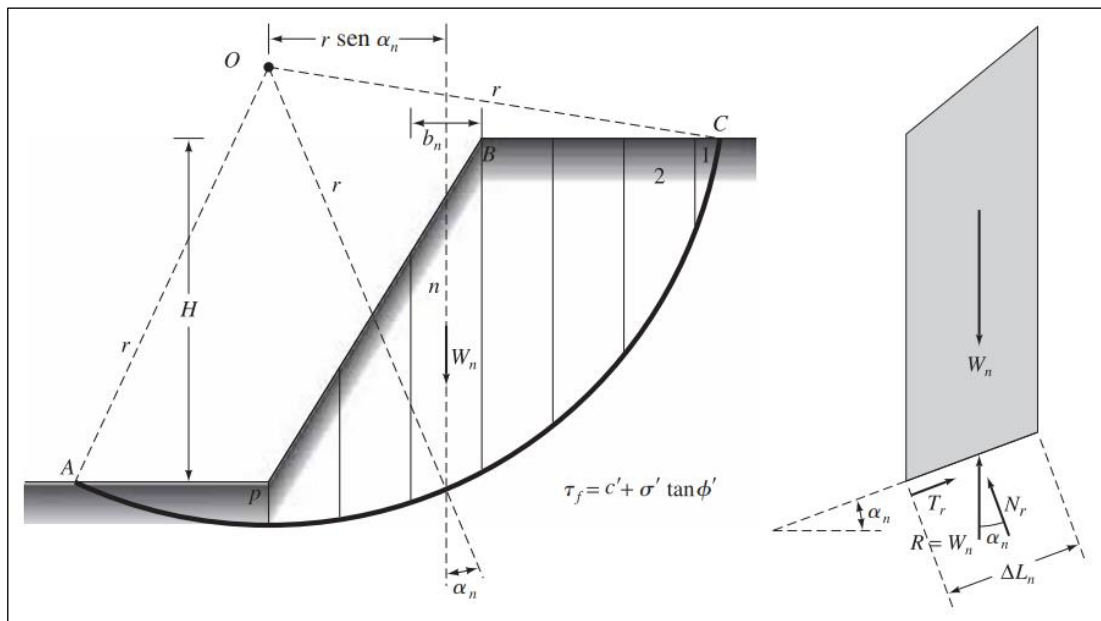


Figura 1.15. Análisis de estabilidad por el método ordinario de dovelas.

Fuente: Adaptado de Das (2015, p. 363).

De acuerdo con la sumatoria de estas fuerzas, se obtiene la relación para el cálculo del factor de seguridad, la cual se muestra en la Ecuación 7.

$$FS = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} (c' \Delta L_n + W_n \cos \alpha_n \tan \phi')}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sin \alpha_n} \quad (7)$$

Donde:

FS= Factor de seguridad por el método de Fellenius.

p= Número de dovelas.

c'= Esfuerzo de cohesión efectivo.

$\Delta L_n$ = Longitud de la base de la dovela.

$W_n$ = Peso efectivo de la dovela.

$\alpha_n$ = Ángulo que forma la base de la dovela con la horizontal.

$\phi'$ = Ángulo de fricción efectivo.

Es importante mencionar que la fórmula anterior supone una presión de poros nula. Sin embargo, la presión del agua intersticial debe tomarse en cuenta cuando se utilizan los parámetros resistentes al corte, por lo que la Ecuación 8 considera esta presión de agua de poros:

$$FS = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} [c' \Delta L_n + (W_n \cos \alpha_n - u_n \Delta L_n)] \tan \phi'}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sin \alpha_n} \quad (8)$$

Donde:

$u_n$  = Presión de poros.

Este análisis se debe repetir varias veces reubicando el centro del círculo de falla hasta determinar el factor de seguridad crítico del talud, es decir, el valor mínimo.

Se considera que este método consigue una mayor aproximación de la distribución de tensiones normales a lo largo de toda la superficie de falla y que, además, permite un análisis simplificado en cuanto a suelos no homogéneos debido a que solo se necesita definir a cada una de las dovelas de acuerdo a la distribución que tenga la masa de suelo deslizante (Cárdenas, 2013). Cabe mencionar que este método es demasiado conservador.

### 1.3.3.2.2. Método de Bishop simplificado

La hipótesis de Fellenius normalmente no cumple en taludes que tengan altas presiones intersticiales debido a que éstas son fuerzas aplicadas en las caras verticales de las dovelas que tienden a encontrarse horizontales o inclinadas dependiendo de la superficie de rotura. Es por ello que Bishop (1955) propuso una solución más refinada y a la vez mucho más compleja que el método ordinario, por lo que se utiliza un método más simplificado el cual se basa en el concepto de las dovelas para la obtención de un factor de seguridad. De la misma manera que el método anterior, se considera una superficie de ruptura circular cumpliendo con el equilibrio de momentos. La representación gráfica de las fuerzas que se consideran en este método se ilustra en la Figura 1.16.

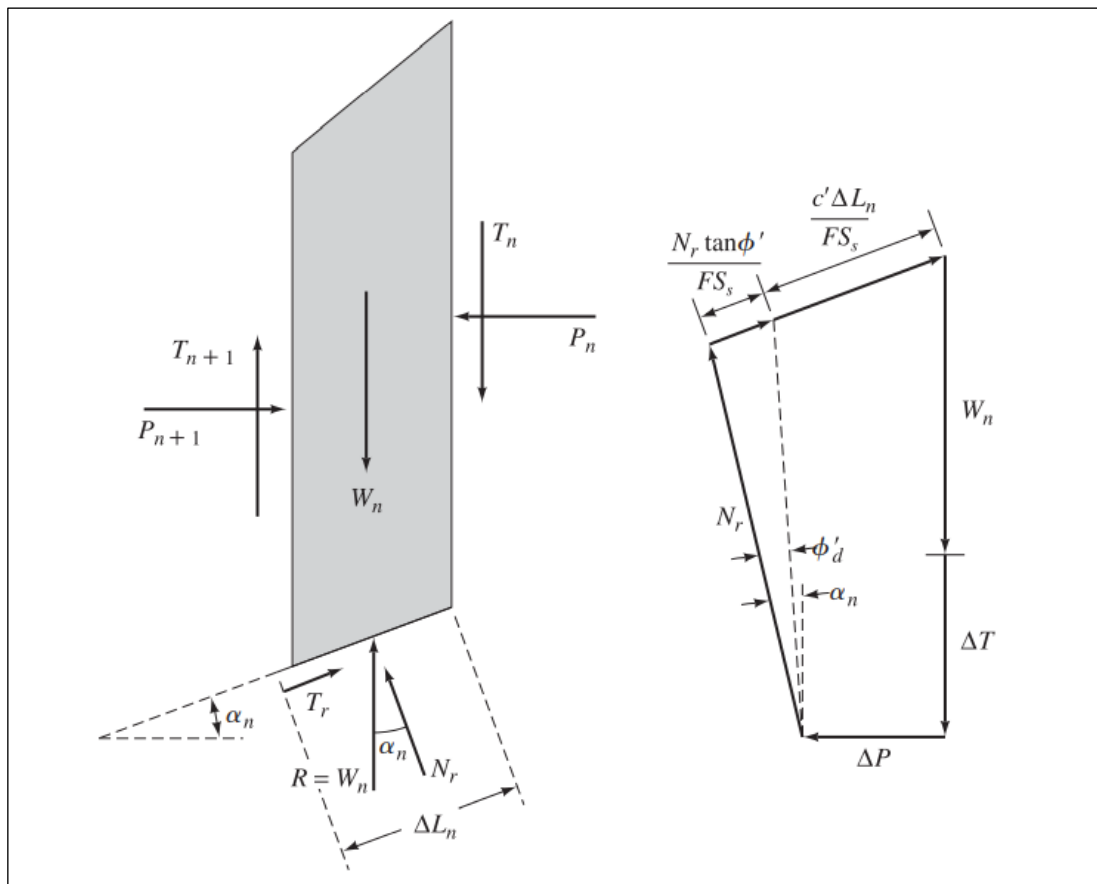


Figura 1.16. Análisis de estabilidad por el método de Bishop simplificado.

Fuente: Das (2015, p. 366).

Como ya se mencionó anteriormente, la solución al método general de Bishop es muy compleja, por lo que se utiliza la versión simplificada mediante las ecuaciones 9 y 10. Y al igual que el método ordinario de Fellenius, se debe repetir varias veces el procedimiento con diferentes superficies de falla hasta determinar la crítica, es decir, la superficie que proporcione el factor de seguridad mínimo.

$$FS = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} (c' \Delta L_n + W_n \tan \phi') \frac{1}{m_{\alpha(n)}}}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sin \alpha_n} \quad (9)$$

$$m_{\alpha(n)} = \cos \alpha_n + \frac{\tan \phi' \sin \alpha_n}{FS} \quad (10)$$

De igual manera, la Ecuación 9 supone una presión de poros nula. Por lo que, ésta se modifica en la Ecuación 11, la cual toma en cuenta esta presión del agua intersticial.

$$FS = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} [c' \Delta L_n + (W_n - u_n \Delta L_n) \tan \phi'] \frac{1}{m_{\alpha(n)}}}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sin \alpha_n} \quad (11)$$

Como se puede apreciar, el valor del factor de seguridad no aparece de manera explícita, dado que se encuentra en ambos lados de la ecuación, por lo que se debe realizar un cálculo iterativo para poder determinarlo.

Este método simplificado de Bishop es probablemente el más utilizado, debido a que produce resultados satisfactorios en la mayoría de los casos que se incorpora a un programa de computadora.

### 1.3.3.2.3. Método de Janbu simplificado

El método de Janbú (1968) es una modificación del método de Bishop simplificado, en donde las fuerzas aplicadas a cada dovela son las mismas y se representan en la Figura 1.16. Sin embargo, su análisis se puede aplicar a superficies de falla que presentan deslizamientos circulares y no circulares.

Además, es importante recalcar que este método sí cumple con el equilibrio de fuerzas horizontales, pero no el de momentos. Es por ello que en su formulación incluye un factor de corrección ( $f_o$ ) que garantice el equilibrio tanto horizontal como vertical. Este factor de corrección depende de la curvatura de que presente la superficie de falla.

La fórmula general para el cálculo del factor de seguridad de Janbu simplificado se presenta en la Ecuación 12.

$$FS = \frac{f_o \sum_{n=1}^{n=p} [c' \Delta L_n + (W_n - u_n \Delta L_n) \tan \phi'] \frac{1}{m_{\alpha(n)} \cos \alpha_n}}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \tan \alpha_n} \quad (12)$$

Donde:

$f_o$  = Factor de corrección para el método de Janbu.

Al igual que el método de Bishop simplificado, el problema general planteado por Janbu no tiene solución matemática exacta, sin embargo, los dos presentan soluciones ingenieriles muy aproximadas.

#### 1.3.3.2.4. Método de Spencer

A diferencia de los métodos presentados anteriormente, Spencer (1967) ha proporcionado un método para determinar el factor de seguridad que considere todas las fuerzas actuantes sobre cada dovela para así satisfacer las ecuaciones de equilibrio tanto de fuerzas como de momentos. Este método además supone una inclinación constante  $\theta$  de las fuerzas actuantes entre las dovelas, de tal manera que cumpla la Ecuación 13.

$$\tan \theta = \frac{X}{E} \quad (13)$$

El cálculo del factor de seguridad de Spencer está dado por las ecuaciones 14 y 15.

$$FS = \frac{[W_n(E_R - E_L) \tan \theta - \frac{\sin \alpha_n}{FS} (c' \Delta L_n - u_n \Delta L_n \tan \phi')]}{m_{\alpha(n)}} \quad (14)$$

$$m_{\alpha(n)} = \cos \alpha_n \left( 1 + \tan \alpha_n \frac{\tan \phi'}{FS} \right) \quad (15)$$

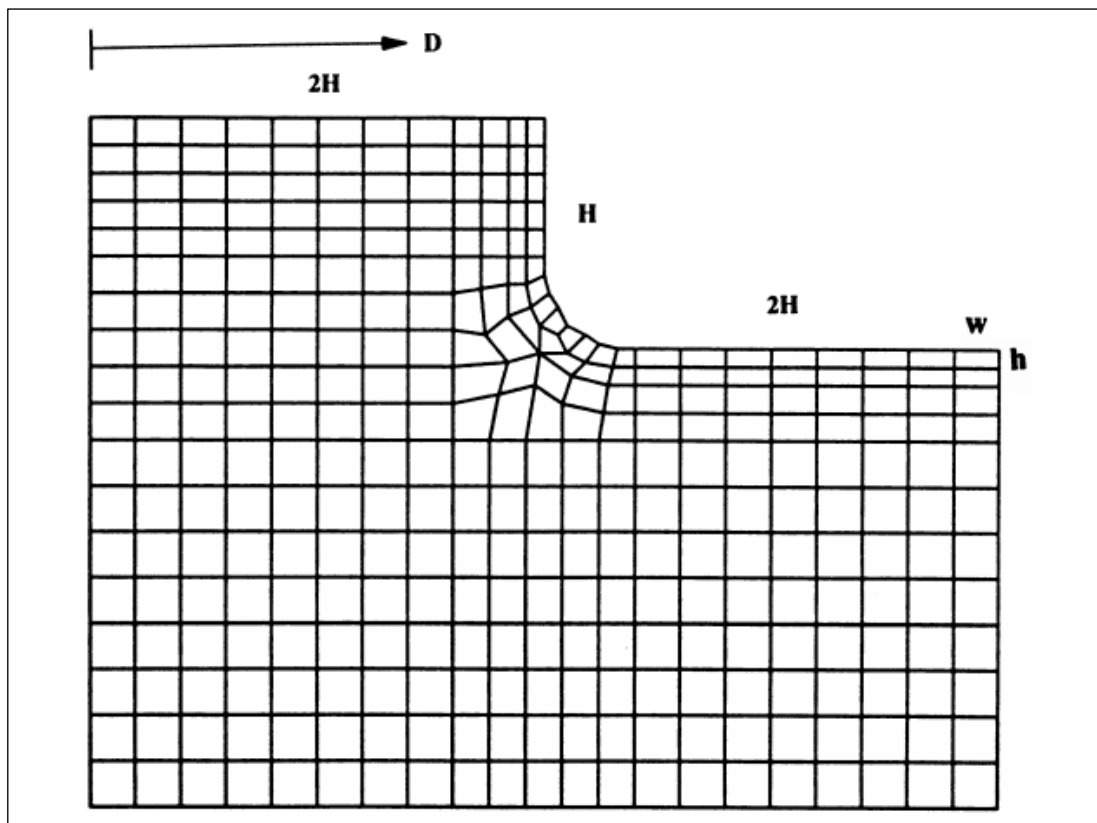
Suponiendo que el ángulo  $\theta$  es constante para todas las dovelas, se puede hacer el equilibrio independiente tanto de las fuerzas como de los momentos, de tal manera de obtener dos valores de factor de seguridad. Sin embargo, se puede determinar un solo valor de  $\theta$  para que los dos factores de seguridad sean iguales (Cárdenas, 2013).

#### 1.3.3.2.5. Método de elementos finitos

El método de elementos finitos (MEF) fue implantado por Clough y Woodward (1967) y resuelve muchas de las carencias de los métodos de equilibrio límite presentados anteriormente. Este método divide la masa de suelo deslizante en unidades discretas denominadas elementos finitos, que, a su vez son conectadas entre sí mediante sus

nodos y bordes predefinidos. Los resultados de esta formulación se presentan en forma de esfuerzos.

En la Figura 1.17 se muestra una malla típica para el análisis de estabilidad de un talud por el método de elementos finitos. Generalmente, las dimensiones de estos elementos son uniformes a lo largo de toda la malla, es decir de anchos ( $w$ ) y alturas ( $h$ ) iguales. Las formas pueden variar de acuerdo a la simplicidad del problema, siendo las más comunes y sencillas triangulares y rectangulares. El tamaño y la forma de estos son factores muy importantes debido a que influyen en los resultados obtenidos. Mientras más pequeños sean los elementos, más aproximados serán los resultados.



*Figura 1.17. Malla típica para el análisis de un talud vertical por el método de elementos finitos (MEF).*

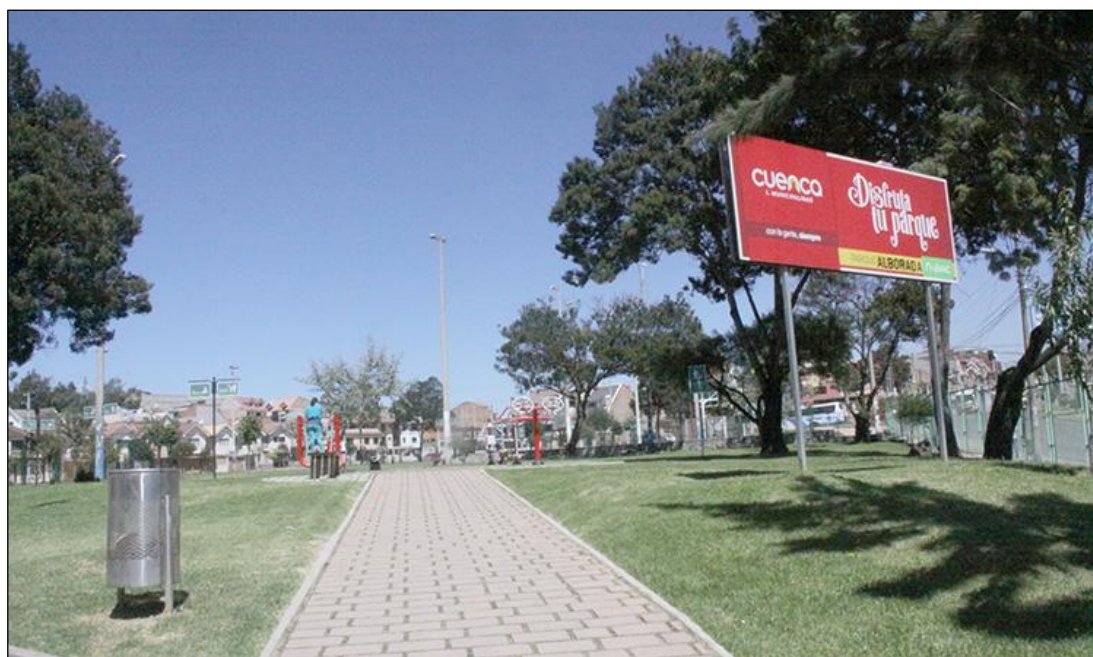
*Fuente: Adaptado de Ashford y Sitar (1994, p. 34).*

Para determinar un factor de seguridad después del cálculo de esfuerzos mediante el método de elementos finitos, se debe utilizar un método de equilibrio para definir la superficie de falla y con ello calcular un factor de seguridad medio ponderado (Oliva, 1999).

## CAPÍTULO 2. RELLENO SANITARIO DE PICHACAY

### 2.1. Antecedentes

En la ciudad de Cuenca no existen registros sobre la recolección, transporte y disposición final de los residuos sólidos antes del año 1972. A partir de ahí, se construyó el primer relleno sanitario de la ciudad de Cuenca ubicado al noreste de la ciudad, la cual constituía dos áreas: la principal en una quebrada situada en la Calle Vieja y Av. de las Américas y la segunda en un terreno frente a dicha avenida. Este relleno sanitario funcionó hasta el año 1974, recolectando alrededor de 300 toneladas de basura al día, compactándolos con un tractor de oruga y sellando la celda diaria con material de otro sitio (Inga y Romero, 2011). Después de su cierre, se construyó lo que actualmente viene siendo el parque Alborada, misma que se aprecia en la Figura 2.1.



*Figura 2.1. Parque Alborada ubicada en la parroquia El Vecino.*

*Fuente: Diario La Tarde (2017).*

El segundo relleno sanitario de la ciudad de Cuenca se asentó a 20 kilómetros al suroeste de la ciudad en la parroquia rural de El Valle. Este relleno empezó a funcionar en 1981 y tuvo una vida útil de 20 años hasta el 2001. Empezó como un botadero de basura a cielo abierto y se cerró debido a la presión de la comunidad que exigía una mejora en el aspecto vial, ya que las calles se encontraban deterioradas debido al

tránsito pesado que circulaba por ellas, además de los malos olores, aguas contaminadas, la proliferación de plagas como moscas y ratas, etc. (Inga y Romero, 2011).

Antes del cierre de este botadero, se construyeron drenajes para la captación de los líquidos lixiviados que se recolectaban en unos tanques de hormigón y, además, se colocaron tuberías que conduzcan los biogases a quemadores de alta temperatura.

Hoy en día, el antiguo botadero de basura a cielo abierto de El Valle cubre alrededor de 2 millones de toneladas de residuos en un área total de 9,5 hectáreas divididas en dos partes: una del lado Oeste que funcionó los 14 primeros años, el cual se ha transformado en pastizales para uso agrícola, y el lado Este que abarca un área de 2 hectáreas, la cual es la única que posee una capa de cobertura (Mejía y Pinos, 2011). Actualmente, este botadero funciona como un ecoparque, como se aprecia en la Figura 2.2, la cual se encuentra administrada por la EMAC EP.



*Figura 2.2. Ecoparque El Valle.*

*Fuente: Diario La Tarde (2014).*

Después del cierre del botadero de basura El Valle en 2001, empezó a operar el actual relleno sanitario de la ciudad de Cuenca en Pichacay, ubicada en la parroquia de Santa Ana, misma que se observa en la Figura 2.3. Este relleno cuenta con el equipo y personal adecuado y capacitado para la correcta operación del mismo, basándose en



experiencias adquiridas, la cual promete brindar una adecuada disposición final de la basura generada por la ciudad de Cuenca y sus alrededores (Inga y Romero, 2011).



*Figura 2.3. Relleno Sanitario de Pichacay [Fotografía].*

*Fuente: Elaboración Propia (21 de junio, 2019).*

## **2.2. Ubicación**

El Relleno Sanitario de Pichacay es uno de los componentes del Complejo de Desarrollo Humano y Ambiental Pichacay, el cual se encuentra ubicado en la parroquia de Santa Ana, a 21 kilómetros de la ciudad de Cuenca, como se muestra en la Figura 2.4. Este complejo cubre un área aproximada de 123 hectáreas y se encuentra a una altura de 2619 m.s.n.m., con coordenadas geográficas:

2° 57' 56.10'' S

78° 55' 47.96'' O

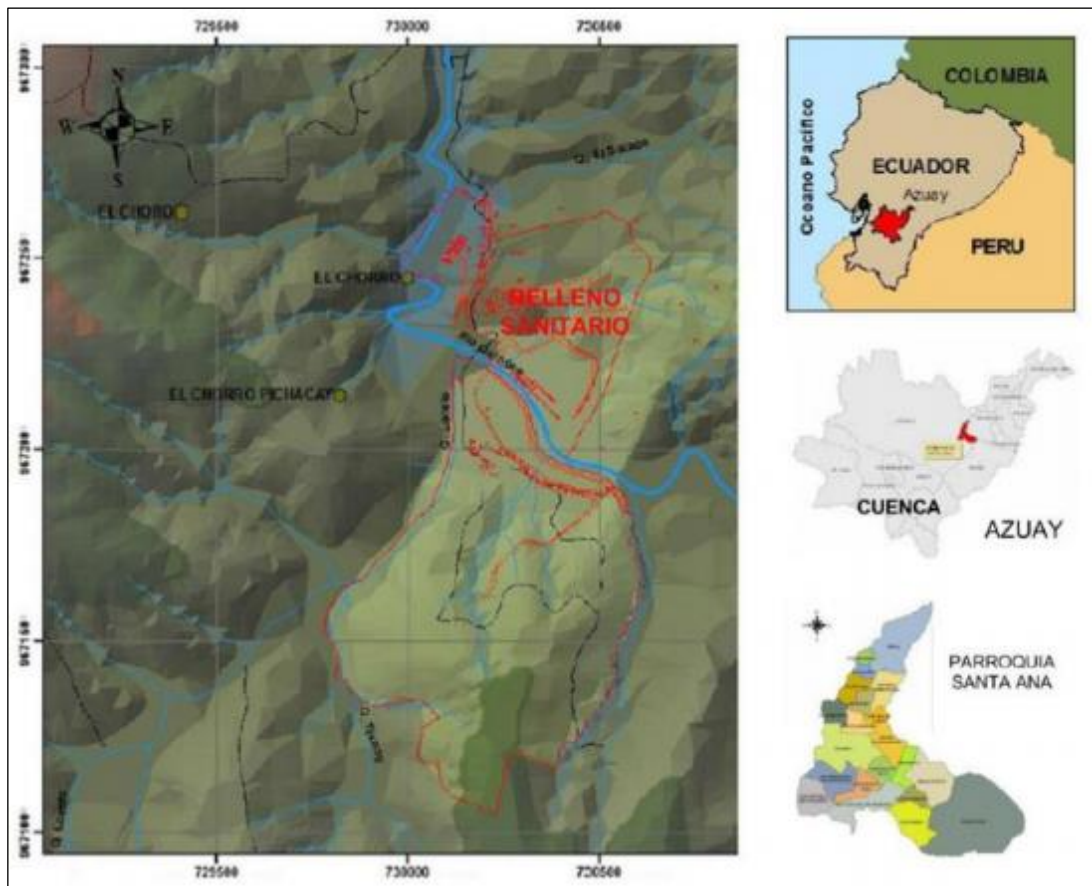


Figura 2.4. Ubicación del Relleno Sanitario de Pichacay.

Fuente: Ortiz (2017, p. 41).

Este proyecto pertenece a la Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca (EMAC EP) de la Municipalidad de Cuenca y se encuentra estructurado por tres etapas: Norte I (clausurada), Norte II (activa) y Sur (inactiva). A continuación, se detallan estas fases:

**Fase Norte I:** Es el sitio más antiguo del relleno sanitario, iniciando su operación el 3 de septiembre del 2001 y se clausuró el 11 de mayo del 2009, fecha donde se llenó completamente, cumpliendo una vida útil de 2.807 días (7,7 años). Se calcula que en esta fase se encuentran depositadas alrededor de 800.000 toneladas de residuos. Esta estructura consta de 9 terrazas de 5 metros de altura cada una con tubos para el drenaje de los lixiviados en cada terraza que desembocan en canales que lo conducen hasta la piscina de lixiviados destinada (Ortiz, 2017).

**Fase Norte II:** Esta fase entró en funcionamiento desde el 12 de mayo del 2009 y se encuentra activa hasta la actualidad. A diferencia de la Fase Norte I, tuvieron mejoras

constructivas como los drenes de recolección de los líquidos lixiviados, los cuales cuentan con canales extras en caso de taponamiento y, además, mejoraron el sistema de impermeabilización del suelo (Inga y Romero, 2011).

**Fase Sur:** Esta fase entrará en operación después del cierre de la Fase Norte II, considerada inicialmente para el 2021, y de acuerdo con las negociaciones realizadas con la Junta Parroquial de Santa Ana, el relleno sanitario está proyectado para 10 años más donde su vida útil llegará a su fin, es decir hasta el año 2031 (Ortiz, 2017).

En la Figura 2.5 se muestra la delimitación de la Fase Norte I y la Fase Norte II.



**Figura 2.5.** Fase Norte I y Fase Norte II del Relleno Sanitario Pichacay [Ortofoto].

**Fuente:** Adaptado del PROMAS (2020, p. 28).

### 2.3. Características generales

El Relleno Sanitario de Pichacay se encuentra diseñado para para recibir los residuos sólidos urbanos de la ciudad de Cuenca y cantones como: Gualaceo, Sígsig, Chordeleg, El Pan, Sevilla de Oro, Saraguro y Déleg; entendiéndose a los residuos sólidos urbanos a todos los desperdicios domiciliarios, comerciales, institucionales, hospitalarios, de construcción y demolición, de mercados, podas de jardín, etc., a fin de precautelar la salud pública y proteger el medio ambiente. A continuación, se detallan en la Tabla 2.1 algunas de las características técnicas del relleno sanitario.

*Tabla 2.1. Características técnicas del Rellenos Sanitario de Pichacay.*

<b>Cota de arranque del relleno</b>	2619 msnm.
<b>Área total del equipamiento</b>	123 hectáreas.
<b>Peso promedio de residuos sólidos compactados</b>	521,10 toneladas/día (2019).
<b>Vida útil</b>	30 años.
<b>Peso específico de residuos compactados</b>	1 tonelada/m <sup>3</sup> .
<b>Sistema de impermeabilización mixta</b>	Capa de arcilla de 20 cm de espesor compactada.
<b>Ductos de gas</b>	Construido con piedra y tubería perforada de polietileno de alta densidad de 160 mm.
<b>Drenes de lixiviados</b>	Construidos con piedra, tuberías perforadas de 160 mm y geotextil no tejido 0,25 mm y permeabilidad de $45 \times 10^{-2}$ cm/s.
<b>Volumen promedio de generación de lixiviados</b>	113,11 m <sup>3</sup> /día (2019).
<b>Volumen de almacenamiento de lixiviados</b>	
<b>Fase Norte I:</b>	2550 m <sup>3</sup> de capacidad.
<b>Fase Norte II:</b>	5726 m <sup>3</sup> de capacidad.



<b>Sistema de operación del relleno</b>	Mediante contrato de prestación de servicios con maquinaria pesada.
<b>Costo por tonelada dispuesta</b>	8,00 \$/tonelada (no incluye costos de inversión).
<b>Equipo utilizado</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Rodillo pata de cabra Shantui SM26 MR-3 (año 2016, peso: 26 toneladas, potencia: 250 hp).</li> <li>▪ Excavadora Oruga Shantui SE 240 (año 2016, peso: 24 toneladas, potencia: 178 hp).</li> <li>▪ Tractor Oruga Shantui SD 32 (año 2016, peso: 37 toneladas, potencia: 315 hp).</li> <li>▪ Retroexcavadora John Deere 410K (año 2014, peso: 7 toneladas, potencia: 106M hp).</li> <li>▪ Tres tanqueros de 2500 a 4000 galones para transporte de lixiviados.</li> </ul>

*Fuente: Adaptado de Inga y Romero (2011, pp. 72-73).*

Además, el Complejo de Desarrollo Humano y Ambiental Pichacay cuenta con dos piscinas para la recolección de los líquidos lixiviados y una piscina adicional para el caso de alguna emergencia o de producirse una excesiva producción de estos líquidos. También cuenta con una planta de tratamiento de esterilización para los residuos infecciosos, una planta de aprovechamiento del biogás y generación de energía y un área de almacenamiento de materiales reciclables.

#### **2.4. Aspectos sociales**

Toda obra de ingeniería trae consigo impactos sociales en el lugar en donde se emplace y más con una obra de este tipo. Unos de los más destacados son la ocupación del suelo, el impacto visual y los fuertes olores. Para mitigar estos impactos se suele cubrir la basura con una capa de tierra, además de sembrar plantas nativas con el objetivo de mejorar el paisaje (Galarza, Parra y Vásquez, 2013).

### 2.4.1. Contraloría social

La administración del relleno sanitario mantiene una política puertas abiertas para la participación activa de los habitantes de la parroquia de Santa Ana en cuanto al control y supervisión de las operaciones.

### 2.4.2. Rendición de cuentas

La Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca (EMAC EP) presenta informes anuales sobre el desempeño del Relleno Sanitario de Pichacay a la Asamblea Parroquial de Santa Ana.

### 2.4.3. Desarrollo humano

El Relleno Sanitario de Pichacay entrega el 5% de sus ingresos anuales a la Junta Parroquial de Santa Ana, lo que representa un importante factor de apoyo para el mejoramiento de la calidad de vida y el desarrollo humano de sus habitantes. Además de significar una fuente de ingresos económicos para las familias aledañas al sector debido a que las personas de la misma comunidad pertenecen a la mano de obra que labora en el relleno sanitario. Un ejemplo son las personas que trabajan en las Asociaciones de Recicladores ARUC y AREV, como se observa en la Figura 2.6.



*Figura 2.6. Asociación de Recicladores.*

*Fuente: EMAC EP (2019, p. 25).*

#### 2.4.4. Plan de emergencias

El Relleno Sanitario de Pichacay cuenta con un plan de emergencias para el caso de derrame de lixiviados (Figura 2.7a) y prevención contra incendios (Figura 2.7b). Además, cuentan con el personal capacitado que ayude a afrontar dichas contingencias en caso de que pudieran presentarse.



*Figura 2.7. Plan de emergencia para el caso de: (a) derrame de lixiviados; (b) prevención contra incendios.*

*Fuente: EMAC EP (2005, p. 15).*

#### 2.4.5. Certificados internacionales

Luego de las auditorías externas realizadas por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC) y por sus características técnicas, ambientales, de seguridad y salud ocupacional, el Relleno Sanitario de Pichacay mantiene un sistema integrado de gestión en base a las siguientes certificaciones internacionales:



*Figura 2.8. Certificaciones Internacionales de las Normas ISO y OHSAS.*

*Fuente: EMAC EP (2019, p. 76).*

ISO 14001 (2004): Sistema de Gestión Ambiental.

OHSAS 18001 (2007): Sistema de Gestión de Seguridad y Salud Ocupacional.

ISO 9001 (2008): Sistema de Gestión de Calidad.

## **2.5. Procesos operativos**

La operación del Relleno Sanitario de Pichacay está a cargo de la Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca (EMAC EP), la cual dentro de sus funciones se encuentran la conformación e impermeabilización del suelo de fondo, la construcción de drenes de lixiviados y ductos de gases, el pesaje de los vehículos recolectores al ingreso y salida del relleno, la disposición final de los residuos, el almacenamiento de los materiales reciclables, el manejo de los lixiviados y del biogás, el monitoreo ambiental y el control de vectores sanitarios, mismo que se detallan a continuación.

### **2.5.1. Conformación e impermeabilización del suelo de fondo**

La permeabilidad del suelo de fondo deberá ser igual o menor a  $1 \times 10^{-7}$  cm/s. En el caso de ser mayor se deberá usar otras alternativas de impermeabilización para el buen funcionamiento del relleno (Presidencia de la República del Ecuador, 2003).



Para el caso del Relleno Sanitario de Pichacay se utiliza un sistema de impermeabilización mixta, la cual se encuentra constituida por:

- Una capa de arcilla debidamente compactada de 20 cm de espesor.
- Una geomembrana, como se observa en la Figura 2.9a, con una elongación a la rotura de hasta el 200%.
- Una capa o hilera de neumáticos, como se observa en la Figura 2.9b, que ayude a soportar las cargas de la maquinaria y evitar que se rompa la geomembrana al momento de la colocación de la basura.



*Figura 2.9. Conformación e impermeabilización del suelo de fondo: (a) geomembrana de polietileno; (b) utilización de neumáticos.*

*Fuente: (a) Inga y Romero (2011, p. 87); (b) Mejía y Pinos (2011, p. 37).*

Cabe mencionar que después de la capa de arcilla, el suelo cumple con la impermeabilización adecuada, sin embargo, se utiliza la geomembrana como un factor de protección adicional, de tal manera que ayude a evitar la filtración de los lixiviados que pueden contaminar las aguas subterráneas y superficiales (Galarza et al., 2013).

### **2.5.2. Construcción de drenes de lixiviados**

Los lixiviados al ser líquidos contaminantes, deben tener un tratamiento antes de su disposición final, por lo que el Relleno Sanitario de Pichacay ha construido un sistema de drenajes para recolectarlos. Estos drenajes cumplen una función muy importante en el proceso de captación y conducción de los lixiviados hacia las piscinas de

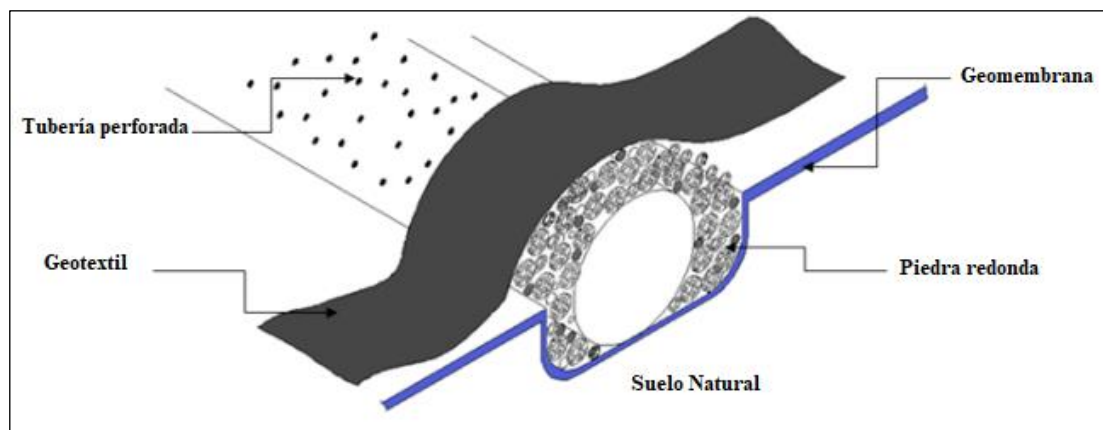
almacenamiento a través de unos drenes en forma de espina de pescado, es decir un dren principal en el medio del cual desembocan los drenes transversales secundarios que son construidos con una pendiente mínima del 3%. Este sistema de drenaje se puede apreciar en la Figura 2.10.



*Figura 2.10. Construcción del sistema de drenaje para los lixiviados.*

*Fuente: EMAC EP (2005, pp. 3-4).*

Para la construcción de estos drenes se abre una zanja de 1 metro de ancho y se le cubre con una estructura rectangular de piedra o material granular, además de una capa de geotextil no tejido de 0,25 mm, con una permeabilidad de  $45 \times 10^{-2}$  cm/s, que funciona como un filtro que impide la entrada de partículas y evite el taponamiento de las tuberías. La representación de la construcción de estos drenes se observa en la Figura 2.11.



*Figura 2.11. Representación gráfica de un drenaje central de lixiviados.*

*Fuente: Galarza et al. (2013, p. 163).*

La tubería colocada en esta estructura es de PVC de 160 mm de diámetro con una resistencia de 1 MPa, para que soporte las grandes presiones tanto de la maquinaria en las operaciones como de las toneladas de basura que se depositan encima. Además, deben soportar las grandes temperaturas a las que se encuentran sometidas en el interior, así como las características corrosivas que tienen los lixiviados.

### 2.5.3. Construcción de los ductos de gases

De la misma manera que los lixiviados, el Relleno Sanitario de Pichacay cuenta con un sistema de extracción del biogás mediante tuberías que se encargan de captar y transportar el gas generado para evitar su acumulación en el interior del relleno, el cual contribuye al aumento de las presiones intersticiales y por ende la inestabilidad de sus taludes al reducir el esfuerzo efectivo.

Estas tuberías funcionan a manera de chimeneas, las cuales son colocadas desde el inicio de la compactación del suelo de fondo y se encuentran constituidas por una estructura de madera, malla y piedra de río que cubren a estos ductos o tubos de polietileno de 200 mm de diámetro (Galarza et al., 2013). En la Figura 2.12 se ilustra lo mencionado anteriormente.



*Figura 2.12. Construcción y colocación de la estructura y los ductos de gases.*

*Fuente: EMAC EP (2005, pp. 5, 9).*

En el apartado 2.5.8 se explica de manera más detallada el manejo del biogás que se utiliza actualmente como aprovechamiento para generar energía, así como también los equipos y tuberías que se utilizan hoy en día.

#### 2.5.4. Ingreso y salida de vehículos

Todos los vehículos oficiales, ya sean recolectores o de transporte, deben ser pesados en la báscula en su ingreso y salida, para así llevar un registro de la cantidad de basura que se deposita en el Relleno Sanitario de Pichacay. En la Figura 2.13 se observa el pesaje de estos vehículos.



*Figura 2.13. Pesaje de los vehículos al ingreso y salida del relleno.*

*Fuente: Adaptado de EMAC EP (2005, p. 6).*

#### 2.5.5. Disposición final de los residuos sólidos

Una vez sellado e impermeabilizado el suelo de fondo, se procede a depositar la basura para tenderla y compactarla, como se observa en la Figura 2.14. Este proceso es muy importante para garantizar la estabilidad de los taludes de las celdas que lo conforman,



debido a que una buena compactación asegura mayor unión entre los residuos y por ende aumento en la resistencia del material.



*Figura 2.14. Disposición de la basura encima del sellado del suelo de fondo.*

*Fuente: EMAC EP (2005, p. 3).*

Se debe tener cuidado en la colocación de la primera capa de basura debido a que la geomembrana podría romperse y permitir el paso de los lixiviados al terreno natural, provocando contaminación al suelo y a las aguas subterráneas y superficiales. Para mitigar este problema, se colocan neumáticos usados en hileras de tal manera que ayuden también a soportar la carga de los vehículos en la colocación y de la maquinaria en la operación, ya que, para el caso específico del Relleno Sanitario de Pichacay, este proceso inicia con la descarga de la basura directamente de los vehículos recolectores o transportadores, como se aprecia en la Figura 2.15, a continuación entra en operación la maquinaria pesada, específicamente el tractor oruga para el acarreo y tendido del material y el rodillo pata de cabra para la compactación, los cuales garantizan el acomodo óptimo del material.



*Figura 2.15. Disposición de la basura directamente del camión recolector.*

*Fuente: EMAC EP (2019, p. 40).*

De esta forma, para el proceso de compactado, los residuos se colocan en capas de 60 cm y se compacta hasta alcanzar un peso específico de 1 tonelada/m<sup>3</sup>, siendo esto muy importante debido a que, según Inga y Romero (2011) los residuos sólidos depositados en los primeros años de la Fase Norte II alcanzaban los 0,7 tonelada/m<sup>3</sup>, lo que significa actualmente un aprovechamiento adicional del 30% en el espacio utilizado y, por lo tanto, un aumento en la vida útil del relleno.

Diariamente, la basura es colocada, compactada y cubierta con material excavado en el sitio. El espesor de la capa de cobertura de la celda diaria es de 20 cm, la cual evita la existencia de malos olores, mejora el impacto visual y además garantizar que los animales no se encuentren en contacto directo con la basura. Estas celdas diarias son de aproximadamente 15x20x1,5 metros con una inclinación en el frente de 30° (Inga y Romero, 2011; Galarza et al., 2013). El conjunto de estas celdas forma una terraza, la cual llega a los 5 metros de altura, en donde es cubierta con una capa final de 50 a 60 cm de espesor, dejando una berma de 8 metros antes de construir la nueva terraza. Esto se puede apreciar en la Figura 2.16.



*Figura 2.16. Cierre de una terraza del relleno sanitario.*

*Fuente: EMAC EP (2005, p. 7).*

Normalmente, esta capa de cobertura final se suele cubrir con vegetación con el fin de estabilizar los taludes debido a que se produce erosión del suelo causada por la escorrentía de aguas lluvias.

#### **2.5.6. Almacenamiento de materiales reciclables**

Una vez los residuos se encuentren en el Complejo de Desarrollo Humano y Ambiental Pichacay, se procede a un proceso de separación de la basura. Como se observa en la Figura 2.17, los materiales como: papel, cartón, plástico y metales se almacenan por separado para luego ser entregados a las asociaciones recicladoras, las cuales se encargan de acondicionarlos y comercializarlos posteriormente.



*Figura 2.17. Separación de los materiales reciclables que llegan al relleno sanitario.*

*Fuente: EMAC EP (2005, p. 8).*

A la semana, se reciclan alrededor de 3 toneladas, que en comparación con todos los residuos sólidos que reciben diariamente es insignificante, sin embargo, para las empresas recicladoras este valor es representativo para sus procesos. Estos materiales reciclados contribuyen a reducir la cantidad de residuos que van a ser depositados en el relleno sanitario (Mejía y Pinos, 2011).

### **2.5.7. Manejo de los lixiviados**

Los lixiviados son cualquier líquido que haya entrado en contacto con la basura. En el caso del relleno de Pichacay se presentan como un líquido de color negro y olor desagradable producto de la descomposición de la basura y del agua de infiltración por las lluvias, el cual desciende por efectos de la gravedad hasta llegar a la cota de arranque de las celdas, donde se encuentra impermeabilizado el suelo. Aquí se recolectan en drenes que conducen estos líquidos a las partes bajas del relleno, donde se encuentran las piscinas de lixiviados de la Figura 2.18.





*Figura 2.18. Piscinas para la recolección de los lixiviados [Fotografía].*

*Fuente: Elaboración Propia (23 de noviembre, 2020).*

Estas piscinas inicialmente se construían de hormigón armado, sin embargo, tenían un costo muy elevado, por lo que cambiaron de alternativa en su construcción, la cual consiste primeramente en realizar una excavación en el suelo con pendientes estables, luego colocar una capa debidamente compactada de arcilla y por último cubrir el suelo con una geomembrana de polietileno de alta densidad de 1 mm de espesor. Todo esto con el objetivo de impermeabilizar la superficie y evitar que los lixiviados contaminen el suelo y las fuentes de aguas superficiales y subterráneas (Inga y Romero, 2011).

El volumen promedio de recolección de los lixiviados es de 120 m<sup>3</sup>/día, con la posibilidad de llegar a los 150 m<sup>3</sup>/día en épocas de invierno. Una vez estos líquidos se encuentren en el reservorio, se los carga a los tanqueros de 2500 a 4000 galones mediante bombas y mangueras para luego ser transportados hacia la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Cuenca para su posterior tratamiento, el cual está a cargo de la Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca (ETAPA EP) (Galarza et al., 2013). Este tratamiento se da con el mismo proceso y bajo los mismos parámetros que las aguas residuales de la ciudad.

La calidad de estos lixiviados dependerá del tipo de residuos que se depositan en el relleno y va variando conforme pasa el tiempo. La composición de la basura en países desarrollados presenta mayor porcentaje en cuanto a papeles, cartones, plásticos y metales, mientras que los países en vía de desarrollo contienen mayor cantidad de materia biodegradable, lo que produce un aumento en las concentraciones de los contaminantes en los lixiviados (Inga y Romero, 2011).

### 2.5.8. Manejo del biogás

Además de los lixiviados, la putrefacción natural de los residuos sólidos también produce gases que son dañinos para el medio ambiente. Por ello, este biogás es captado del relleno mediante un sistema de tuberías que funcionan como chimeneas de tal forma que al salir el gas al aire libre este sea quemado. Para este proceso de incineración se utilizaban las casetas de la Figura 2.19, con el objetivo de evitar que el metano ( $\text{CH}_4$ ) se descargue a la atmósfera y solo emita dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), contribuyendo a la reducción del efecto invernadero.



*Figura 2.19. Caseta de incineración del biogás.*

*Fuente: Inga y Romero (2011, p. 98).*

Si por alguna razón estas tuberías llegaran a taponarse, las presiones internas aumentarían, provocando problemas de estabilidad en la masa de residuos.

Para toda la Fase Norte I y parte de la Fase Norte II se quemaba el biogás en las mismas chimeneas. A partir del año 2012 se cambió la manera en la que este gas era tratado, mediante su extracción con la ayuda de varios pozos construidos y situados estratégicamente a lo largo de toda la masa del relleno para luego llevarlos mediante un sistema de tuberías hacia la Planta de Aprovechamiento de Biogás que se encuentra dentro del mismo Complejo de Desarrollo Humano y Ambiental Pichacay (Conto y Tipán, 2018). En la Figura 2.20 se puede apreciar uno de los pozos utilizados para la extracción del metano.



*Figura 2.20. Pozo #27 que extrae el gas metano producto de la descomposición de la basura [Fotografía].*

*Fuente: Elaboración Propia (23 de noviembre, 2020).*

El gas recogido de cada pozo es transportado, tratado y purificado mediante un bioprocesador (Figura 2.21a), el cual se encarga de separar el gas de las partículas de agua y compuestos de azufre. De esta forma se verifican las condiciones de calidad y cantidad del gas para posteriormente, enviarlo a un equipo generador (Figura 2.21b)



donde el metano funciona como combustible para el motor que genera energía eléctrica.



*Figura 2.21. (a) Bioprocesador; (b) equipo generador de energía eléctrica [Fotografía].*

*Fuente: Elaboración Propia (21 de junio, 2019).*

Esta Planta de Aprovechamiento de Biogás genera la energía eléctrica suficiente para abastecer a 7300 familias de zonas rurales con un consumo promedio de 160 KWh/mes.

### **2.5.9. Monitoreo ambiental**

Para verificar el adecuado funcionamiento del relleno sanitario, la EMAC EP realiza de forma permanente el monitoreo ambiental de:

- La calidad del agua superficial, la cual consta de cinco puntos a lo largo del río Quingeo en esa zona y un solo punto en la quebrada Capelo (Figura 2.22a).
- La calidad del agua subterránea, la cual cuenta con cuatro puntos de monitoreo (Figura 2.22b).
- El ruido ambiental que se produce en el frente de trabajo, las viviendas aledañas al relleno sanitario y a las comunidades de El Chorro y Playa de los Ángeles (Figura 2.22c).
- Las emisiones gaseosas del biogás (Figura 2.22d).



*Figura 2.22. Monitoreo ambiental del relleno sanitario: (a) calidad de agua superficial; (b) calidad de agua subterránea; (c) ruido ambiental; (d) emisiones gaseosas.*

*Fuente: EMAC EP (2005, pp. 12-13).*

Para la calidad del agua superficial se debe asegurar que el agua del río Quingeo no se contamine debido al relleno sanitario, es por ello que, se tienen puntos determinados estratégicamente para la toma de muestras del río antes y después del proyecto para realizar un análisis y determinar si existe contaminación (Inga y Romero, 2011).

#### **2.5.10. Control de vectores sanitarios**

El control de vectores sanitarios está a cargo de una empresa externa contratada por la EMAC EP, como se aprecia en la Figura 2.23, la cual realiza sus tareas semanalmente y se encuentra en constante alerta en caso de la aparición de alguna plaga.



*Figura 2.23. Control de vectores sanitarios.*

*Fuente: EMAC EP (2005, p. 14).*

## **2.6. Usos futuros**

Los espacios en donde se ha emplazado un relleno sanitario no podrán utilizarse para la construcción de viviendas, escuelas u otros tipos de edificaciones (Collazos, 2008). Sin embargo, estos terrenos pueden ser acondicionados mediante la siembra de vegetación herbácea o especies de plantas propias de la región, logrando así recuperar zonas verdes agradables a la vista. En la Figura 2.24 se observa algunos sectores del relleno sanitario que actualmente ya se encuentran clausurados.



*Figura 2.24. Áreas verdes de la Fase Norte I y II del Relleno Sanitario de Pichacay [Fotografía].*

*Fuente: Elaboración Propia (20 de noviembre, 2020; 23 de noviembre, 2020).*

Estas áreas pueden, además, convertirse en parques recreacionales destinados a actividades de esparcimiento, descanso, práctica de deportes, etc. En el capítulo 5 se detallarán algunos ejemplos de reinserciones de relleno sanitarios clausurados a nivel global.

El uso futuro de la Fase Norte I del Relleno Sanitario de Pichacay se encuentra planificado para la siembra de árboles propios de la región, y para esto, se estudian diferentes tipos de vegetación tomando en cuenta características de adaptabilidad y armonía con el ambiente. El encargado de este proyecto es un ingeniero forestal el cual, ha ido probando varios tipos de árboles hasta poder determinar que la especie que más ha resistido a las condiciones de crecer en un relleno sanitario es la planta de eucalipto. Pero para empezar a sembrar primero se debe esperar a que esta fase del relleno libere todos los gases y lixiviados que siguen generando, lo cuales son perjudiciales para cualquier tipo de planta (Inga y Romero, 2011).

### CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE ASENTAMIENTOS Y CONSOLIDACIÓN

Los residuos sólidos que se encuentran en los rellenos sanitarios tienen propiedades heterogéneas por lo cual su caracterización se torna muy difícil. A pesar de esto, existen varios estudios que presentan datos para rellenos sanitarios en países desarrollados, mientras que estudios en países que se encuentran en vías de desarrollo son basados en bibliografía o en estudios similares. Para la caracterización geomecánica y el comportamiento geotécnico de la basura, se toma como referencia la mecánica de suelos convencional y se simula un comportamiento parecido y muy apegado a las características geotécnicas de un suelo ya categorizado.

La caracterización geomecánica de los residuos sólidos dentro de un relleno sanitario ayuda a determinar parámetros relacionados con la estabilidad del suelo de fondo, las características del material de cobertura tanto intermedia como final y la determinación de la resistencia del relleno (Turcumán et al., 2009). Todos estos parámetros influyen en las características geotécnicas, tales como: capacidad portante, compresibilidad, resistencia al corte, grado de consolidación y estabilidad del relleno. Es importante que durante el análisis de estos parámetros se tome en cuenta factores de seguridad dentro del rango establecido, ya que se habla de una obra civil que requiere un alto grado de seguridad ambiental y un largo tiempo de vida útil.

Los residuos sólidos generan grandes asentamientos que pueden durar varios años, esto se debe a su composición, pretratamiento, velocidad de disposición, compactación, saturación entre otros (Ordóñez y Villarraga, 2005). Para la determinación de las propiedades del Relleno Sanitario de Pichacay se debe tomar en cuenta la variedad de factores produce dificultad en su análisis, tales como:

- La heterogeneidad de los residuos sólidos y su descomposición respecto a las diferentes condiciones climáticas.
- Obtención de muestras representativas in situ.
- La inexistencia de un protocolo para muestreo y ensayos en campo.
- Las propiedades geomecánicas de los residuos sólidos urbanos los cuales varían con el tiempo como resultado de la biodegradación.



### 3.1. Cálculo de densidad

Existen factores que influirán en la determinación de la densidad, ya que la basura al ser un material heterogéneo, va a depender del peso específico, cantidad de poros, grado de saturación, composición de los residuos, capa de cobertura y grado de compactación durante la disposición final de los residuos sólidos. Entre los factores más importantes están el tiempo y la profundidad a la que se encuentran; a mayor profundidad, mayor es la densidad obtenida. Esto debido a la consolidación y compresión derivada de la contribución del peso propio de las nuevas capas de residuos dispuestas en el relleno sanitario.

A continuación, se presenta en la Tabla 3.1 el historial de pesos de los residuos sólidos dispuestos en el Relleno Sanitario de Pichacay durante el período de análisis establecido. Esta información fue suministrada por la Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca (EMAC EP) la cual servirá posteriormente para el cálculo de la densidad del relleno.

*Tabla 3.1. Historial de pesos de residuos sólidos en el período de análisis establecido.*

<b>Mes</b>	<b>Peso (ton)</b>			
	<b>Año</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>
<b>Enero</b>		12123,74	15421,12	17055,31
<b>Febrero</b>		11792,18	13403,05	12674,43
<b>Marzo</b>		15144,98	12468,87	12606,53
<b>Abril</b>		12925,05	13344,34	13391,16
<b>Mayo</b>		16510,02	15774,94	11337,47
<b>Junio</b>		12756,19	12032,85	11947,76
<b>Julio</b>		12268,89	15249,98	14634,19
<b>Agosto</b>		15138,73	11431,78	11365,06
<b>Septiembre</b>		12423,82	13042,75	11560,06
<b>Octubre</b>		12379,31	14765,63	-

<b>Noviembre</b>	15714,24	12550,11	-
<b>Diciembre</b>	12298,03	13076,55	-

*Fuente: Adaptado de EMAC EP (2020).*

Ahora bien, para la determinación de los volúmenes del relleno se han utilizado las topografías obtenidas del período de análisis establecido. Para ello, se sobrepone una topografía sobre la otra y se obtienen las diferencias de cotas como valores de corte y relleno. En la Tabla 3.2 se presenta el resumen de todos los valores de volumen determinados, los cuales se pueden apreciar en los Anexos 3, 4 y 5.

*Tabla 3.2. Volúmenes de corte y relleno de acuerdo a los diferentes períodos de análisis.*

<b>Año</b>	<b>2018 - 2019</b>	<b>2019 - 2020</b>	<b>2018 - 2020</b>
<b>Volumen Relleno (m<sup>3</sup>)</b>	182887,09	83722,55	266732,53
<b>Volumen Corte (m<sup>3</sup>)</b>	36436,84	19114,37	43164,95
<b>Relación R/C</b>	5,02	4,38	6,18

*Fuente: Elaboración Propia.*

Se puede inferir que la relación entre los volúmenes de relleno y corte oscila entre 4 a 6 veces más que el volumen de corte que se presenta en cada período.

Para el cálculo de las densidades en cada período de análisis establecido, se calcularon en base a los pesos de basura y a los volúmenes determinados entre las topografías de cada año. En base a estos datos encontrados anteriormente, se utiliza la Ecuación 17 para determinar las densidades teóricas.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (17)$$

Donde:

$\rho$ = Densidad en ton/m<sup>3</sup>.

$m$ = Pesos de los residuos sólidos en ton.

$V$ = Volumen calculado entre topografías en m<sup>3</sup>.

Como se puede apreciar en la Tabla 3.3, las densidades teóricas calculadas muestran resultados muy similares, eso quiere decir que los residuos sólidos urbanos dispuestos en el Relleno Sanitario de Pichacay siguen un mismo comportamiento con el paso del tiempo.

*Tabla 3.3. Cálculo de la densidad de los residuos sólidos dispuestos en el Relleno Sanitario de Pichacay.*

<b>Período</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Peso (ton)</b>	<b>Densidad (ton/m<sup>3</sup>)</b>
<b>2018 - 2019</b>	182887,09	247046,59	1,35
<b>2019 - 2020</b>	83722,55	81922,13	0,98
<b>2018 - 2020</b>	266732,53	328968,71	1,23

*Fuente: Elaboración Propia.*

Se puede observar que la variación de las densidades calculadas teóricamente no es constante. Sin embargo, al ser simplemente densidades teóricas pueden acercarse como no a las reales.

En base a estas densidades se ha realizado una proyección para tener densidades aproximadas basadas en el número de días contando desde su disposición en el Relleno Sanitario de Pichacay.

En la Tabla 3.4 se muestra el tiempo de cada uno de estos períodos que van a ayudar a determinar la tendencia que tiene la densidad del relleno con el pasar del tiempo.

*Tabla 3.4. Tiempo en meses y días de los períodos de análisis establecidos.*

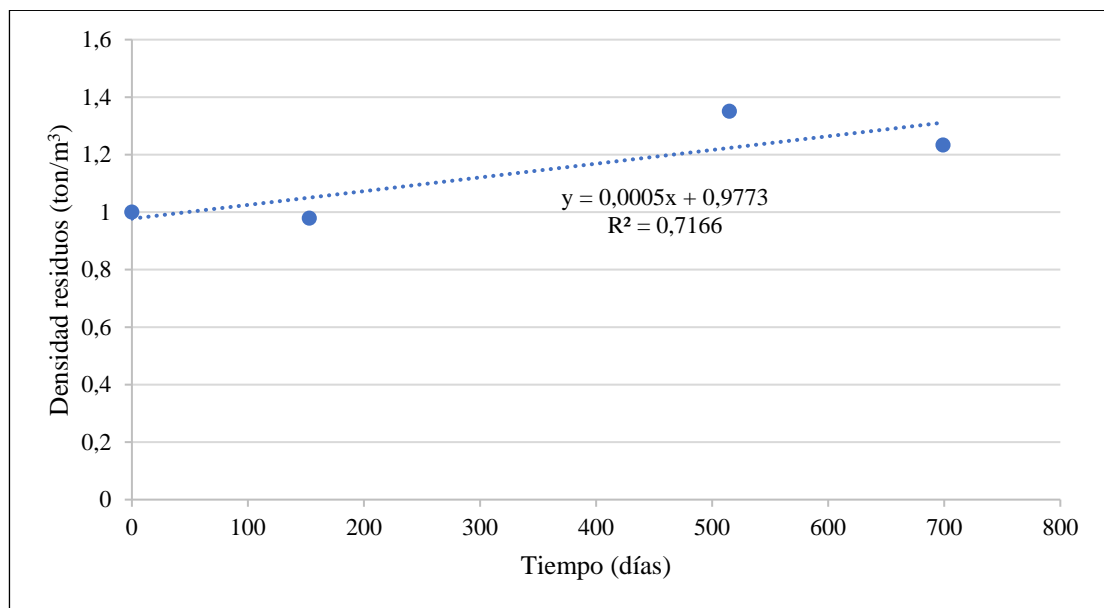
<b>Fecha Inicial</b>	<b>Fecha Final</b>	<b>Tiempo (meses)</b>	<b>Tiempo (días)</b>
feb-18	jul-19	17	515
ago-19	ene-20	5	184
feb-18	ene-20	23	699

*Fuente: Elaboración Propia.*

Se puede ver que se realizará el análisis en diferentes períodos de tiempo, de esta manera se puede ver y comparar el grado de consolidación en el tiempo. Se debe

recalcar que, la densidad aproximada de compactación que maneja la EMAC EP al momento de la disposición y tendido de los residuos sólidos es de 1 ton/m<sup>3</sup>. A partir de este valor se puede empezar a comparar valores posteriores para así determinar el grado de consolidación de los desechos ya dispuestos y su tiempo en el relleno sanitario.

Con esto, se puede apreciar en la Figura 3.1, una gráfica de tendencia del valor de la densidad en el Relleno Sanitario de Pichacay desde su disposición.



*Figura 3.1.* Densidad de los residuos sólidos dispuestos en el Relleno Sanitario de Pichacay con el paso del tiempo.

*Fuente:* Elaboración Propia.

A pesar de la falta de datos para mejorar la línea de tendencia, se podría calcular valores de densidad bastante cercanos al comportamiento real del Relleno Sanitario de Pichacay.

*Tabla 3.5.* Proyección de densidades de acuerdo al número de días desde su disposición.

Nº de días	Densidad (ton/m³)
150	1,05
300	1,13

450	1,20
600	1,28
750	1,35
900	1,43
1000	1,48

*Fuente: Elaboración Propia.*

Como se puede apreciar en la Tabla 3.5, conforme el tiempo va pasando la densidad del relleno aumenta, pues además se debe recalcar que los procesos de biodegradación y de compactación no tienen tiempos definidos.

### **3.2. Asentamientos y consolidación en rellenos sanitarios**

Se tiene registro que los primeros estudios de compresibilidad y consolidación datan del año 1962 con Merz y Stone, quienes estudiaron los primeros datos de asentamientos producidos en rellenos sanitarios. Sowers en el año de 1968 empieza sus estudios sobre cimentaciones en estos sitios de disposición final, en el año 1973 presenta los primeros datos de sus investigaciones y correlaciona el comportamiento de los residuos sólidos con las turbas debido a la alta relación de vacíos que exhiben (Ordóñez y Villarraga, 2005).

En base a la teoría descrita por Das (2012), se entiende por asentamiento a la compresión de las capas de suelo producida por un aumento de esfuerzo causado por la construcción de cimientos u otras cargas. Esta compresión puede ser producida por:

- a. La deformación de partículas del suelo.
- b. La reorientación de las partículas del suelo.
- c. La expulsión de aire o agua de los espacios vacíos.

El asentamiento del suelo causado por la carga puede dividirse en dos categorías:

1. Asentamiento elástico, asentamiento causado por la deformación elástica del suelo seco y de los suelos húmedos y saturados sin ningún cambio en el

contenido de humedad. Los cálculos de los asentamientos elásticos se basan generalmente en ecuaciones derivadas de la teoría de la elasticidad.

2. Asentamiento de consolidación, es el resultado del cambio de volumen en un suelo cohesivo saturado debido a la expulsión de agua intersticial. El asentamiento de consolidación es dependiente del tiempo.

Para la estimación de asentamientos en estos sitios de disposición final de los residuos sólidos, se usa la teoría convencional de la mecánica de suelos, pero para su cálculo se excluyen ciertos parámetros, tales como:

- a. Características de los residuos sólidos.
- b. Cambios físico-químicos.
- c. Descomposición bioquímica a lo largo del tiempo.

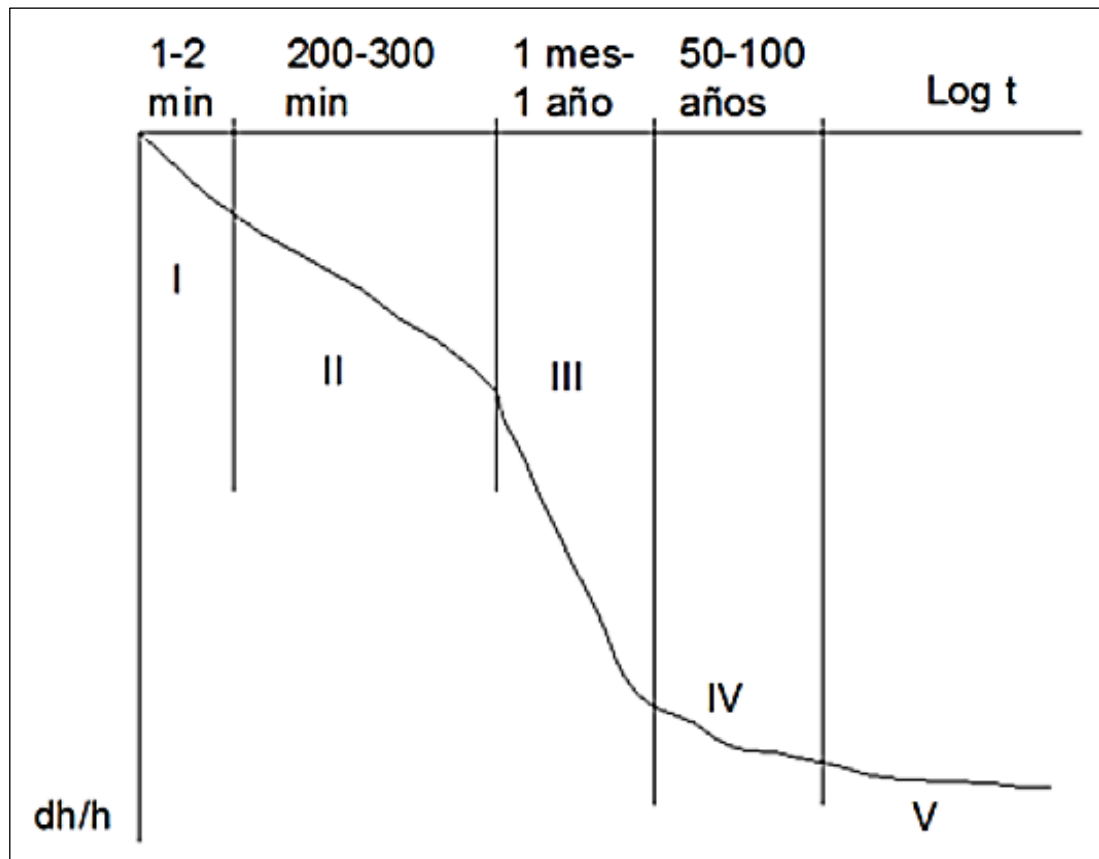
Los métodos para determinar los asentamientos en residuos sólidos urbanos son semejantes a los utilizados en asentamientos de suelo normado, como ya se mencionó las características de los residuos sólidos, así como las reacciones físico-químicas y bioquímicas no son tomadas en cuenta. Ordóñez y Villarraga (2005) citan a Manassero et al. (1996), que resume varios procesos, desde 1973 hasta el año de 1996, responsables de asentamientos presentes en los residuos sólidos, a continuación, se enumeran los más importantes:

- Compresión mecánica, se produce con las sobrecargas aplicadas en las capas superiores (peso propio de los residuos sólidos, mecanismos que ocurre durante la operación del relleno sanitario, entre otros) las partículas sólidas tienen una rotura en su composición generando así una reorientación de ellas.
- Variación de volumen, esto se genera conforme ocurren los procesos físico-químicos, los líquidos lixiviados y los gases producidos migran por gravedad a los espacios vacíos dentro de las celdas de disposición.
- Comportamiento viscoso, ocurre bajo la acción de una carga constante generando deformaciones lentas en las capas de los residuos sólidos.
- Variaciones de volúmenes producidos por la biodegradación de la materia orgánica, pasando de su estado sólido a líquido y finalmente a su estado gaseoso.

De acuerdo a varios autores, los residuos sólidos dispuestos en los rellenos sanitarios pasan por tres importantes asentamientos basados en el tiempo, que serán descritas a detalle más adelante:

- a. Asentamiento inicial o elástico: Estos asentamientos se producen durante la disposición y el tendido de los residuos sólidos y se dan por acción de la compactación producida por la maquinaria usada para este proceso, la evacuación de líquidos lixiviados y la alteración de su forma física.
- b. Asentamientos primarios: los asentamientos primarios se producen en las capas inferiores a causa de las sobrecargas de las capas superiores y el peso propio de los residuos en las capas de cobertura intermedia.
- c. Asentamientos secundarios: Se producen por la consolidación de las capas y la biodegradación de los residuos sólidos.

Yepes y Villarraga (2018) presentan en la Figura 3.2 una curva teórica de compresibilidad para los residuos sólidos depositados en rellenos sanitarios propuesta por Grisolia y Napoleoni en el año de 1995, la cual se adapta para representar la incidencia de cada uno de los mecanismos de asentamiento en países no desarrollados como es el caso de Ecuador.



*Figura 3.2. Curva teórica de compresibilidad propuesta por Grisolia y Napoleoni (1995).*

*Fuente: Yepes y Villarraga (2018, p. 26).*

En el gráfico anterior se establece cinco fases que representan los procesos de asentamiento, los cuales se detallan a continuación:

Fase I: Una vez colocados los residuos, ocurre una deformación inicial y reducción de poros, provocada por el peso propio de los residuos y/o cargas impuestas.

Fase II: se comprimen los materiales altamente deformables y se descomponen algunos materiales inertes, lo que se refleja en una acentuada reducción del volumen.

Fase III: en esta fase se presentan ya los asentamientos secundarios producto de las deformaciones tipo “Creep” en los residuos por acción de cargas constantes, además de deformaciones por biodegradación de los residuos orgánicos.

Fase IV: la tasa de los asentamientos secundarios disminuye y eventualmente concluyen.



Fase V: finalmente se tiene una deformación residual que puede prolongarse en el tiempo debido a la compresión de residuos no orgánicos.

Como ya se explicó previamente, en las fases químicas de los residuos sólidos se puede observar que existe una relación directa entre los efectos de la biodegradación y los asentamientos producidos con los residuos ya dispuestos en el sitio de disposición final. Para efectos prácticos del cálculo de asentamientos, solo se toma en cuenta los efectos físicos y mecánicos de los residuos sólidos.

### **3.3. Teoría de consolidación**

Si a una capa de residuos sólidos se le aplica cierta carga y esta comienza a compactarse, se produce un desplazamiento del agua debido a las presiones intersticiales que se generan dentro de las celdas de disposición, esto produce una reducción en el volumen y por lo tanto se puede decir que está pasando por un proceso de consolidación. Este proceso no solo implica la migración del agua, sino también la reducción de vacíos (Rivera, 2012).

En la Figura 3.3 se puede apreciar una recopilación de las propuestas de varios autores de la literatura a través del tiempo sobre los diferentes mecanismos de asentamientos. Aquí se muestra el tiempo que se considera para cada una de las etapas como son la primaria y la secundaria que corresponde a los asentamientos iniciales y los que se dan a largo plazo, respectivamente.

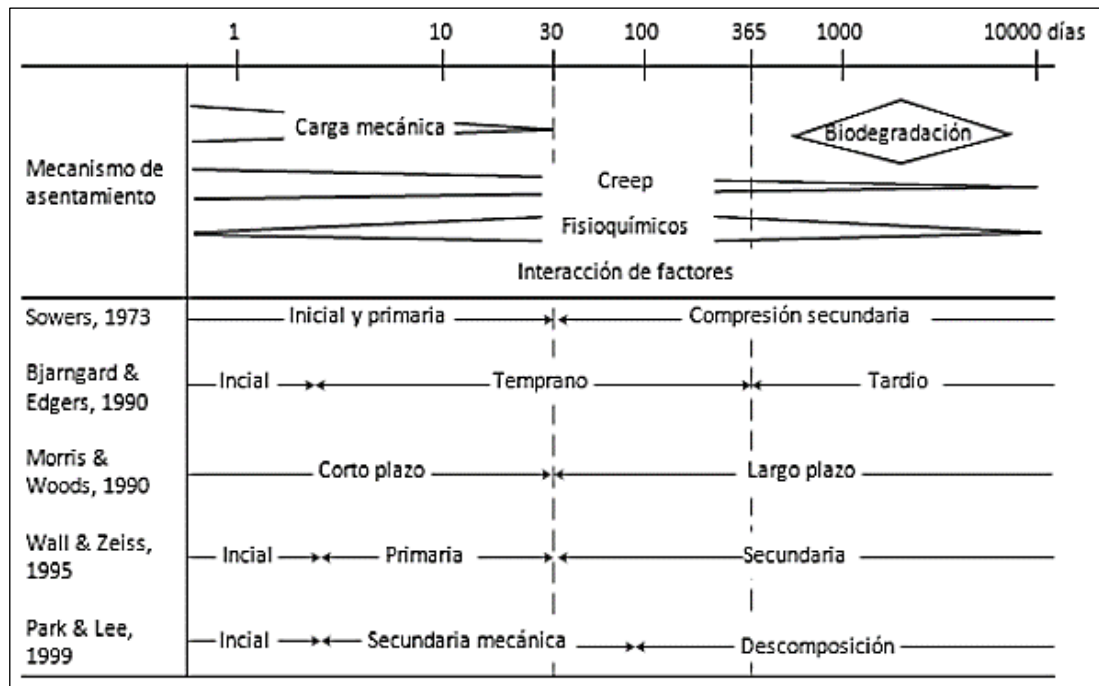


Figura 3.3. Ocurrencia de los diferentes mecanismos de asentamientos y su clasificación temporal de acuerdo a varios autores.

Fuente: Yepes (2015, p. 49).

Los asentamientos se pueden atribuir tanto a la compresión mecánica y a la composición biológica de los residuos sólidos. Y estos se los puede dividir en diferentes etapas: la instantánea (Etapa I); asentamiento mecánico primario (Etapa II); la deformación secundaria (Etapa III); la descomposición primaria de material orgánico (Etapa IV), y la deformación residual del asentamiento mecánico y la descomposición orgánica (Etapa V).

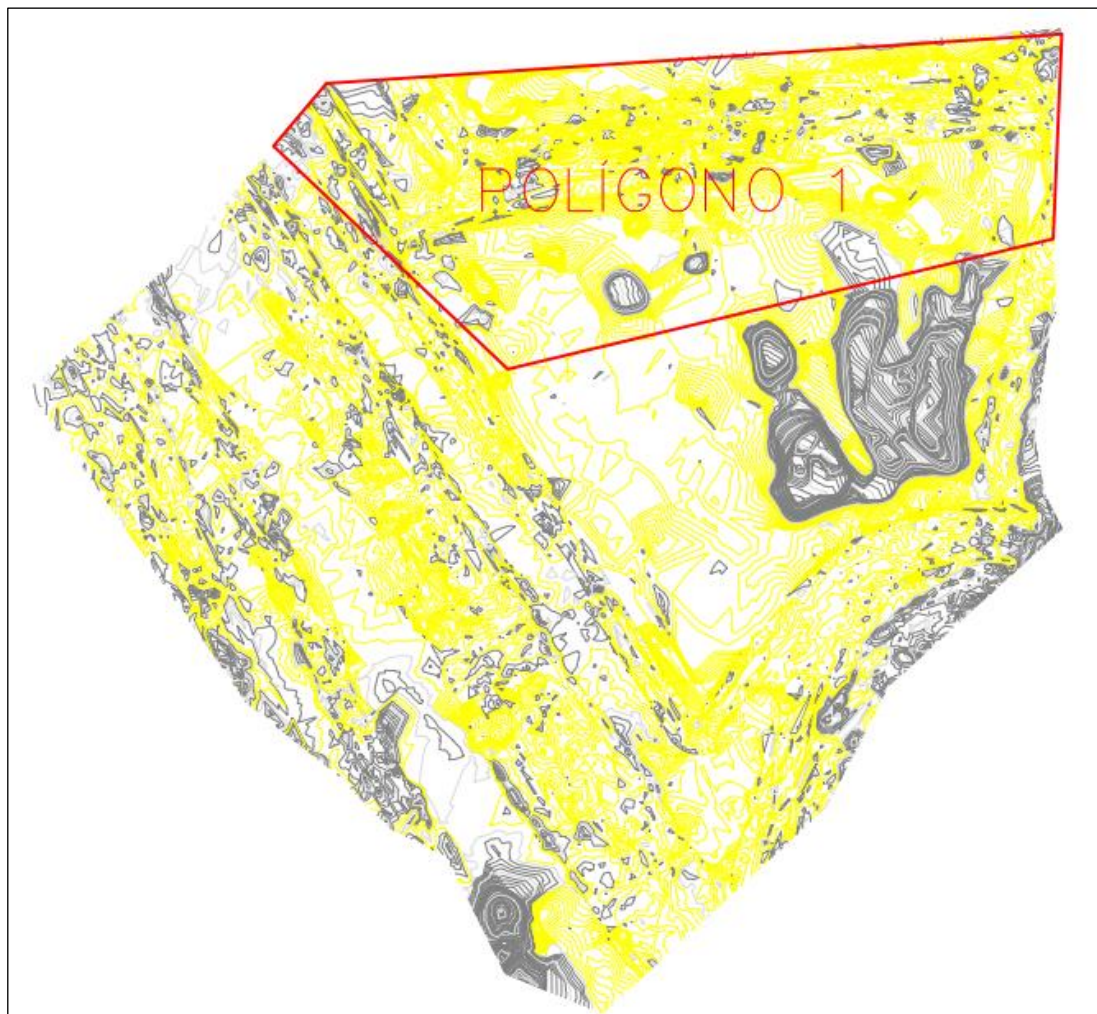
### 3.4. Cálculo de asentamientos en el Relleno Sanitario de Pichacay

En base a la información suministrada por la Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca (EMAC EP), se empezó el análisis de la misma. Inicialmente, se revisaron los levantamientos topográficos que la empresa ha realizado en los últimos 10 años, siendo esto el determinante para definir el período de estudio. Con esta premisa, se estableció un período de estudio desde Febrero/2018 a Enero/2020, siendo este el punto de partida para el procesamiento de los levantamientos topográficos para cada año y los datos de pesaje registrados en el período ya establecido.

Adicionalmente, la EMAC EP proporcionó un estudio denominado “Levantamientos topográficos para el Relleno Sanitario de Pichacay y escombreras operadas por EMAC EP” – Proyecto 060-2019, realizado por el Programa para el Manejo de Agua y Suelo de la Universidad de Cuenca, por sus siglas PROMAS, iniciado en Julio/2019 a Enero/2020. Esta información adicional entregada fue de gran apoyo, ya que se trataba de información procesada con instrumentación adecuada y con su procesamiento en softwares que permitían su futuro análisis y uso bibliográfico.

### **3.5.1. Determinación de los polígonos de asentamientos**

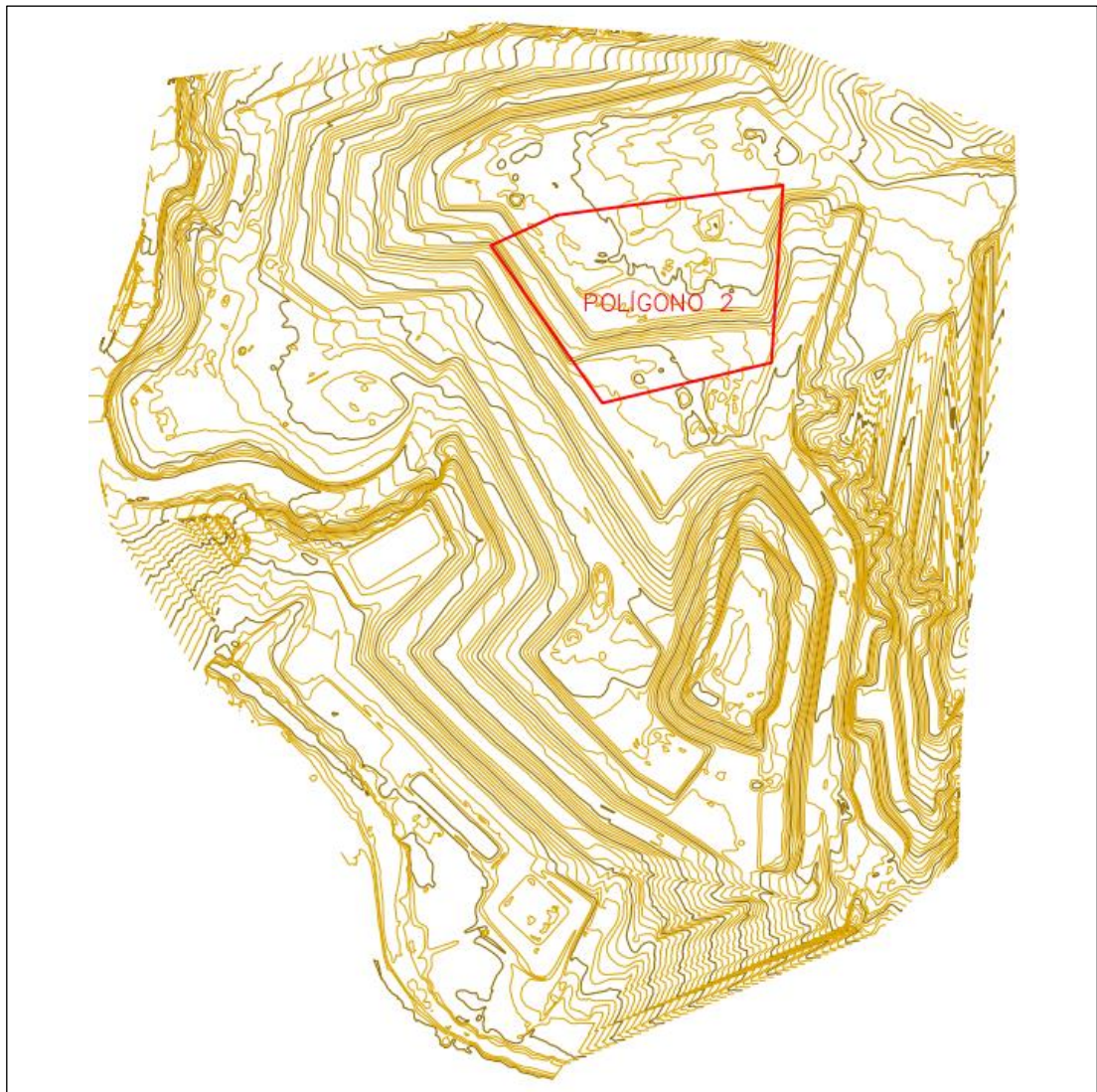
Para iniciar con los cálculos de asentamientos se generaron dos superficies mediante el software AUTOCAD CIVIL 3D en su versión 2018. La primera superficie de asentamientos corresponde al período Julio/2019 a Enero/2020, es importante recalcar que las curvas de nivel menores se encuentran a una distancia de 0,10 m y las curvas de nivel mayores están cada 0,50 m., esto se debe a que la superficie generada tendrá mejor detalle para su análisis. Al tener una diferencia de 6 meses entre las dos superficies, los datos pueden arrojar resultados favorables, de esta manera, se definen las zonas con mayores asentamientos y a partir de ello se establece el polígono de estudio el cual se puede apreciar en la Figura 3.4.



*Figura 3.4. Polígono 1 de análisis definida por la superficie de asentamientos.*

*Fuente: Elaboración Propia.*

Además, se definió un segundo polígono, el cual se muestra en la Figura 3.5, ya que al analizar las topografías del año 2018 y 2019, se puede observar que existe una franja de un camino existente en la topografía del año 2018 que es rellenada con basura para el año 2019. De esta manera se puede identificar que existe un volumen de residuos sólidos depositados durante un año completo en esta nueva zona delimitada por un segundo polígono.



*Figura 3.5. Polígono 2 de análisis de acuerdo a la topografía del año 2019.*

*Fuente: Elaboración Propia.*

### **3.5.2. Puntos de análisis topográfico**

Para el primer polígono de estudio se define un perfil longitudinal que cruce por toda el área y perfiles transversales cada 10 metros, los puntos de control serán tomados cada 5 metros en cada uno de los perfiles transversales dibujados. De esta manera se tendrá cubierta la zona en su totalidad y se ha definido con colores los asentamientos que se han producido durante el período de estudio establecido inicialmente en 6 meses, como se puede apreciar en la Figura 3.6.





**Figura 3.6.** Asentamientos en los puntos de análisis topográficos del polígono 1.

*Fuente:* Elaboración Propia.

Para entender mejor el comportamiento de los asentamientos producidos en este período, se muestra en la Tabla 3.6 los valores de asentamientos en rangos de acuerdo a su magnitud y a su porcentaje con respecto a la altura de columna de basura desde el año 2009. Todos los valores para determinar estos rangos se pueden apreciar en el Anexo 6.

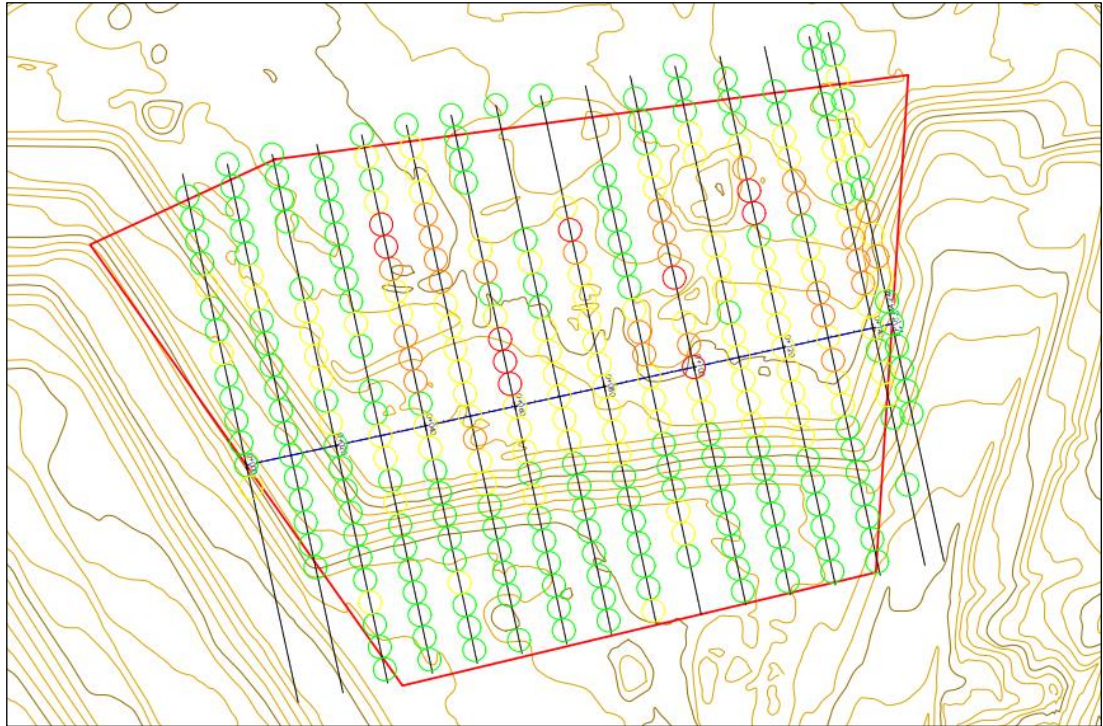
**Tabla 3.6.** Rangos de asentamientos en el análisis del polígono 1.

	(m)	(%)
	0,00 – 0,49	0,00 – 2,62
	0,49 – 0,97	2,62 – 5,25
	0,97 – 1,46	5,25 – 7,87
	1,46 – 1,94	7,87 – 10,49

*Fuente:* Elaboración Propia.

Para el análisis del segundo polígono se procedió de la misma manera que el primero, dibujando un perfil transversal que divida al polígono en dos, y a continuación, trazando perfiles transversales cada 10 metros de distancia y puntos de control cada 5

metros en cada uno de los perfiles transversales, tal como se muestra en la Figura 3.7. Con este procedimiento se puede controlar toda el área abarcada por el segundo polígono.







*Figura 3.7. Asentamientos en los puntos de análisis topográficos del polígono 2.*

*Fuente: Elaboración Propia.*

Asimismo, en la Tabla 3.7 se muestran los rangos de asentamientos que se dan en cada uno de los puntos de análisis topográfico del segundo polígono ya sea en su magnitud en metros y en porcentaje de acuerdo a la altura de columna de basura en ese período de estudio establecido. Todos los valores para determinar estos rangos se pueden apreciar en el Anexo 6.

*Tabla 3.7. Rangos de asentamientos en el análisis del polígono 2.*

	(m)	(%)
	0,03 – 0,32	0,14 – 1,49
	0,32 – 0,61	1,49 – 2,84
	0,61 – 0,90	2,84 – 4,19
	0,90 – 1,19	4,19 – 5,54

*Fuente: Elaboración Propia.*

Así es como finalmente se puede establecer una relación entre los asentamientos producidos en los 6 meses con respecto al año que tomó rellenar esta área. Esta relación de asentamientos con respecto a la altura de columna de basura se podría usar como una relación de asentamientos primarios. A pesar de que en la literatura se establece que los asentamientos primarios se producen en los primeros 30 días de disposición de los residuos sólidos, dentro del manejo de este relleno sanitario se podría establecer un período un poco más extenso, debido a la falta de instrumentación y de un procedimiento ya establecido y normado por manuales de control y manejo.

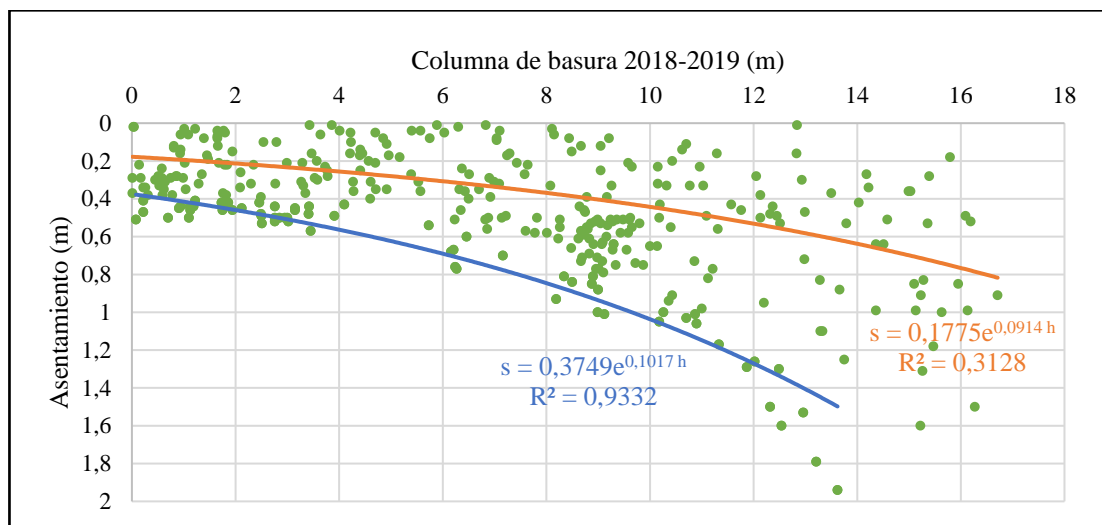
### 3.5.3. Función matemática

Los modelos matemáticos para la determinación de los asentamientos que se producen en un relleno sanitario se basan de acuerdo al tiempo de disposición de los residuos sólidos, por lo que se necesitaría de información constante en cuanto a las topografías y/o la utilización de la instrumentación adecuada en el relleno sanitario para obtener datos de asentamientos con respecto al tiempo y con ello determinar alguna función empírica que estime este comportamiento como son las funciones presentadas por Ling, Leshchinsky, Mohri y Kawabata (1998) de tipo logarítmica, de potencia, hipérbolica, entre otras utilizadas en varios estudios de diversos autores. Sin embargo, al no contar con esta información topográfica constante ni la instrumentación adecuada en el Relleno Sanitario de Pichacay se optó por determinar una función matemática que relacione los asentamientos que se producen en el período de uno y diez años desde



su disposición en base a la altura de la columna de basura analizada por cada punto de análisis topográfico dentro de la zona estudiada.

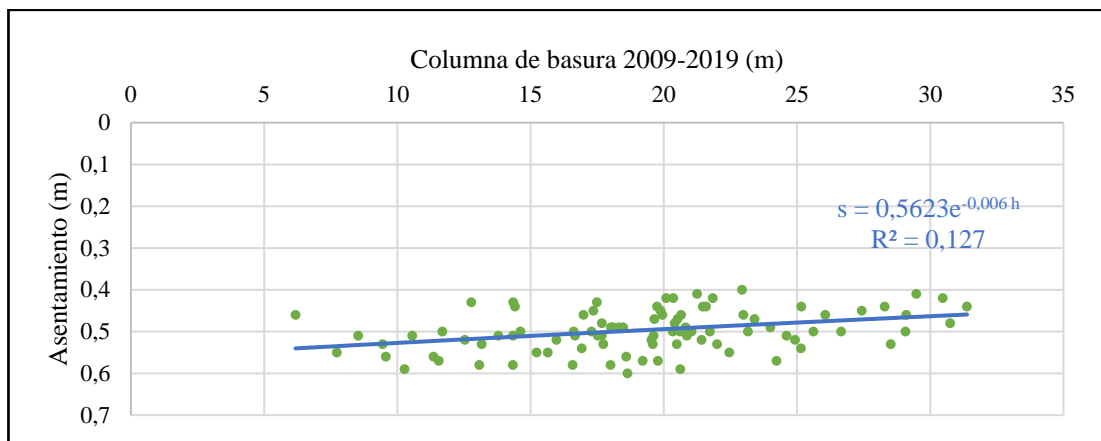
En la Figura 3.8 se muestra una gráfica de dispersión de cada uno de los puntos de análisis en las cuales la abscisa corresponde a la altura de columna de basura y la ordenada el asentamiento producido, ambos en metros. Además, se presenta una línea de tendencia de estos puntos y una función límite que representa los máximos valores de asentamiento de acuerdo a la altura de columna de basura dispuesta en un año.



**Figura 3.8.** Relación entre los asentamientos y la altura de la columna de residuos del Relleno Sanitario de Pichacay en un año.

*Fuente:* Elaboración Propia.

De la misma manera, en la Figura 3.9, se muestra una gráfica de dispersión de los puntos de análisis en la cual la abscisa corresponde a la altura de columna de basura y la ordenada el asentamiento producido, ambos en metros, pero en este caso comparando con la topografía de hace diez años, es decir desde el 2009.



*Figura 3.9. Relación entre los asentamientos y la altura de la columna de residuos del Relleno Sanitario de Pichacay en diez años.*

*Fuente: Elaboración Propia.*

En esta gráfica se aprecia como los asentamientos después de varios años pasan a tender a un decrecimiento en su valor, debido a que en este tiempo ya se encuentra en su etapa secundaria y por tanto solo se da la degradación de los residuos.

Con las dos primeras funciones se puede apreciar que los asentamientos que se producen en los residuos dispuestos en un año se incrementan de manera exponencial conforme la altura de basura dispuesta aumenta. Y para la tercera función se muestra como los asentamientos van disminuyendo después de pasado varios años. Con todo esto se determinó la Ecuación 18 la cual predice el movimiento vertical del Relleno Sanitario de Pichacay.

$$s = p * e^{q*h} \tag{18}$$

Donde:

$s$ = Asentamiento producido desde la disposición en m.

$e$ = Constante de Euler  $\approx 2,71828$ .

$h$ = Altura de la columna de residuos en m.

$p, q$ = Constantes empíricas.

A continuación, en la Tabla 3.8 se presentan las constantes empíricas determinadas en la ecuación presentada anteriormente que describen el comportamiento vertical que tienen los residuos sólidos en el primer año desde su disposición en el Relleno Sanitario de Pichacay.

*Tabla 3.8. Parámetros utilizados para la ecuación del asentamiento.*

<b>Línea de tendencia</b>	<b>p</b>	<b>q</b>	<b>R</b>
Promedio (1 año)	0,1775	0,0914	0,3128
Máximo (1 año)	0,3749	0,1017	0,9308
Máximo (10 años)	0,5623	-0,006	0,127

*Fuente: Elaboración Propia.*

Primeramente, se puede apreciar que la constante empírica “p” toma valores entre 0,1775 y 0,5623 y que la constante “q” toma valores positivos cuando los asentamientos de acuerdo a la altura de columna de basura van aumentando y negativos cuando van disminuyendo.

Por otra parte, el coeficiente de correlación de la función promedio en un año es muy inferior a la unidad, esto debido a la gran dispersión que tienen los datos, pues en la Figura 3.8 se observa que los asentamientos se mantienen entre 0 y 60 cm en los 6 primeros metros de altura de los residuos sólidos. De los 8 a los 10 metros predomina un asentamiento entre los 40 y los 80 cm, y a partir de ahí los asentamientos incrementan de manera exponencial, alcanzando valores cercanos a los 2 metros de asentamiento después de los 10 metros de altura de basura dispuesta en un año.

Asimismo, la función límite en este período de tiempo se puede utilizar para predecir los máximos valores de asentamiento que se pueden producir a corto plazo, para así conocer el volumen de basura extra que se puede disponer después del primer año y además calcular con mayor exactitud la vida útil que tendrá el relleno sanitario.

Por último, el valor de coeficiente de correlación de la función máxima en un período de diez años muestra la gran dispersión que existe en los datos por lo que es necesario estudiar de manera más profunda y así obtener datos más confiables de estos

asentamientos a largo plazo. Lo que se quiso demostrar con esta gráfica es la tendencia de los asentamientos que van cada vez a menos conforme pasa el tiempo.

## CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES

### 4.1. Consideraciones iniciales

Para realizar la elaboración del modelo que represente las condiciones actuales en las que se encuentran los taludes del Relleno Sanitario de Pichacay en la ciudad de Cuenca, es importante tomar en cuenta factores como la geometría de los taludes, parámetros geomecánicos del material, presión intersticial, asentamientos y sobrecargas.

En cuanto a la geometría de los taludes, es importante considerar tanto el ángulo de inclinación como la altura que tiene cada una de las terrazas conformadas. A esto se le debe tomar en cuenta también, los parámetros geomecánicos como la cohesión y el ángulo de fricción de los materiales que componen dichas celdas, especialmente de los residuos sólidos, los cuales representan un mayor volumen en comparación con el material de cobertura. Estos parámetros supondrán un criterio de falla lineal de Mohr-Coulomb, por lo que estos valores se mantendrán constantes con la profundidad.

Además, las presiones de agua de poros es otro de los factores muy importantes a considerar en cuanto a la estabilidad de los taludes de un relleno sanitario, pues un incremento en las presiones intersticiales en las celdas de disposición puede significar una disminución en la resistencia al corte de los materiales anteriormente mencionados.

Por otra parte, los asentamientos producidos en un relleno sanitario pueden generar fisuras y agrietamientos en el suelo de cobertura que dejan a los residuos descubiertos y facilitan la infiltración del agua superficial al interior de la masa de residuos, incrementando así, las presiones intersticiales y por ende su nivel freático. Por ello, se debe considerar un buen sistema de evacuación de las aguas superficiales e impermeabilización del suelo de cobertura.

En lo que respecta al modelo de estabilidad de taludes del Relleno Sanitario de Pichacay, es importante mencionar que este se realizó para su fase de construcción 2, correspondiente a las celdas de disposición más recientes y de la cual se tiene la información topográfica para su respectivo análisis. De esta forma, es posible analizar

su estabilidad mediante la geometría de cada una de las celdas, es decir con las alturas y los ángulos de inclinación de los taludes.

También es necesario destacar que, aunque los residuos sólidos son materiales heterogéneos, la evaluación de su estabilidad se desarrolla normalmente en base a los procedimientos y principios básicos de la geotecnia convencional. En este sentido, Moreno (2013) destaca que, aun cuando el material depositado es heterogéneo, los resultados de los ensayos de penetración de varios puntos estudiados en un relleno sanitario demuestran relación entre sí, es decir, se puede deducir que la masa de residuos siendo heterogénea a pequeña escala, se puede estimar como un material homogéneo a gran escala. Por lo que los taludes conformados de residuos tendrán una mecánica de falla tipo rotacional, más específicamente una superficie de rotura aproximadamente circular.

Del mismo modo, el análisis supone que no existen presiones intersticiales debido a la presencia de los lixiviados y biogás por el hecho de que el Relleno Sanitario de Pichacay cuenta con un buen sistema de extracción de estos compuestos, por lo que este factor no va a influir sobre la estabilidad de los taludes del relleno para las condiciones actuales.

Por otra parte, se supone que todos los materiales dispuestos en el relleno sanitario se encuentran debidamente compactados y por ende tendrán la misma densidad, esto con el objetivo de que los materiales presenten las mismas características resistentes y tenga el mismo comportamiento a cualquier profundidad.

Para el análisis de estabilidad de los taludes del Relleno Sanitario de Pichacay, se toma la norma de calidad ambiental para el manejo y disposición final de desechos sólidos no peligrosos de la Presidencia de la República del Ecuador (2003). Esta sugiere analizar y diseñar la estabilidad en condiciones estática y dinámica (sismos). Para ello, la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-GC, 2015) en su capítulo "Geotecnia y Cimentaciones" propone un factor de seguridad mínimo de 1,5 para la condición estática y de 1,05 para la pseudo estática o dinámica, como se observa en la Tabla 4.1.

*Tabla 4.1. Factores de seguridad mínimos.*

<b>Condición</b>	<b>FS Mínimo</b>	
	<b>Diseño</b>	<b>Construcción</b>
Carga Muerta + Carga Viva Nominal	1,5	1,25
Carga Muerta + Carga Viva Máxima	1,25	1,1
Carga Muerta + Carga Viva Nominal + Sismo de diseño pseudo estático	1,1	1
Taludes – condición estática y agua subterránea normal	1,5	1,25
Taludes – condición pseudo estática con agua subterránea normal y coeficiente sísmico de diseño	1,05	1

*Fuente: NEC-SE-GC (2015, p. 31).*

Por último, para el análisis dinámico, el modelo utiliza el método pseudo estático el cual asume un coeficiente sísmico para cada una de las fuerzas que actúan en un sismo (horizontal y vertical). Las fuerzas horizontales disminuyen el factor de seguridad, mientras que las fuerzas verticales tienen menos influencia, ya que pueden reducir o aumentar la resistencia de cada una de las dovelas. Este último factor al depender de la dirección con la que viene el sismo, se asume despreciable para el análisis (Pincay, 2020).

La Norma Ecuatoriana de la Construcción en su capítulo “Peligro sísmico, diseño sismo resistente” (NEC-SE-DS, 2015) establece un método de cálculo para el coeficiente horizontal mediante la determinación de un factor Z de acuerdo a la zonificación sísmica del Ecuador, como se muestra en el mapa de la Figura 4.1.

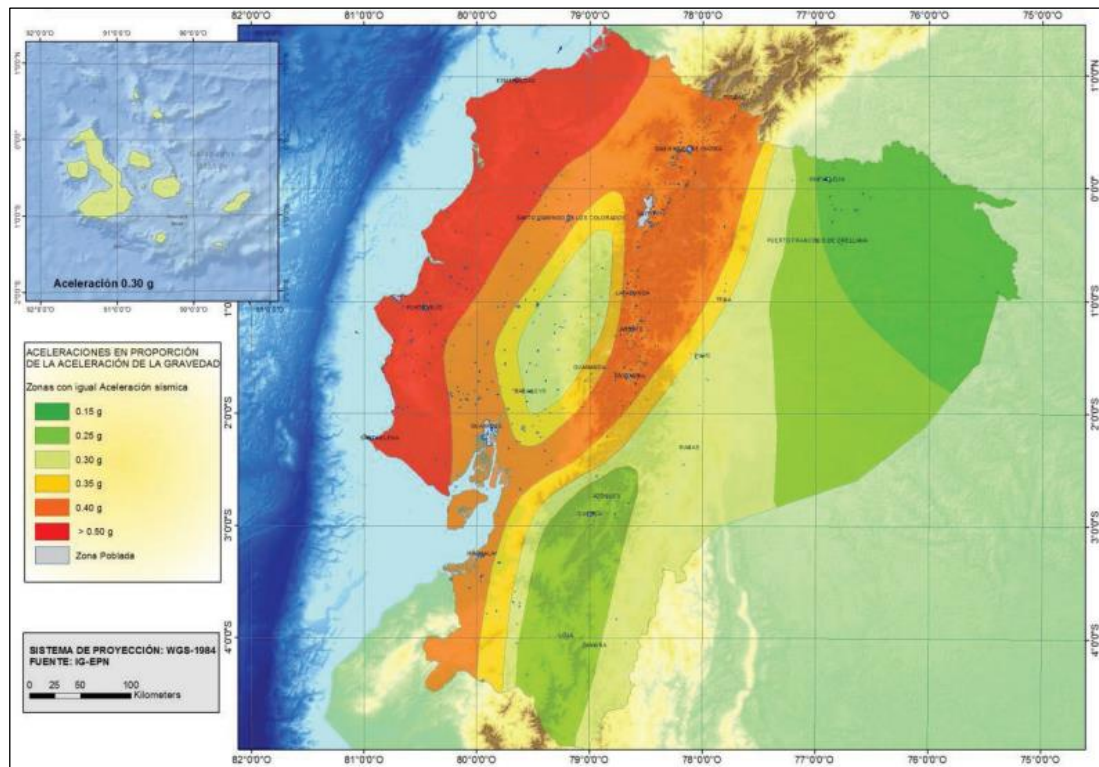


Figura 4.1. Ecuador, zonas sísmicas para propósitos de diseño y valor del factor de zona Z.

Fuente: NEC-SE-DS (2015, p. 109).

La zona de la provincia del Azuay se encuentra en la zona II, por lo que le corresponde un valor del factor Z de 0,25 como se aprecia en la Tabla 4.2, lo que indica una zona de peligro sísmico alto.

Tabla 4.2. Valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada.

Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Valor factor Z	0,15	0,25	0,30	0,35	0,40	≥ 0,50
Caracterización del peligro sísmico	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy alta

Fuente: NEC-SE-DS (2015, p. 27).

Asimismo, la NEC-SE-GC (2015) señala que la demanda sísmica para los análisis pseudo estáticos deberá ser del 60% de la aceleración máxima en el terreno, es decir



que para el análisis en estas condiciones se debe considerar una aceleración de cálculo a modo de sobrecarga horizontal de 0,15g.

## **4.2. Análisis de estabilidad de taludes del Relleno Sanitario de Pichacay**

### **4.2.1. Modelado de los taludes**

Para el análisis de estabilidad de taludes del Relleno Sanitario de Pichacay se han escogido los perfiles considerados como representativos de la fase 2 con las condiciones más desfavorables desde el punto de vista mecánico (Figura 4.3), además de que se han observado las zonas en donde se han producido mayores asentamientos (Figura 4.2), taludes construidos dentro del período de análisis (Figura 4.4) y por último la zona del relleno que ya se encuentra sellada y clausurada (Figuras 4.5 y 4.6). Estos perfiles se obtuvieron con base en los levantamientos topográficos realizados en la zona, como se puede apreciar en el Anexo 13, los cuales fueron suministrados por la Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca (EMAC EP).

Posteriormente, estos perfiles fueron modelados mediante la utilización del programa informático GeoStudio: SLOPE/W, teniendo en cuenta que la altura de las terrazas es de aproximadamente 5 metros y las capas de cobertura de cada terraza tienen de 50 a 60 cm de espesor.



Figura 4.2. Taludes y terrazas del perfil 1 del Relleno Sanitario de Pichacay.

Fuente: Elaboración Propia.



Figura 4.3. Taludes y terrazas del perfil 2 del Relleno Sanitario de Pichacay.

Fuente: Elaboración Propia.

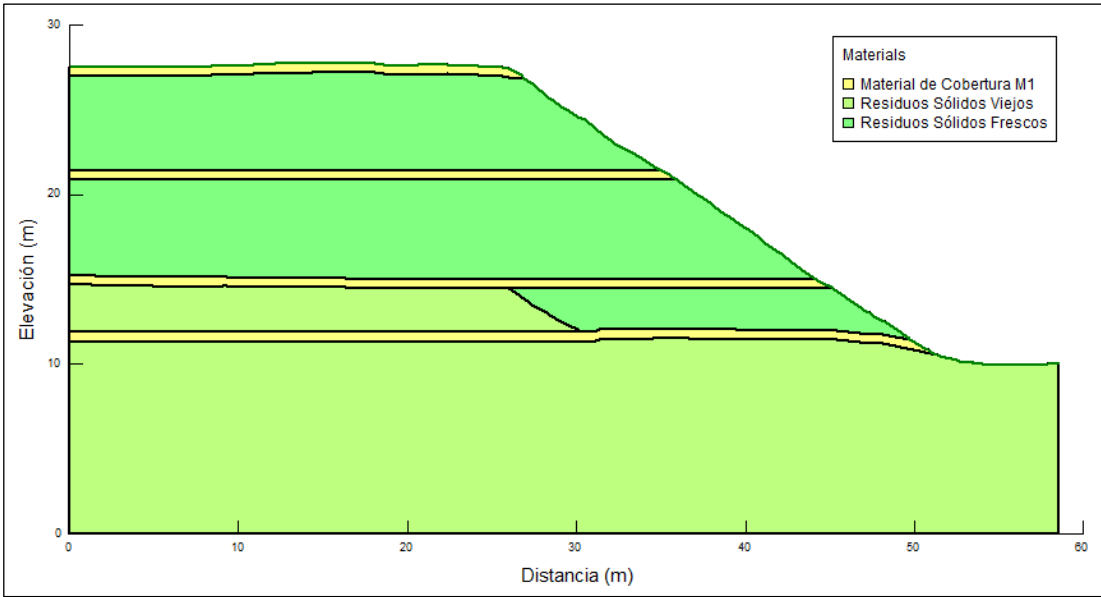


Figura 4.4. Taludes y terrazas del perfil 3 del Relleno Sanitario de Pichacay.

Fuente: Elaboración Propia.

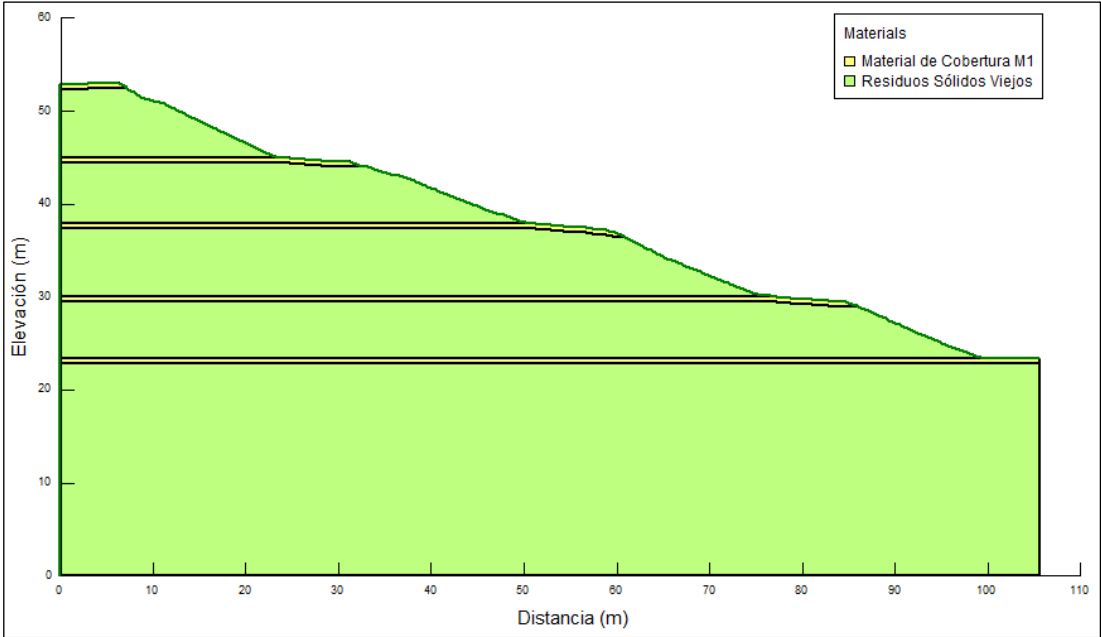


Figura 4.5. Taludes y terrazas del perfil 4 del Relleno Sanitario de Pichacay.

Fuente: Elaboración Propia.



*Figura 4.6. Taludes y terrazas del perfil 5 del Relleno Sanitario de Pichacay.*

*Fuente: Elaboración Propia.*

#### **4.2.2. Parámetros utilizados**

Para el análisis de cada uno de los modelos, se utilizaron valores obtenidos de los ensayos de laboratorio realizados, para el caso del suelo de cobertura y valores de los parámetros geomecánicos de la literatura internacional indagada para el caso de los residuos sólidos.

##### **4.2.2.1. Suelo de cobertura**

Para conocer los valores de densidad, cohesión y ángulo de fricción del suelo de cobertura utilizada en el Relleno Sanitario de Pichacay se realizaron ensayos de laboratorio necesarios con el fin de utilizarlos posteriormente en los análisis de estabilidad de taludes. Entre estos ensayos de laboratorio se incluye la clasificación de suelos, densidades de campo, compresión simple, compactación Proctor simple y corte directo. Estos ensayos se llevaron a cabo en el laboratorio de suelos GEOLAB Exploración y los resultados se presentan en los Anexos 1 y 2. La Tabla 4.3, además,

resume estos resultados, los cuales son los valores que se van a utilizar para análisis posteriores.

*Tabla 4.3. Parámetros resistentes del suelo de cobertura del Relleno Sanitario de Pichacay.*

<b>Estrato</b>	<b>Densidad (ton/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Cohesión (ton/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Ángulo de fricción (°)</b>
Material de Cobertura M1	1,57	1,08	15

*Fuente: Elaboración Propia.*

#### **4.2.2.2. Residuos sólidos**

Las propiedades geomecánicas de los residuos sólidos son muy heterogéneos y varían mucho de unos ensayos a otros y de unas zonas a otras, incluso en el mismo relleno. Sin embargo, existen valores conservadores que se pueden aplicar para mayor seguridad en la construcción de los mismos, como es el caso del criterio de Palma (1995), el cual muestra un diagrama el cual se observa en la Figura 4.7, en donde marca una zona recomendada para tomar valores de diseño tanto de ángulo de fricción como de cohesión. Este criterio de selección de los parámetros geomecánicos es el más utilizado en el diseño y la práctica en la construcción de rellenos sanitarios debido a su sencillez.

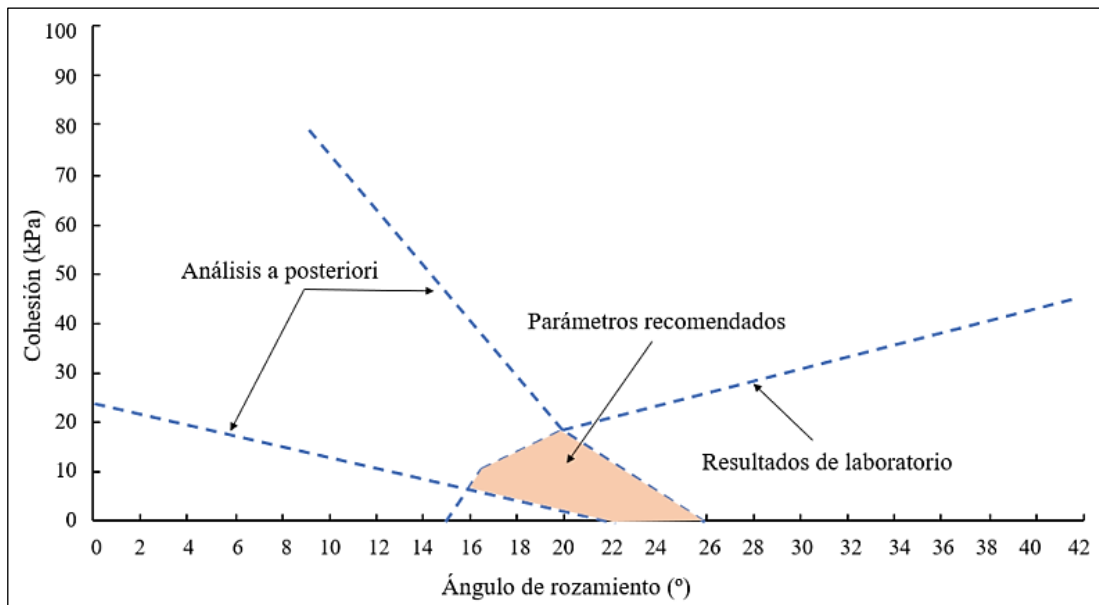


Figura 4.7. Parámetros geotécnicos recomendados para el diseño de rellenos sanitarios.

Fuente: Adaptado de Palma (1995) citado en Rodrigo (2020, p. 72).

Cabe mencionar que también se han realizado distintos ensayos geotécnicos en rellenos sanitarios alrededor de todo el mundo, los cuales se han encontrado en diferentes estudios de la literatura científica. En la Tabla 4.4 se muestran 7 reportes de un total de 61 parámetros reportados por varios autores, los mismos que se detallan en el Anexo 7. Es aquí donde se puede apreciar el alto rango de variación que existe entre los valores de cohesión y ángulo de fricción que presentan los residuos sólidos.

Tabla 4.4. Parámetros de resistencia al corte en rellenos sanitarios obtenidos por distintos autores a nivel global.

Fuente	Cohesión (ton/m <sup>2</sup> )	Ángulo de fricción (°)	Observaciones
Benvenuto y Cunha (1991)	1,35	22	▪ Back analysis del deslizamiento en el relleno sanitario Bandeirantes, Sao Paulo, Brasil.
Sánchez, Palma y Sagasetta (1995)	0 – 2	16 – 26	▪ Densidad sin compactar de 0,2 ton/m <sup>3</sup> y compactados de 0,8 a 1 ton/m <sup>3</sup> .

D'Escrivan (2000)	1	25	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Densidad de 2 ton/m<sup>3</sup>.</li> <li>▪ Relleno sanitario La Bonanza en Caracas, Venezuela.</li> </ul>
González y Espinoza (2003)	0 – 1,1 0,42 – 2,33	8,1 – 37 13 – 29,9	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ensayos realizados en perforaciones en diferentes zonas del relleno sanitario Doña Juana, Bogotá, Colombia.</li> </ul>
Geotecnia Ambiental Ltda. (2010)	2 – 8	19 – 22	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Residuos compactados con densidad de 1,2 ton/m<sup>3</sup>.</li> <li>▪ Relleno sanitario de Santa Marta, Chile.</li> </ul>
Ramos y Gorraiz (2013)	1,8	20	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Densidad de 1 ton/m<sup>3</sup>.</li> <li>▪ Relleno sanitario Carapacho, Chiquinquirá, Colombia.</li> </ul>

*Fuente: Elaboración Propia.*

Para realizar los análisis de estabilidad de la geometría proyectada del Relleno Sanitario de Pichacay se consideraron los parámetros resistentes de Benvenuto y Cunha (1991) para los residuos sólidos viejos y de Ramos y Gorraiz (2013) para los residuos sólidos frescos, los cuales fueron escogidos de acuerdo a varios factores como la densidad del relleno, la composición porcentual de los residuos depositados (Anexo 8) y el tiempo de deposición de los mismos. Estos valores se presentan en la Tabla 4.5, los cuales se ajustan a los valores recomendados por Palma (1995), como se observa en la Figura 4.7 para el diseño y operación del relleno.

El valor de densidad se ha obtenido con los valores de pesaje y los datos topográficos suministrados por la EMAC EP, de donde se obtuvieron diferentes puntos los cuales trazan una curva de tendencia de la densidad con respecto al tiempo de deposición en la que se encuentran los residuos sólidos, como se aprecia en la Figura 3.1. Con base en esto, se ha calculado un valor de densidad de 1,19 ton/m<sup>3</sup> de acuerdo a la zona

estudiada. Este valor se determinó del promedio de los valores de densidad determinado en la Tabla 3.3, los cuales corresponden al Relleno Sanitario de Pichacay en el período de análisis establecido.

*Tabla 4.5. Parámetros resistentes de los residuos sólidos del Relleno Sanitario de Pichacay.*

<b>Estrato</b>	<b>Densidad (ton/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Cohesión (ton/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Ángulo de fricción (°)</b>
Residuos sólidos viejos	1,19	1,35	22
Residuos sólidos frescos	1,19	1,8	20

*Fuente: Elaboración Propia.*

#### **4.2.3. Análisis de estabilidad**

Para el análisis y el diseño de los taludes del Relleno Sanitario de Pichacay se ha utilizado el modelo computacional GeoStudio: SLOPE/W, el cual utiliza la teoría de equilibrio límite de fuerzas y momentos para calcular el factor de seguridad del talud. Este software simplifica la ejecución del cálculo en la estabilidad de taludes ya que está diseñado específicamente para este tipo de cálculos, además de que permite analizar suelos tanto homogéneos como estratificados y con geometrías de taludes complejas.

El programa presenta varios modelos como los propuestos por Fellenius, Bishop, Janbú, Spencer, Morgenstern-Price, entre otros, y considera para su análisis, los casos estático y pseudo estático. El primero permite evaluar las condiciones actuales de estabilidad, mientras que el análisis pseudo estático toma en cuenta los efectos sísmicos mediante un coeficiente de aceleración que simule los efectos de un terremoto.

El estudio obtiene el factor de seguridad asociado a la condición específica mediante el método de Spencer. Asimismo, entiéndase en los casos que lo amerite FSE como factor de seguridad estático y FSD como factor de seguridad pseudo estático o dinámico.



#### 4.2.3.1. Perfil 1

Como se ha mencionado en apartados anteriores, este perfil supone que los residuos sólidos se encuentran en condición drenada. De esta forma, se utilizó en el modelo una densidad o peso específico de  $1,19 \text{ ton/m}^3$ , así como un valor de cohesión de  $1,35 \text{ ton/m}^2$  y ángulo de fricción de  $22^\circ$ .

Por su parte, para el análisis supone que el material de cobertura también se encuentra en condición drenada, por tanto, se utilizaron valores de densidad o peso específico de  $1,57 \text{ ton/m}^3$ , cohesión de  $1,08 \text{ ton/m}^2$  y ángulo de fricción de  $15^\circ$ .

Primeramente, se procedió a analizar cada uno de los taludes locales del perfil 1 tal como se encuentra en el sitio, es decir con las alturas y las inclinaciones de campo para posteriormente realizar un análisis global de estabilidad.

El estudio se efectuó bajo la condición estática y pseudo estática o dinámica, mediante el método de Spencer, a fin de determinar el comportamiento de los taludes analizados bajo cada una de las condiciones anteriormente descritas. En la Figura 4.8 se presenta la información obtenida para los taludes en estudio.

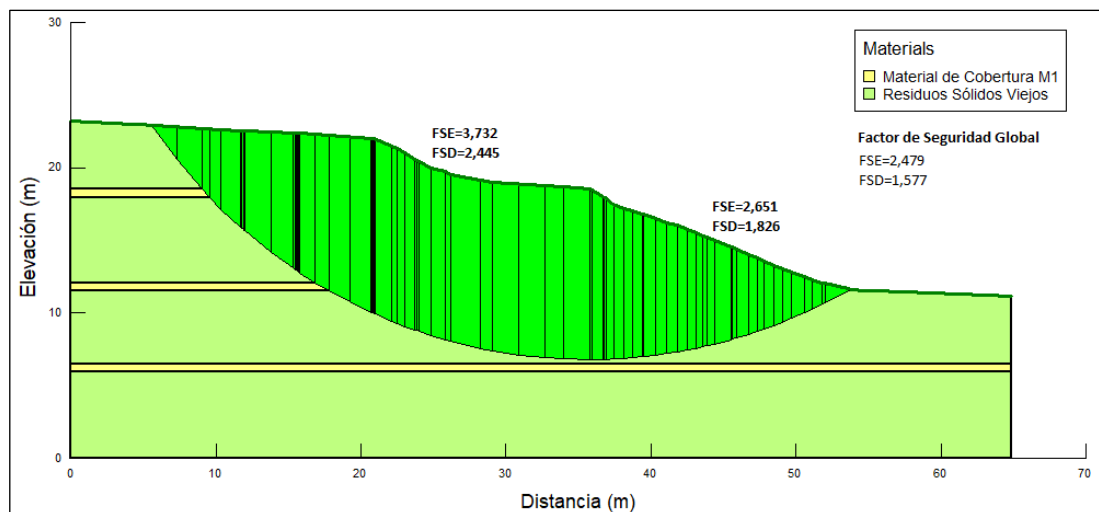


Figura 4.8. Valores de factor de seguridad locales y global del perfil 1.

Fuente: Elaboración Propia.

Como puede observarse a partir de la información suministrada, todos los factores de seguridad obtenidos para el caso del perfil 1 son mayores a 1,5 (factor de seguridad mínimo en condición estática) y a 1,05 (factor de seguridad mínimo en condición

pseudo estática), por tanto, podría inferirse que los taludes modelados en esta parte del relleno se encuentran estables. No obstante, estos valores se encuentran muy por encima de lo mínimo requerido debido a que no se encuentra clausurada esa zona, eso quiere decir que se seguirán disponiendo de más residuos para finalmente sellar y optimizar el espacio con los taludes más empinados, reduciendo así los factores de seguridad.

#### **4.2.3.2. Perfil 2**

Para este estudio, tal como el perfil 1 analizado anteriormente, se utilizaron para los residuos sólidos valores de densidad o peso específico de  $1,19 \text{ ton/m}^3$ , cohesión de  $1,35 \text{ ton/m}^2$  y ángulo de fricción de  $22^\circ$ . Asimismo, el material de cobertura al encontrarse en condición drenada se utilizaron valores de densidad o peso específico de  $1,57 \text{ ton/m}^3$ , cohesión de  $1,08 \text{ ton/m}^2$  y ángulo de fricción de  $15^\circ$ .

Al igual que el análisis anterior, se procedió a realizar el estudio de los taludes tanto locales como el análisis global de todo el perfil bajo las condiciones en las que se encuentra en el sitio, es decir, con sus alturas y ángulos de inclinación reales. Este análisis se efectuó bajo la condición estática y pseudo estática, cuyos resultados se muestran en la Figura 4.9.

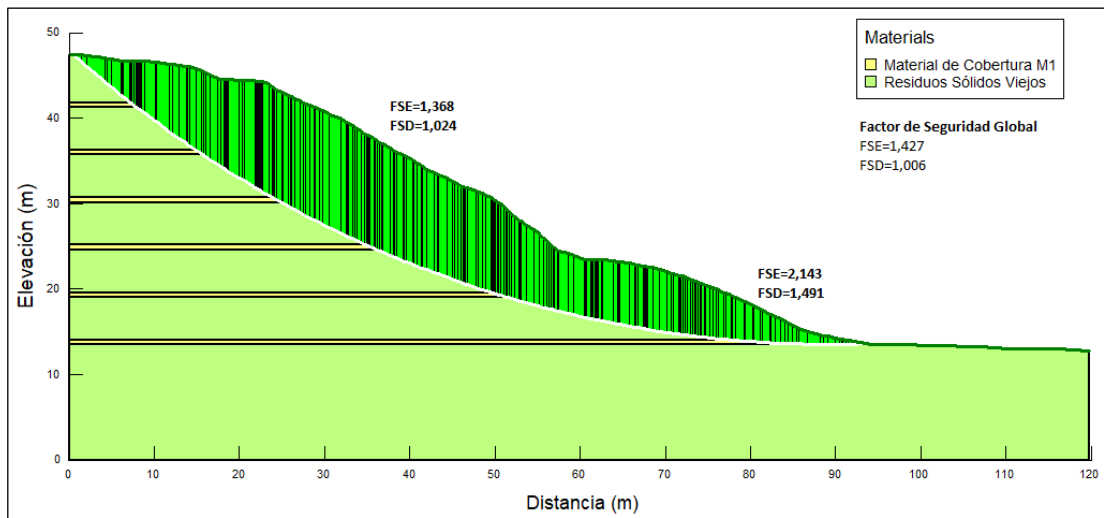


Figura 4.9. Valores de factor de seguridad locales y global del perfil 2.

Fuente: Elaboración Propia.

Como puede apreciarse en los resultados obtenidos, el talud inferior del perfil 2 es estable para las dos condiciones (estática y pseudo estática). No obstante, tanto el talud superior como el análisis global de todo el perfil no cumplen con los factores de seguridad mínimos requeridos, donde se tienen valores inferiores a 1,5 para la condición estática y menores a 1,05 para la condición pseudo estática.

Se debe tener en cuenta que los ángulos de los taludes superior e inferior son similares, sin embargo, el primero comprende una altura mucho mayor que el talud inferior, por lo que podría inferirse que a mayor altura puede presentarse mayores problemas de estabilidad bajo estas condiciones.

#### 4.2.3.3. Perfil 3

Para este perfil se ha tomado en cuenta la disposición de residuos sólidos frescos encima de los residuos sólidos viejos, en condición drenada para los dos casos. De esta forma, para los residuos sólidos frescos se utilizó para el modelo una densidad o peso específico de 1,19 ton/m<sup>3</sup>, así como un valor de cohesión de 1,8 ton/m<sup>2</sup> y ángulo de fricción de 20°. Y, para el caso de los residuos sólidos viejos se utilizaron valores de densidad o peso específico de 1,19 ton/m<sup>3</sup>, cohesión de 1,35 ton/m<sup>2</sup> y ángulo de fricción de 22°.

Asimismo, los valores de suelo de cobertura son los mismos que los perfiles anteriores, pues corresponde al material extraído del propio sitio.

Para este caso, se realizó el análisis estático y pseudo estático del único talud presente en el perfil 3, obteniendo resultados que se pueden apreciar en la Figura 4.10.

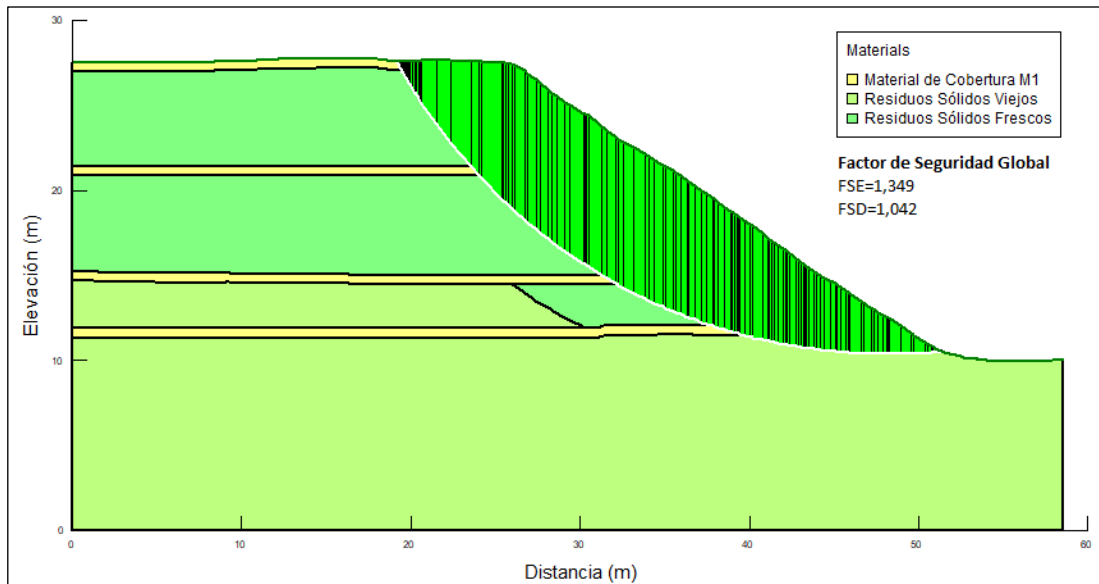


Figura 4.10. Valores de factor de seguridad global del perfil 3.

Fuente: Elaboración Propia.

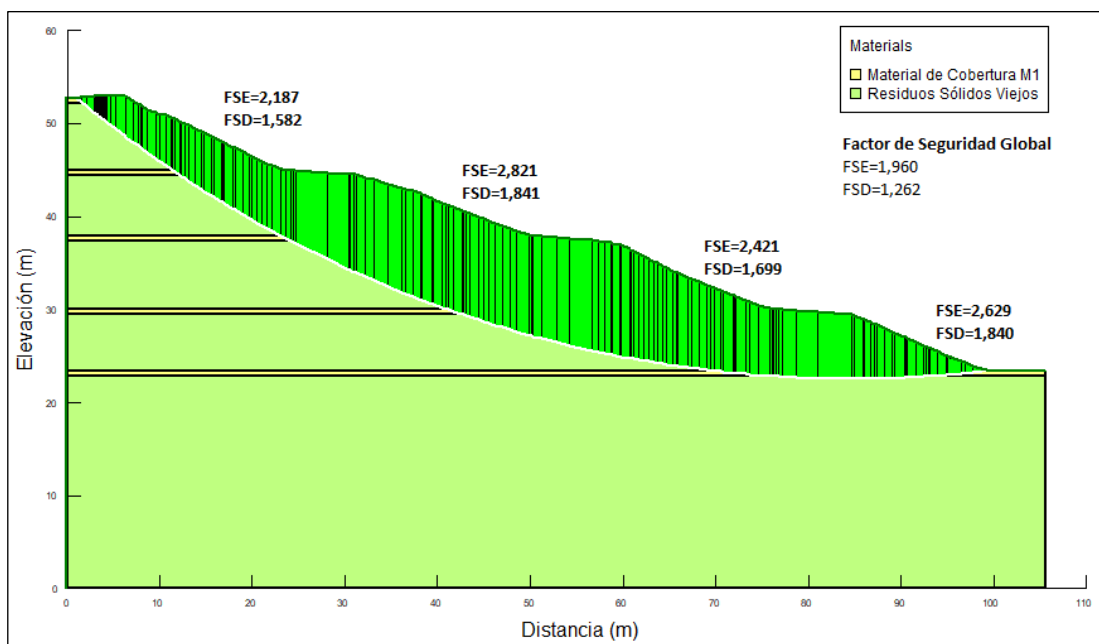
Para este perfil, se observa que el talud construido recientemente no cumple con los valores de factores mínimos requeridos tanto para el caso estático como para el pseudo estático, sin embargo, no es una zona que se encuentra clausurada, por lo que se seguirá disponiendo de basura variando así la geometría y por ende la estabilidad del mismo.

#### 4.2.3.4. Perfil 4

Como se ha mencionado anteriormente, este perfil se encuentra sellado y clausurado, por lo que al tener un buen sistema de extracción de gases y lixiviados supone que tanto los residuos sólidos como el material de cobertura se encuentran en una condición drenada. Por tanto, se utilizó para el análisis los valores de densidad o peso específico de  $1,19 \text{ ton/m}^3$ , cohesión de  $1,35 \text{ ton/m}^2$  y ángulo de fricción interna de  $22^\circ$  para el caso de los residuos sólidos.

En lo que corresponde al material de cobertura se utilizaron los mismos valores de densidad, cohesión y ángulo de fricción de los análisis anteriores.

Asimismo, se realizó el análisis estático y pseudo estático de los taludes tal y como se encuentran actualmente en el sitio con las alturas e inclinaciones de campo. De igual manera se realizó el estudio por partes, primero para cada uno de los taludes locales para finalmente realizar un análisis global de toda la masa de residuos del perfil 4, como se observa en la Figura 4.11.



**Figura 4.11.** Valores de factor de seguridad locales y global del perfil 4.

*Fuente:* Elaboración Propia.

Como se puede apreciar en el estudio realizado, los factores de seguridad obtenidos del análisis local y global del perfil 4 son mayores a 1,5 para la condición estática y de 1,05 para la pseudo estática, por tanto, se puede inferir que estos taludes, los cuales ya se encuentran sellados y clausurados, se encuentran todos estables.

#### 4.2.3.5. Perfil 5

Para este estudio, tal como el perfil 4 analizado anteriormente, se utilizaron para los residuos sólidos valores de densidad o peso específico de 1,19 ton/m<sup>3</sup>, cohesión de 1,35 ton/m<sup>2</sup> y ángulo de fricción interna de 22°. Asimismo, para el material de

cobertura se utilizaron los mismos parámetros geomecánicos que los estudios anteriores.

Al igual que el análisis anterior, se procedió a realizar el estudio de los taludes tanto locales como el análisis global de todo el perfil bajo las condiciones en las que se encuentra en el sitio, es decir, con sus alturas y ángulos de inclinación reales. Este análisis se efectuó bajo la condición estática y pseudo estática, cuyos resultados se muestran en la Figura 4.12.

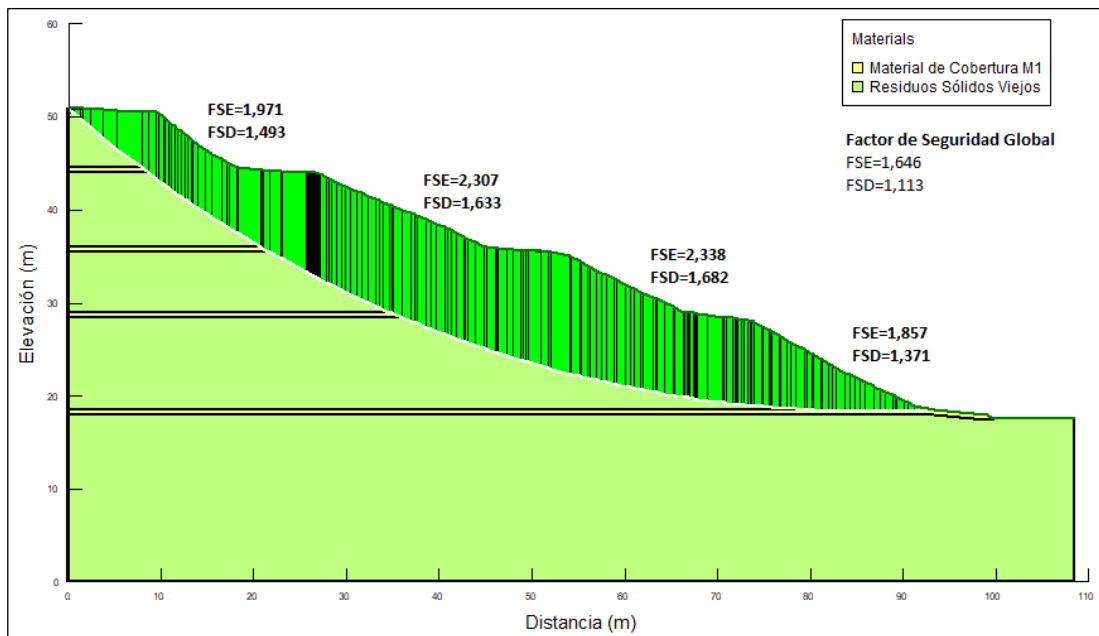


Figura 4.12. Valores de factor de seguridad locales y global del perfil 5.

Fuente: Elaboración Propia.

Como puede apreciarse en los resultados obtenidos, todos los factores de seguridad son mayores a los mínimos requeridos tanto para la condición estática como la pseudo estática, por lo que se puede inferir que se encuentran estables. Cabe destacar que este perfil analizado corresponde, al igual que el anterior, a una zona del relleno que se encuentra ya sellada y clausurada.

Cabe recalcar que los valores obtenidos de los perfiles 4 y 5 podrían mejorarse mediante la variación en su geometría, consiguiendo así, una reducción de sus factores de seguridad, esto con el objetivo de optimizar el espacio para mayor disposición de los residuos sólidos, estudio el cual se presentará en apartados posteriores.

### **4.3. Análisis de las diferentes alternativas de mejoramiento de los taludes inestables**

De la misma manera, se utiliza el modelo computacional GeoStudio: SLOPE/W para evaluar las condiciones de estabilidad de taludes para diferentes condiciones geométricas propuestas, usando los mismos parámetros obtenidos en los análisis previos, es decir, densidad, cohesión y ángulo de fricción. Cada geometría con los parámetros correspondientes constituye un modelo individual, el cual obtiene un factor de seguridad calculado mediante el método de Spencer.

De acuerdo al estudio de varias normativas sobre rellenos sanitarios en diferentes países del mundo, se observa que en la mayoría de ellas limitan la geometría de los taludes con inclinaciones máximas, que van desde:

- 1V:2,5H (21,8°, Banco Mundial).
- 1V:3H (18,4°, Australia, Sudáfrica, Chile, etc.), que permanecen estables a grandes alturas en condiciones normales.
- 1V:4H (14°, Canadá), que asegura taludes estables con alturas mayores a los 60 metros, en condiciones de saturación y coeficientes sísmicos mayores a 0,15.

En relación a lo anterior, la mayoría de los taludes de los perfiles escogidos para el análisis del Relleno Sanitario de Pichacay no cumplen con las geometrías recomendadas presentadas, sin embargo, algunos se encuentran estables debido a los parámetros geomecánicos utilizados en la construcción de los mismos, como por ejemplo la alta densidad a la que llegan al momento de compactar los residuos.

Como se puede observar en el análisis del apartado anterior, tanto los perfiles 2 como el 3 presentan taludes inestables, por lo que a continuación se realizará el análisis del mejoramiento para que lleguen a alcanzar una estabilidad adecuada mediante la variación del ángulo del talud y de las alturas utilizadas en su construcción.

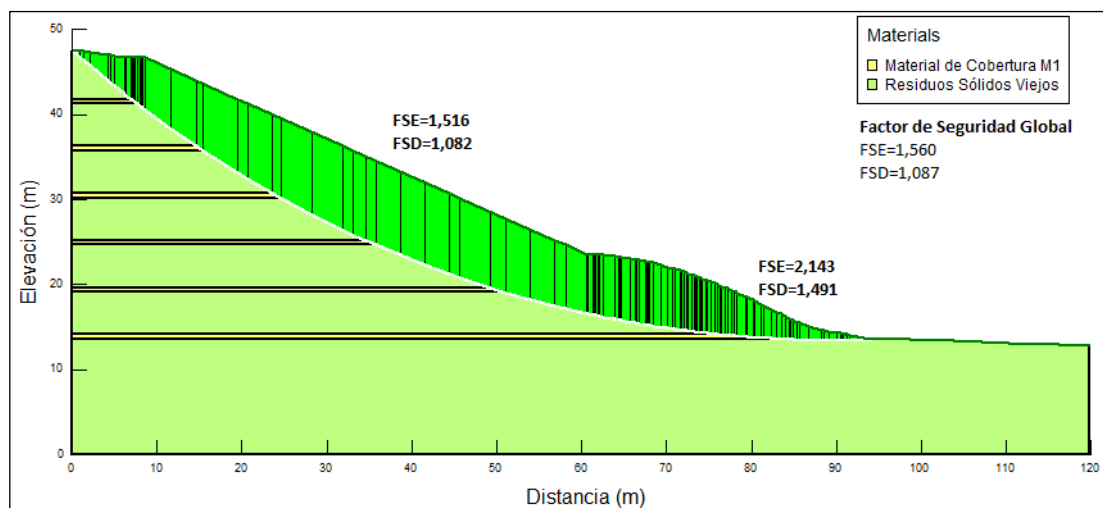
#### **4.3.1. Perfil 2**

Si bien es cierto tanto el talud superior como inferior del perfil 2 tienen similar ángulo de inclinación, aunque sus factores de seguridad varían de tal manera que solo el

segundo cumple con las condiciones de estabilidad, esto debido a que el talud superior tiene mayor altura con respecto al inferior, lo cual también afecta a la estabilidad global de todo el perfil analizado.

Cabe destacar que este perfil no es definitivo, es decir, no es una zona que se encuentra clausurada por lo que se seguirán disponiendo de más residuos encima de las terrazas y taludes ya conformados, sin embargo, esto no quiere decir que dichos taludes no deben encontrarse en condiciones de estabilidad adecuadas, por lo que a continuación se proponen dos alternativas de mejoramiento en la geometría de las bermas y taludes con el fin de que se encuentren en condiciones aptas de no deslizarse y por ende no afecte a la estabilidad global de todo el perfil.

La primera alternativa consiste en variar el ángulo del talud superior, manteniendo la misma altura a la que han alcanzado en esa zona de tal forma que llegue a cumplir con la estabilidad. Para esto, se necesita recostar el talud superior  $5^\circ$  para obtener un factor de seguridad estático de 1,516 (mayor a 1,5) y pseudo estático o dinámico de 1,082 (mayor a 1,05) para el análisis local y factor de seguridad global de 1,560 y 1,087 respectivamente. Tal como se muestra en la Figura 4.13.



**Figura 4.13.** Alternativa 1 para el mejoramiento de los taludes inestables del perfil 2.

*Fuente:* Elaboración Propia.

La segunda alternativa consiste en mantener el ángulo del talud superior, pero realizando un escalonamiento mediante bermas de 8 metros de ancho cada 5 metros



de altura, valores con que se maneja la EMAC EP en la construcción del relleno sanitario de Pichacay. Los resultados de esta alternativa se muestran en la Figura 4.14.

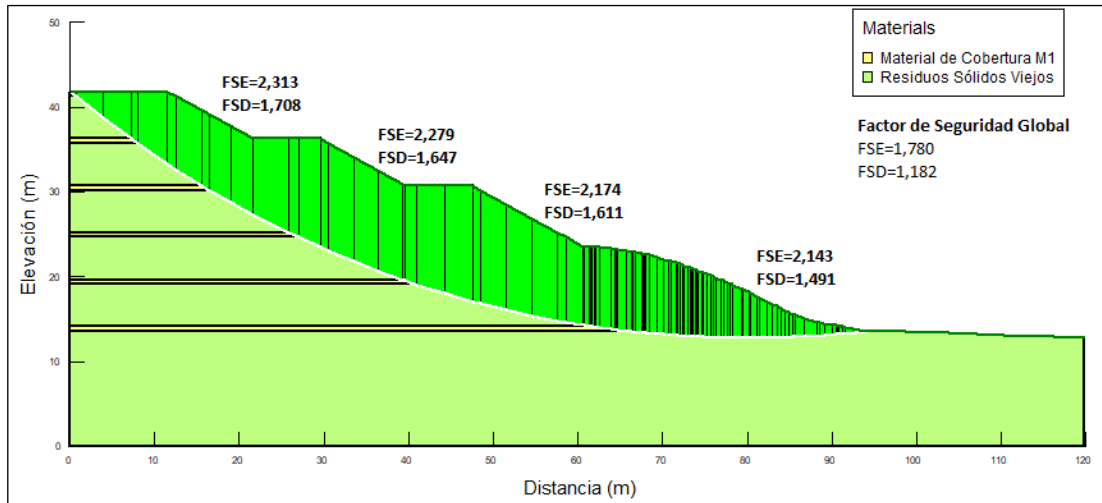


Figura 4.14. Alternativa 2 para el mejoramiento de los taludes inestables del perfil 2.

Fuente: Elaboración propia.

Cabe mencionar que con esta última alternativa los taludes provisionales se encuentran estables, sin embargo, los factores de seguridad podrían ser aún menores a los presentados, pero no se optimiza debido a que es una zona que no se encuentra sellada y clausurada por lo que se seguirán disponiendo de residuos sólidos encima.

### 4.3.2. Perfil 3

De igual manera se ha demostrado que el talud del perfil 3 no cumple con las condiciones de estabilidad adecuadas, por lo que a continuación se presentan dos alternativas de mejoramiento que se deberían tomar en cuenta para precautelar la seguridad en la construcción del relleno.

La primera alternativa consiste en mantener la misma altura con la que se encuentra esta zona del relleno sanitario, pero variando el ángulo de inclinación de tal manera que logre alcanzar los factores de seguridad adecuados que permitan asegurar la estabilidad de este talud, el cual, actualmente, presenta una inclinación de 34°. La Figura 4.15 muestra los resultados de reducir esta inclinación a 29°, valor máximo con el que dicho talud cumple con los criterios de estabilidad adecuada.

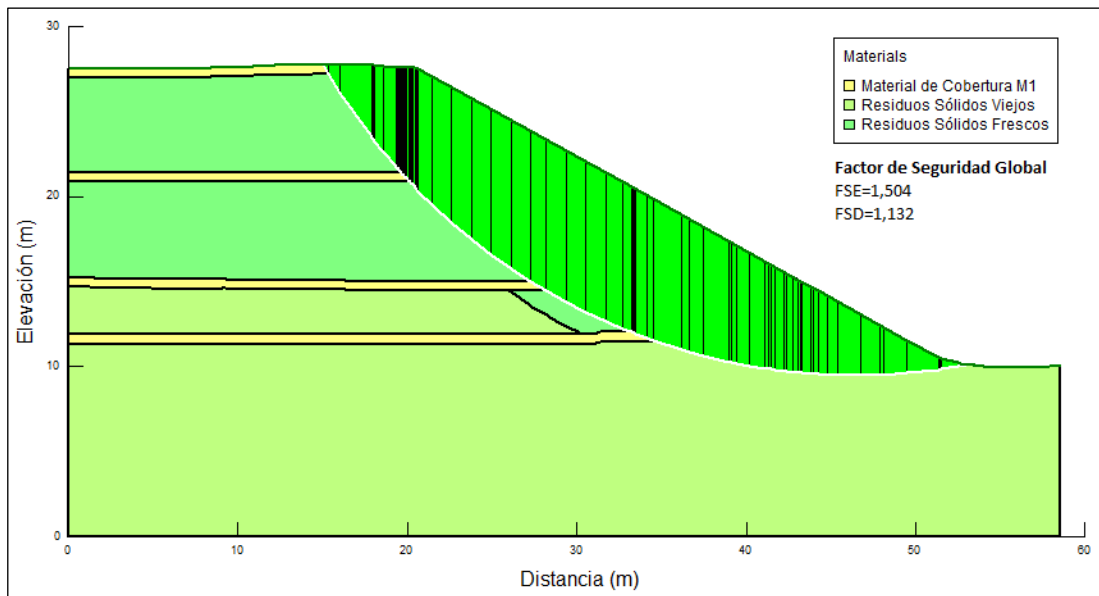


Figura 4.15. Alternativa 1 para el mejoramiento del talud inestable del perfil 3.

Fuente: Elaboración Propia.

Otra de las alternativas es realizar un escalonamiento cada 5 metros de altura con una berma de 8 metros de ancho, tal como se ha venido haciendo en la construcción de todo el relleno sanitario de Pichacay al momento de su cierre, manteniendo la inclinación del talud con la que se encuentra actualmente. En la Figura 4.16 se muestran los valores de factor de seguridad obtenidos de esta alternativa, los cuales se encuentran dentro de lo considerado seguro.

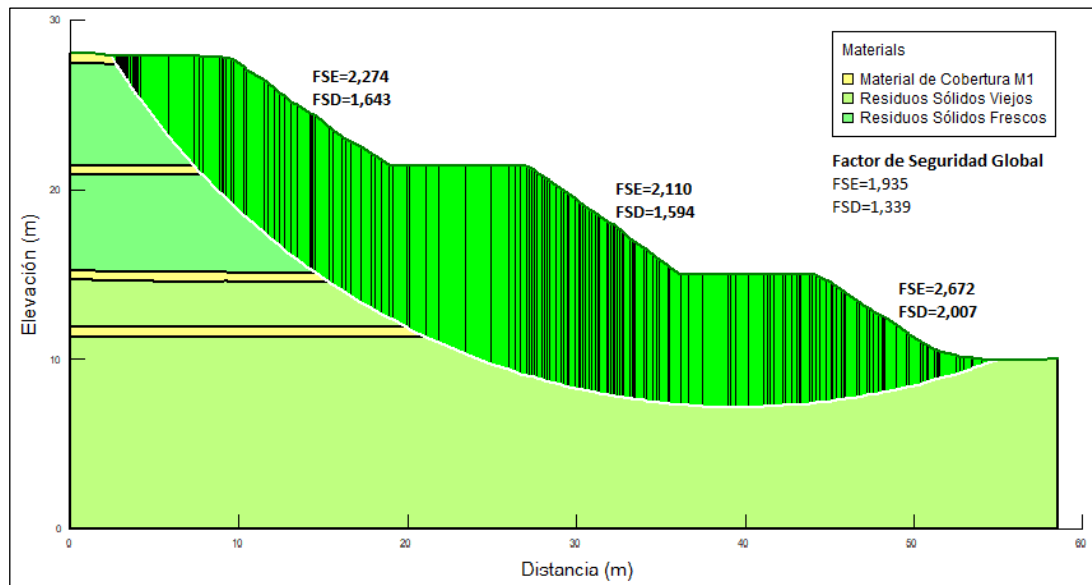


Figura 4.16. Alternativa 2 para el mejoramiento del talud inestable del perfil 3.

Fuente: Elaboración Propia.

Asimismo, esta zona del relleno sanitario no se encuentra sellada ni clausurada, por lo que el objetivo de este perfil no es optimizarlo debido a que se seguirán disponiendo de más residuos sólidos en un futuro y, por tanto, existirá una variación en la geometría y por ende en la estabilidad de todo el perfil.

#### 4.4. Geometría máxima posible

Se realizó un estudio para determinar la altura máxima y el ángulo de inclinación óptimo que pueden llegar a tener las terrazas y los taludes respectivamente, además del ancho de las bermas que se deben dejar para la construcción de la siguiente terraza que garantice la disposición del mayor volumen posible de residuos sólidos y además la estabilidad de los taludes que lo conforma tanto local como globalmente.

En este sentido, se probaron otras elevaciones y anchos de las bermas de lo que se encuentra actualmente en el relleno sanitario de Pichacay, la cual de acuerdo a la información suministrada por la Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca (EMAC EP) se construyen las terrazas cada 5 metros de altura con bermas de 8 metros, alcanzando alturas de aproximadamente 30 metros. Así, obtienen factores de seguridad un poco elevados comparado con lo mínimo aceptable.

Debido a esto, se realizó el análisis de 5, 10, 15 y 30 metros de altura para cada terraza, así como anchos de bermas de 4, 6, 8, 10 y 12 metros. Con base en esto, se obtuvieron los valores de inclinaciones máximas de los taludes locales para que cumplan con su estabilidad local y global dentro del relleno sanitario. Estos ángulos de inclinación se aprecian en la Tabla 4.6.

*Tabla 4.6. Valores de pendientes de inclinación máxima de acuerdo a diferentes geometrías.*

Altura de cada terrazza (m)	Ancho de berma (m)				
	4	6	8	10	12
5	28°	32°	42°	54°	70°
10	24°	26°	28°	32°	34°
15	22°	24°	26°	26°	28°
30	22°				

*Fuente: Elaboración Propia.*

Como se puede apreciar en la Tabla 4.6, los ángulos de inclinación de cada uno de los taludes locales pueden incrementarse conforme aumenta el ancho de la berma. Asimismo, se puede inferir que un ángulo de inclinación menor provee de estabilidad a taludes de mayor altura, por lo que una buena combinación de altura, ancho de berma y ángulo de inclinación adecuados podrían garantizar la estabilidad de los taludes y la optimización del espacio utilizado para la disposición final de los residuos sólidos. De esta forma, se evita que los taludes de poca altura tengan una inclinación menor a la que permita su aprovechamiento máximo, o que taludes de grandes alturas pongan en riesgo su estabilidad y seguridad mediante el uso de ángulos de inclinación mayores a los que son capaces de soportar.

Para la determinación de esta geometría óptima se utilizó la relación máxima de 1V:2,5H (21,8°) para el análisis del talud global, así como también los factores mínimos recomendados para las condiciones estática y pseudo estática de 1,5 y 1,05 respectivamente para el caso de los taludes locales y globales. Asimismo, para estos

análisis se supuso que el suelo falla en condición drenada, por tanto, se utilizaron valores de densidad o peso específico de los residuos sólidos de  $1,19 \text{ ton/m}^3$ , cohesión de  $1,35 \text{ ton/m}^2$  y ángulo de fricción de  $22^\circ$ , y valores del material de cobertura de  $1,57 \text{ ton/m}^3$  para la densidad o peso específico,  $1,08 \text{ ton/m}^2$  para la cohesión y ángulo de fricción de  $15^\circ$ .

Con esto, se realizó una comparación de las diferentes geometrías expuestas anteriormente con respecto a la geometría que se encuentra actualmente el Relleno Sanitario de Pichacay, obteniendo valores de porcentajes de volumen adicional de residuos sólidos que se puede ocupar en una misma área. Estos valores de porcentajes se pueden apreciar en la Tabla 4.7.

*Tabla 4.7. Porcentajes de volumen adicional de las diferentes geometrías propuestas.*

Altura de cada terrazza (m)	Ancho de berma (m)				
	4	6	8	10	12
5	25,38%	23,65%	30,94%	33,68%	35,51%
10	26,61%	29,82%	31,75%	40,13%	39,18%
15	21,94%	29,95%	37,12%	33,33%	39,29%
30	28,35%				

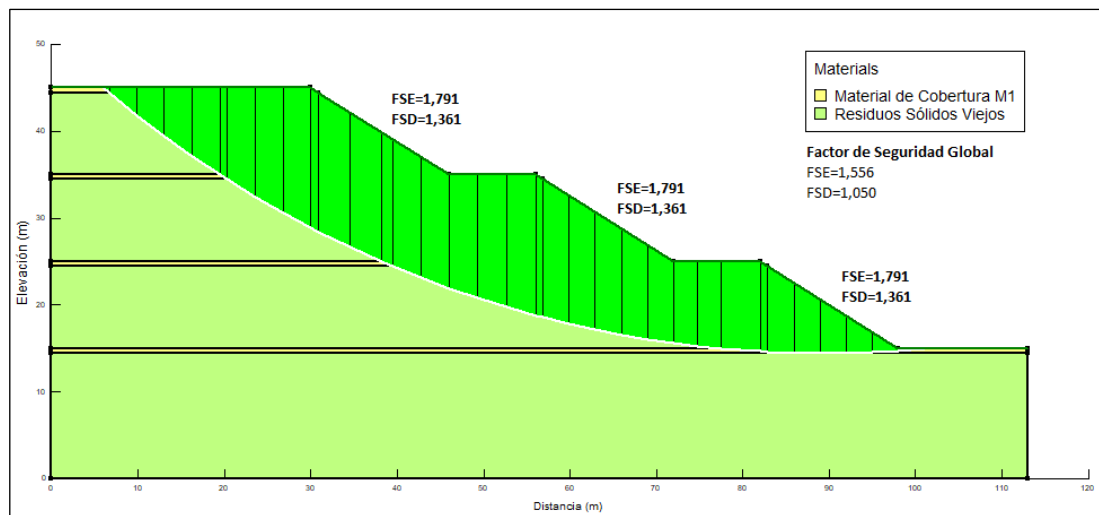
*Fuente: Elaboración Propia.*

Se debe tener en cuenta que el Relleno Sanitario de Pichacay se encuentra diseñado para construir alturas por cada terraza de 5 metros con anchos de berma de 8 metros, lo que significa que, comparando con lo actualmente manejado y construido, se está perdiendo aproximadamente un 31% de la capacidad volumétrica de este sitio de disposición final.

Además, una altura de 10 metros por cada terraza con bermas de 10 metros de ancho y ángulo de inclinación de los taludes locales de  $32^\circ$  es la mejor combinación para obtener el mayor volumen ocupado en una misma área en la disposición de los residuos sólidos, garantizando la estabilidad mediante la obtención de los factores de seguridad apropiados para pendientes y alturas mayores a las utilizadas actualmente. Sin embargo, se debería realizar un análisis acerca de la factibilidad que correspondería la

construcción de bermas de gran anchura y los efectos que podrían causar a corto y largo plazo.

Los resultados de esta geometría con su respectivo análisis de estabilidad local y global se muestran en la Figura 4.17. Asimismo, los resultados de cada uno de estos análisis para la determinación de la geometría máxima se pueden apreciar en los Anexos 9, 10, 11 y 12.



*Figura 4.17. Factores de seguridad locales y global de la geometría máxima propuesta.*

*Fuente: Elaboración Propia.*

Es importante destacar que estos análisis se realizaron bajo el supuesto de que no existe la presencia de agua y líquidos lixiviados en el interior del relleno sanitario, por tanto, para alcanzar esta geometría máxima presentada, es necesario contar con un adecuado sistema de evacuación tanto de las aguas pluviales como de los lixiviados para que se garantice dichas condiciones, así como también se debería realizar pruebas de campo que verifiquen la utilización de los parámetros mecánicos de los residuos sólidos utilizados.

## **CAPÍTULO 5. RECOMENDACIONES DE CIERRE Y USO FUTURO**

### **5.1. Introducción**

Hoy en día, el relleno sanitario es el método más efectivo de disposición final para los residuos sólidos. En la mayoría de las veces, este proceso resulta ser de gran magnitud debido a la gran cantidad de residuos que estos reciben, ocupando grandes extensiones de terreno en lugares cercanos a las áreas pobladas. Esto sin duda genera la pérdida de espacio útil que ocupa el relleno sanitario, potenciando el interés de recuperar y reintegrar estos lugares para otros usos comunitarios (Rosas, 2004).

La recuperación de estas áreas implica un conjunto de acciones que se deben realizar para que brinde las condiciones adecuadas de seguridad bajo criterios ambientales, paisajísticos y de accesibilidad universal. Mientras tanto, es importante para la toma de decisiones que se caracterice adecuadamente el lugar para determinar los principales agentes contaminantes tanto para el hombre como para el ambiente.

Es por esto que, el cierre de un relleno sanitario es una fase muy importante debido a que esto define las áreas de contaminación que deben ser observadas y los posibles usos que se les puedan dar a dichos lugares. Estos usos se deben priorizar no solo en las prácticas basadas en la conciencia ambientalista y social, sino también en la normativa regional o nacional. Por ejemplo, en la ciudad de São Paulo, en Brasil, existe una ley que determina la recuperación del espacio utilizado por un relleno sanitario ya clausurado en un lugar de uso recreativo después de 5 a 10 años de su cierre (Caceres, 2007).

### **5.2. Problemas y alternativas**

Mientras los residuos dispuestos en los rellenos sanitarios sigan produciendo gases y lixiviados, estos sitios serán un gran problema para el futuro debido a sus impactos medioambientales y sociales, los cuales deben ser minimizados por la empresa encargada del manejo de estos sitios. Entre los impactos medioambientales se encuentra la contaminación del agua, del aire y la transformación del paisaje original.

Es por ello que, en estos lugares se debería llevar a cabo una recuperación que permita utilizar el espacio ocupado para transformarlas en áreas de recreación comunitaria como parques, campos polideportivos, etc. Sin embargo, es necesario advertir la producción de gases que se mantiene durante grandes períodos de tiempo, pues es común la producción de estos gases durante los 20 años posteriores a su cierre (Caceres, 2007).

Por otra parte, no es recomendable la construcción de grandes edificaciones en estos sitios debido a la inestabilidad que presenta el terreno, pues este varía de acuerdo a la cantidad de material orgánico relleno, la compactación y de las condiciones climáticas del sector.

Una vez controlado los riesgos que atenten contra la seguridad y la salud pública, será posible planear la apertura de estos espacios al público. Hay que tener en cuenta que, de acuerdo con Melo y Schneider (2000) se debe permitir el acceso a las personas después de los 5 a 10 años del cierre del relleno sanitario, debido a que en este tiempo los procesos de descomposición de la basura continúan.

### **5.3. Clausura**

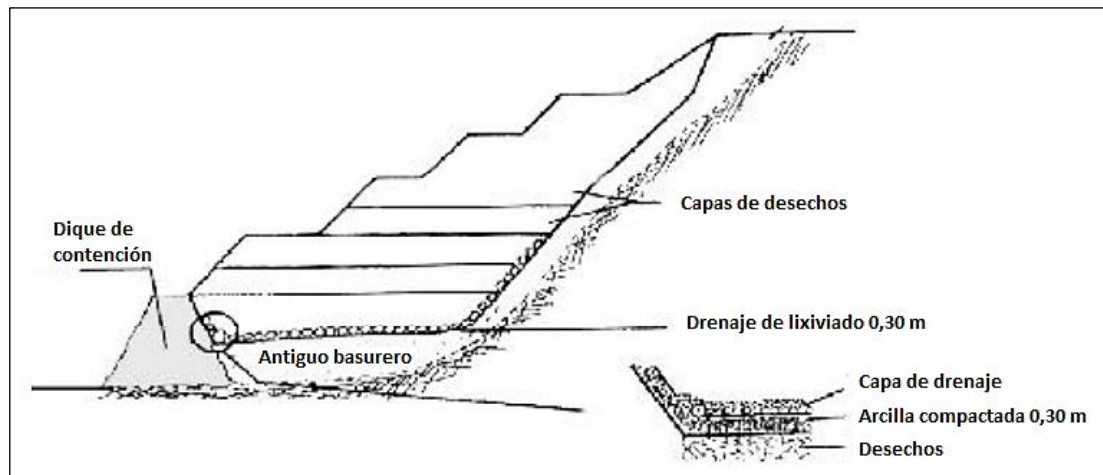
El diseño y la construcción de rellenos sanitarios es una actividad continua que termina cuando toda la capacidad disponible o permitida de la zona se ha llenado por completo con residuos sólidos. En otras palabras, el relleno llega al término de su vida útil. También se cierra en caso de ser necesario debido a los impactos negativos que genera. Durante este cierre también se debe cumplir con los requisitos mínimos de estabilidad de la masa de residuos, monitoreo ambiental de lixiviados, gases y aguas subterráneas a largo plazo.

Con el fin de proteger la salud pública, las molestias ocasionadas y reducir el impacto ambiental causado por los residuos sólidos dispuestos en el relleno, se debe tener un plan de clausura en el cual deben constar las principales acciones a ser ejecutadas. A continuación, Jaramillo (2002) presenta algunas de estas:

- Nivelar y compactar la superficie y los taludes de las celdas antes de la disposición del material de cobertura final.



- Las pendientes de los taludes deben tener una relación de 3H:1V o 4H:1V (Horizontal: Vertical).
- De ser necesario, se construirá un muro de contención a la masa de residuos desde la base de los taludes, como se aprecia en la Figura 5.1.



*Figura 5.1. Contención y rehabilitación de un botadero de basura.*

*Fuente: Jaramillo (2002, p. 200).*

- Fumigar el lugar y posteriormente colocar y compactar el material de cobertura tanto en la superficie como en los taludes del relleno con una capa de 0,20 a 0,40 metros de espesor.
- Construir drenajes en el pie de los taludes para conducir el agua lluvia y que no se infiltre a la masa de residuos.
- Sembrar vegetación para mejorar la apariencia del sitio y evitar la erosión que se genera en el suelo debido al agua lluvia.

En consecuencia, es importante tener en cuenta que un proyecto de clausura de un relleno sanitario no solo considera aspectos técnicos y económicos sino también sociales y ambientales (Jaramillo, 2002).

Si posterior al cierre, se presentan grietas, hundimientos, malos olores o la proliferación de animales, la entidad encargada del servicio de aseo municipal se encargará de solucionar los problemas llevando material de cobertura y la maquinaria necesaria.

#### 5.4. Mantenimiento post clausura

Las instalaciones de un relleno sanitario clausurado se deben mantener durante un largo período de tiempo en el que el relleno siga activo, es decir, mientras se sigan produciendo gases y lixiviados. Este período de mantenimiento, de acuerdo a varias normativas nacional y regionales, comprende unos 20 a 30 años después del cierre (Tchobanoglous et al., 1993).

El mantenimiento post clausura a largo plazo implica una serie de actividades continuas, entre ellas la inspección rutinaria de las zonas del relleno sanitario, el mantenimiento de la infraestructura y la supervisión ambiental.

##### 5.4.1. Inspecciones rutinarias

Una de las herramientas más importantes para asegurar que los riesgos ambientales se mantengan bajo control, es la inspección rutinaria visual de las diferentes zonas del relleno sanitario. En la Tabla 5.1 se muestran los puntos que se deben inspeccionar, su frecuencia y los potenciales peligros que pueden surgir.

*Tabla 5.1. Puntos de inspección, frecuencia y problemas potenciales que se deben observar en un relleno sanitario clausurado.*

<b>Punto de inspección</b>	<b>Frecuencia de la inspección</b>	<b>Problemas potenciales que hay que observar</b>
Cubierta final	Una vez al año y después de lluvias sustanciales.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Erosión que expone al recubrimiento sintético.</li> <li>▪ Derrumbamientos de terreno.</li> </ul>
Cubierta de vegetación	Cuatro veces al año.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Plantas muertas.</li> </ul>
Pendientes finales	Dos veces al año.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Estancamiento de agua.</li> </ul>

Drenaje superficial	Cuatro veces al año y después de cada lluvia sustancial.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Basura en los drenes.</li> <li>▪ Tubería de dren rota.</li> </ul>
Supervisión de gas	Continua como exigencia por el plan de mantenimiento y gestión post clausura.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Olores.</li> <li>▪ El equipamiento de compresor y antorcha inoperable.</li> <li>▪ Lecturas de gas altas en las sondas de supervisión.</li> <li>▪ Tubería rota en los pozos de gas.</li> </ul>
Supervisión de aguas subterráneas	Como exigencia por el equipamiento y el plan de mantenimiento y gestión post clausura.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pozos dañados.</li> <li>▪ Muestreo inoperable.</li> </ul>
Gestión de lixiviados	Como exigencia por el plan de mantenimiento y gestión post clausura.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bombas de lixiviados inoperables.</li> <li>▪ Bloques en la tubería de recogida de lixiviados.</li> </ul>

*Fuente: Tchobanoglous et al. (1993, p. 895).*

Hay que considerar que la frecuencia de estas inspecciones sugeridas es la normal, lo que significa que pueden existir variaciones de acuerdo a las condiciones climatológicas locales.

#### **5.4.2. Mantenimiento de la infraestructura**

Para proteger la integridad de la cobertura y prevenir la contaminación ambiental generado por el relleno sanitario, se debe realizar un mantenimiento continuo de las instalaciones, lo que implica la restauración y paisajismo, el sistema para controlar el drenaje y el sistema para la recogida de los lixiviados y gases.

La restauración se la realiza después de producido los asentamientos importantes en el relleno sanitario clausurado, los cuales afectan a las superficies del terreno y a la vegetación utilizada para mejorar el paisajismo. En el apartado 5.5 se considera más extensamente el tema de recuperación y re inserción del paisajismo.

El control del drenaje comprende tanto la entrada como la salida de las aguas superficiales. Estos sistemas sufren asentamientos a largo plazo que conlleva a tener problemas sobre su conservación. El mantenimiento de los sistemas de control del drenaje se debe realizar a la par con el mantenimiento de la superficie del terreno y la revegetación.

Para el sistema de recogida de los lixiviados de un relleno sanitario clausurado se deben recoger, separar y tratar estos líquidos siempre y cuando éstos se sigan produciendo. El mantenimiento de estas instalaciones requiere de personas especializadas en la evaluación de los cambios en la composición de las aguas residuales.

Los rellenos sanitarios clausurados con sistemas de gestión del gas deben controlar tanto la cantidad como la composición emitida a través de chimeneas, que no recuperan la energía, o un sistema para la recuperación de energía. La frecuencia para el mantenimiento de estos sistemas es alta ya que las tuberías y/o pozos pueden romperse debido a los grandes asentamientos que tienen los residuos (Tchobanoglous et al., 1993).

Todos estos aspectos formarán parte del programa de mantenimiento del relleno siempre que los riesgos asociados sean significativos. El mantenimiento debería tener más frecuencia si el relleno sanitario clausurado registra cambios más rápidos, es decir, en los primeros años (Lobo, Szantó y Llamas, 2016).

#### **5.4.3. Sistema de supervisión ambiental**

Los sistemas de supervisión ambiental que recibirán mantenimiento durante el período post clausura normalmente implica:

- 1) Supervisión de la zona aireada, de gases y líquidos.
- 2) Supervisión de aguas subterráneas.

### 3) Supervisión de la calidad del aire.

Estos sistemas se llevan a cabo para asegurar que no haya emisiones de contaminantes que procedan del relleno sanitario y que puedan llegar a afectar a la salud humana o al medio ambiente (Tchobanoglous et al., 1993).

## 5.5. Opciones de recuperación y reinserción

De acuerdo a la variada experiencia recopilada en todo el mundo, existen algunas opciones para la recuperación y reinserción de un sitio de disposición final después de su vida útil. En la Tabla 5.2 se muestra algunas de estas prácticas con el objetivo de servir como referencia cuando se afrontan estas actuaciones.

*Tabla 5.2. Opciones de Recuperación y Reinserción de Rellenos Sanitarios.*

<b>Recuperación</b>
Aislamiento o sellado
Retirada y traslado del residuo
Recuperación in situ
<b>Reinserción</b>
Integración paisajística
Uso recreativo (campo deportivo, parque)
Cultivo agrícola
Uso comercial (aparcamiento, vía de comunicación, polígono industrial)
Parque energético (solar, eólico)

*Fuente: Lobo et al. (2016, p. 124).*

A continuación, se describirán algunas de estas prácticas adoptadas en rellenos sanitarios de todo el mundo.

### **5.5.1. Recuperación**

Una vez clausurado el relleno sanitario debe pasar por un proceso de recuperación, el cual ayuda a reducir los riesgos ambientales de tal manera que favorezca con el nuevo uso que se le va a dar al terreno y a su reinscripción.

Para la recuperación de estos sitios de disposición final existen algunas prácticas, las cuales dependen de la necesidad de cada uno de estos lugares, es decir, del tamaño que presenten, su historia, la sensibilidad del medio y el valor del terreno en donde se encuentra asentado. En otras palabras, varía si es un antiguo depósito a cielo abierto situado en una zona rural o en un relleno sanitario ubicado en una zona urbana.

Para esto, existen tres estrategias básicas para recuperar el terreno: el aislamiento de los residuos para evitar la emisión de contaminantes al medioambiente, la retirada de los residuos para su tratamiento o disposición final en otro lugar y la recuperación in situ que consiste en tratar los residuos en el mismo sitio con el objetivo de reducir los impactos ambientales hasta niveles adecuados (Lobo et al., 2016). A continuación, se detallan más a profundidad cada una de ellas:

#### **5.5.1.1. Aislamiento o sellado**

El aislamiento de los residuos o sellado es la solución más tradicional, pues consiste en instalar una capa poco permeable encima de la masa de residuos para que limiten el paso de las aguas lluvias y así se generen más lixiviados, así como también de retener los gases generados para que no se liberen hacia la atmósfera.

Si inicialmente el relleno se asentó sobre una superficie permeable no acondicionada previamente, el sellado superficial no es suficiente para retener totalmente las emisiones causadas por los residuos, pues éstas pueden seguir contaminando mediante el contacto directo que tienen con el terreno natural. Por ello, estas obras de sellado deben ir siempre acompañadas de otras que ayuden con la recolección de los lixiviados y los gases (Lobo et al., 2016).

### **5.5.1.2. Retirada**

La retirada de los residuos consiste en el traslado de los mismos hacia otro lugar con condiciones adecuadas para su depósito. Esto siempre y cuando el volumen de la masa de residuos sea pequeño, el entorno sensible o el uso futuro que se le planteaba dar no sea compatible con los riesgos del relleno sanitario. Esta solución se puede combinar con la minería de residuos, la cual consiste en la separación o tratamiento de los materiales vertidos con el objetivo de recuperarlos. Incluso, esta alternativa se ha pensado realizar sin la necesidad del traslado, pues es de gran ayuda desde el punto de vista ambiental al eliminar los riesgos y recuperar recursos. Sin embargo, desde el punto de vista económico no es rentable, aunque actualmente se trabaja en ello para que lo sea (Krook, Svensson y Eklund, 2012).

### **5.5.1.3. Recuperación in situ**

Si bien es cierto, la solución del aislamiento o sellado evita las emisiones contaminantes de manera temporal, sin embargo, esta solución retrasa los procesos de degradación de los residuos al impedir el ingreso del agua y dejando latente que en un futuro se degraden. Por ello, se trata de acelerar estos procesos con el objetivo de estabilizar lo antes posible el relleno y así evitar posibles problemas en el futuro.

Siendo así, los rellenos sanitarios pueden recuperarse mediante un tratamiento in situ basado en procesos biológicos, los cuales aportan las condiciones necesarias al suelo para que los microorganismos se desarrollen de manera más rápida y ayuden a la degradación de los residuos.

Esta estrategia puede utilizarse en rellenos sanitarios que han sido abandonados o que se encuentren operando, además es más costosa y requiere de un mayor control que la técnica tradicional de sellado. Sin embargo, reduce los riesgos ambientales a largo plazo y por ende el tiempo empleado en la vigilancia post clausura (Lobo et al., 2016).

## **5.5.2. Reinserción**

En todo proyecto de construcción de un relleno sanitario se deberá contemplar desde las fases de planificación y diseño, el uso que se le dará al espacio utilizado por el

mismo una vez haya culminado su tiempo de vida útil, a fin de que el proyecto obtenga consideraciones estéticas y paisajísticas. Además de que toda alternativa de re inserción de un área afectada por la disposición de residuos sólidos debe satisfacer también el objetivo de proteger la salud humana y del medio ambiente (Jaramillo, 2002).

Para esto, se debe esperar el tiempo suficiente para que se concluyan los procesos biológicos naturales que producen los residuos y se estabilice la generación de los lixiviados y gases. Según Caceres (2007), se debe esperar aproximadamente unos 20 años del cierre para destinar el sitio para un nuevo uso.

Estos lugares recuperados pueden ofrecer grandes ventajas a la ciudad, pues se pueden dedicar a usos recreacionales, comerciales y hasta agrícolas. Sin embargo, la utilización posterior que se le vaya a dar va a estar condicionados por la extensión del terreno, la localización respecto al área urbana, la capacidad económica para la adecuación y los asentamientos que presente la masa de residuos. En todo caso, si se decide el uso antes de entrar en la fase de construcción del relleno, se puede planificar los métodos de operación y el grado de compactación de los residuos para que el terreno pueda cumplir con las condiciones necesarias y así poder utilizar la alternativa de re inserción escogida (CEPAL, OPS y UNC, 1999).

Como ya se mencionó anteriormente, los potenciales usos que se les pueda dar a estos espacios se pueden dividir en las tres categorías generales: espacio abierto, del desarrollo urbano y agrícola.

#### **5.5.2.1. Espacio abierto y recreación**

Entre las aplicaciones más populares y beneficiosas que se da a los rellenos sanitarios después de su vida útil es el de desarrollar un programa de recuperación paisajística y social para darle un uso recreativo que permita alcanzar resultados favorables en cuanto a la re inserción de la zona afectada y la minimización de los riesgos ambientales. En la Tabla 5.3 se muestran algunos posibles usos recreativos o de espacio abierto que se pueden aplicar a rellenos sanitarios clausurados.



*Tabla 5.3. Usos recreacionales y de espacio abierto para rellenos sanitarios clausurados.*

<b>Usos potenciales</b>
Campos deportivos
Parques recreacionales y de esparcimiento
Rutas para bicicleta
Senderos para caminar
Reservas naturales (bosques)
Jardines botánicos

*Fuente: Elaboración Propia.*

En el caso de que no se pueda destinar el espacio para un uso recreativo como parques o campos deportivos debido a la topografía o a las condiciones del suelo, los terrenos de los rellenos sanitarios pueden ser destinados simplemente como lugares de espacio abierto, los cuales son ser acondicionados mediante la siembra de vegetación o arborización.

Andrade (2005) señala que, en proyectos de vegetación de rellenos sanitarios clausurados, es muy común el uso de pasto, pues es conveniente para la recuperación del paisaje y además ayuda a la reducción de la erosión superficial. En muchos de los casos, el pasto suele crecer de forma espontánea después de la colocación de la cobertura final.

Por otra parte, la arborización del relleno sanitario es muy importante, debido a que ayuda considerablemente a minimizar los riesgos ambientales mediante la siembra de plantas propias de la región inmediatamente después del cierre final del relleno. Además, contribuye a la estabilidad de los taludes y a la disminución de la cantidad de las emisiones producidas por la basura. En la Figura 5.2 se muestra un ejemplo de un plan de arborización.

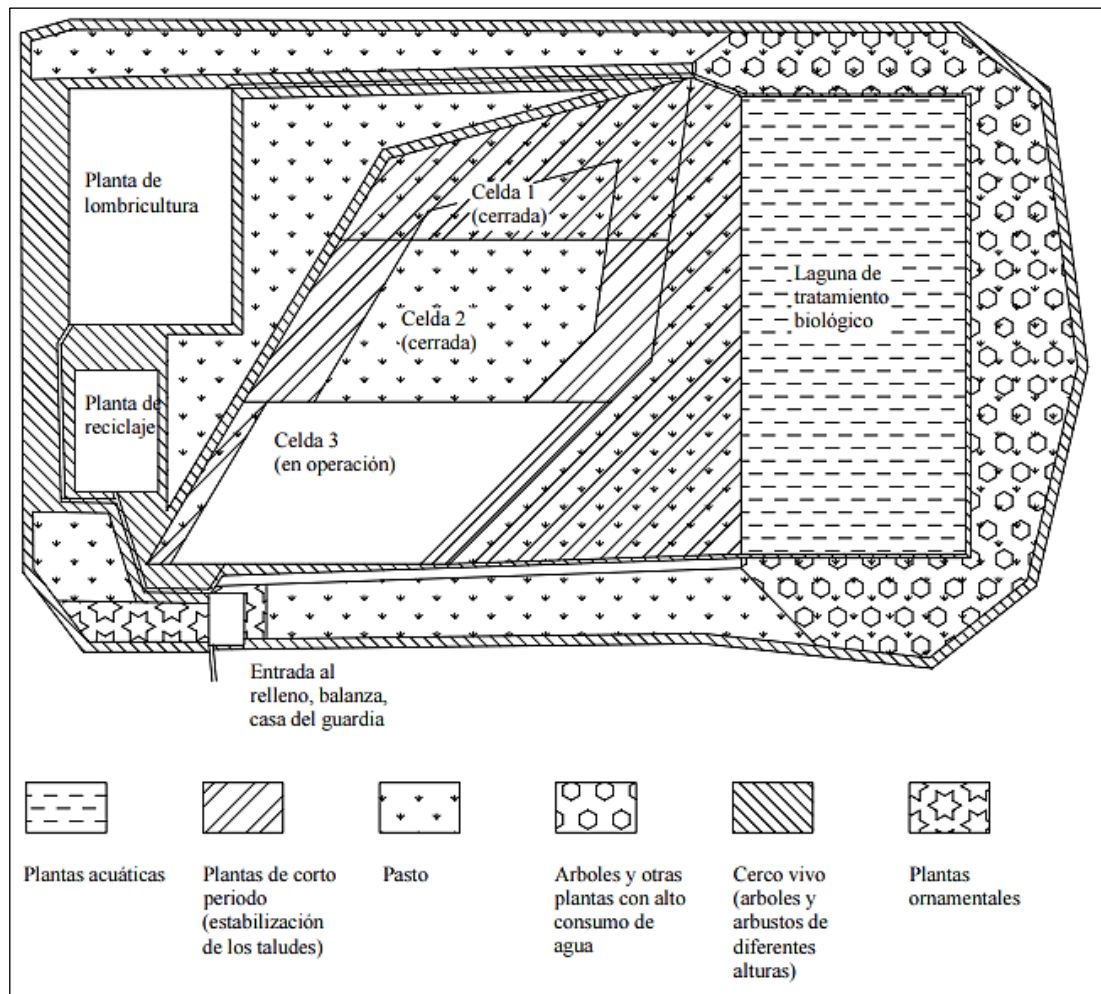


Figura 5.2. Ejemplo para un plan de arborización en un relleno sanitario.

Fuente: Röben (2002, p. 107).

Cada uno de estos lugares deben ser estudiados detalladamente en lo que se refiere a la vegetación original, con el objetivo de seleccionar las especies más adaptables al entorno (Caceres, 2007).

Por otro lado, no existe información exacta acerca de los tipos de vegetación que se puedan adaptar sin problemas a las adversas condiciones que tiene un relleno sanitario, sin embargo, en la Tabla 5.4 se muestran algunas especies que aportan ciertas ventajas a estos sitios y los diferentes lugares donde deberían ser sembrados alrededor de todo el proyecto.

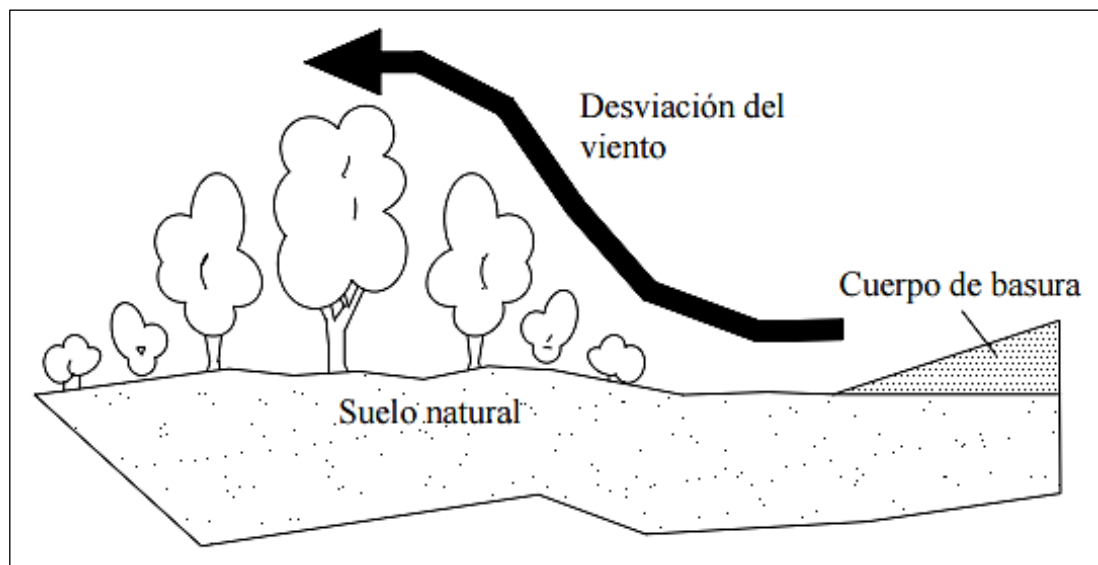
Tabla 5.4. Arborización del relleno (Sierra).

<b>Lugar</b>	<b>Tipo de planta</b>	<b>Objetivos</b>
Cuerpo de basura del relleno	Eucalipto, cedro, pino.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Drenaje de aguas lixiviadas escurridas por los taludes.</li> <li>▪ Estabilización de los taludes.</li> <li>▪ Protección de malos olores, moscos, polvo y objetos livianos traídos por el viento.</li> <li>▪ Mejoramiento del aspecto visual.</li> </ul>
Taludes del relleno	Zambo, eucalipto, buganvilla.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Drenaje de aguas lixiviadas del talud.</li> <li>▪ Depuración biológica de emisiones gaseosas.</li> <li>▪ Estabilización de los taludes.</li> <li>▪ Mejoramiento del aspecto visual.</li> </ul>
Laguna de tratamiento de las aguas lixiviadas	Aliso, totora, carrizo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Depuración de las aguas lixiviadas (adelantar el proceso de oxidación aeróbica).</li> <li>▪ Absorción de las aguas lixiviadas.</li> <li>▪ Estabilización del fondo de la laguna.</li> <li>▪ Protección del suelo.</li> </ul>
Alrededor de la laguna de tratamiento	Eucalipto, zambo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Drenaje de aguas lixiviadas infiltradas al suelo.</li> <li>▪ Estabilización del suelo.</li> <li>▪ Protección de malos olores y moscas.</li> <li>▪ Mejoramiento del aspecto visual.</li> </ul>

*Fuente: Adaptado de Röben (2002, p. 108).*

En muchos de los casos, existen plantas que crecen naturalmente en los taludes de los rellenos sanitarios, por lo que es recomendable no intervenir con esta arborización natural, ya que estas plantas son producidas por los mismos residuos o se han proliferado de sus alrededores y, por lo tanto, ya se encuentran adaptadas y presentan buena resistencia a las emisiones generadas por la basura.

Otra de las ventajas de la arborización es el cerco vivo que funciona como barrera natural para desviar los vientos y así reducir considerablemente las molestias generadas por los malos olores en los alrededores. Para esto, Röben (2002) recomienda sembrar un cerco vivo de 30 a 50 metros de ancho mediante la utilización de arbustos en los bordes y árboles altos en el centro. En la Figura 5.3 se puede apreciar la ventaja que genera un cerco vivo.



*Figura 5.3. Desviación del viento por un cerco vivo.*

*Fuente: Röben (2002, p. 109).*

Además de las ventajas que ofrece al ser humano, la vegetación de los rellenos sanitarios también produce una tendencia a aumentar la biodiversidad local, ya que favorece la posibilidad de desarrollo para la atracción de varias clases de flora y fauna. Siendo el uso más común de relleno reinsertados como espacio abierto y de recreación, existen varios ejemplos en Latinoamérica, como es el Parque La Cañamera, ubicado

en Santiago de Chile (Chile) y la Ciudad Deportiva Carlos Pérez Perasso en la ciudad de Guayaquil (Ecuador).

#### **5.5.2.2. Construcción y desarrollo urbano**

Más allá de la integración paisajística del lugar mediante la cubierta final y la siembra de vegetación herbácea, también se han desarrollado prácticas exitosas sobre la reinserción de rellenos sanitarios clausurados para otros usos muy variados desde hace mucho tiempo atrás.

La alternativa de la construcción para el desarrollo urbano son usos de baja prioridad, aunque para los países industrializados se puede asignar como una de las más utilizadas, especialmente en regiones que experimentan una urbanización acelerada, donde las zonas ocupadas por el relleno han quedado inmersas dentro del radio urbano. Existen varios casos sobre la cimentación de estructuras construidas sobre los rellenos sanitarios, por ejemplo, los edificios de apartamentos que son construidos para las personas de pocos recursos en El Cairo, Egipto (UNEP, 2005).

Normalmente, esta práctica de construcción de infraestructura pesada no se recomienda debido a la poca capacidad que tiene la superficie del relleno para soportar grandes cargas, además de los problemas que puedan ocasionar los asentamientos producidos y la generación de los gases (Jaramillo, 2002). Sin embargo, dependiendo del tipo de la estructura que se desea emplazar, existen soluciones que se han empleado alrededor del mundo para resolver estos problemas relacionados con los asentamientos y la capacidad portante del suelo, entre ellas, CEPAL et al. (1999) destaca:

- La remoción parcial o total de los residuos del antiguo relleno para reemplazarlo por material de mejor calidad sobre la cual se emplaza la estructura.
- El mejoramiento del suelo del relleno mediante el uso de las prácticas geotécnicas como la compactación, consolidación y estudio de sobrecargas.
- La utilización de pilotes como cimentaciones profundas.
- La disposición y buena compactación de la capa de cobertura final con un suelo de buena calidad.

En la Tabla 5.5 se menciona algunas de las estructuras para el desarrollo urbano que se han construido sobre antiguos rellenos sanitarios.

*Tabla 5.5. Construcción y desarrollo urbano en rellenos sanitarios clausurados.*

<b>Usos potenciales</b>
Estacionamientos
Vías de comunicación
Campos de generación de energía solar
Estaciones de transferencia
Galpones
Edificaciones (de una planta)

*Fuente: Elaboración Propia.*

Dos ejemplos de construcción y desarrollo urbano como reinserción de un relleno sanitario es el caso de un complejo deportivo y comercial “Ciudad Jardín Bicentenario” desarrollado sobre el antiguo botadero de Neza en Ciudad Nezahualcóyotl (México) y el caso del proyecto Itzulbide que consiste en la colocación de paneles fotovoltaicos sobre la cobertura final del relleno ubicado en la comunidad de Euskadi (España).

### **5.5.2.3. Uso agrícola**

Dentro de las alternativas de utilización de los rellenos sanitarios una vez hayan sido clausurados, es la posibilidad de destinar estos lugares para el cultivo agrícola, siempre y cuando el cierre se realice con una cobertura apropiada y un sistema adecuado de control de las emisiones de gases (Lobo et al., 2016). En la Tabla 5.6 se muestran los diferentes usos agrícolas que se puedan dar al terreno.

*Tabla 5.6. Usos agrícolas en rellenos sanitarios clausurados.*

<b>Usos potenciales</b>
Pastoreo
Producción de cultivos
Huertas
Viveros

*Fuente: Elaboración Propia.*

En todos los casos, la cobertura final del relleno debe ser lo suficientemente profunda para asegurar que las raíces no entren en contacto con los residuos que se encuentran enterrados. La precaución se vuelve especialmente importante cuando se trata de cultivos alimenticios (UNEP, 2005). En la Tabla 5.7 se muestran algunos ejemplos de plantas que han crecido de forma natural en un relleno sanitario de la sierra y el oriente ecuatoriano.

*Tabla 5.7. Tipos de plantas que crecen naturalmente en los rellenos sanitarios de Loja y Macas.*

<b>Relleno Sanitario de Loja</b>		<b>Relleno Sanitario de Macas</b>	
<b>Lugar de observación</b>	<b>Tipo de planta</b>	<b>Lugar de observación</b>	<b>Tipo de planta</b>
Cuerpo de basura y taludes	Quínoa	Cuerpo de basura	Amaranto
	Higuerilla		Verbena
	Chocho		Zapallo
	Zambo		Frejol
	Amaranto		Maíz
	Pullaco		Papa china
	Tulipán		Camote
	Tabaco		Arveja
	Chilco		Gramma

	Zambo		Papaya
	Camortillo		Maní
Cunetas de drenaje	Amaranto		Tomate silvestre
	Tarapo		Guarumo
	Zig-zig		Romerillos
Lagunas de lixiviados	Aliso	Taludes	Balza
	Carrizo		Ortiga
	Eucalipto		Chilca
	Zambo	Cunetas de drenaje	Romerillos
			Ortiga
Alrededor del cuerpo de basura	Chilco		Naranjilla silvestre
		Alrededores del cuerpo de basura	Guarumo
	Chocho		Chilca
			Boya

*Fuente: Adaptado de Röben (2002, p. 109).*

## 5.6. Ejemplos de reinserción de rellenos sanitarios clausurados

Todo proyecto de sellado y clausura debe mitigar los impactos que pueden generarse a los seres humanos o al medio ambiente, e ir acompañados de una reinserción que logre amortiguar el impacto paisajístico de la zona. Esta última fase debe diseñarse de tal manera que devuelva a la sociedad y sobre todo a la población que se ha visto afectada, el lugar ocupado para la disposición de la basura, otorgándoles así, una mejor calidad de vida (Lobo et al., 2016).

A pesar de que existe un gran número de sitios pendientes para ser cerrados y revalorizados en todo el mundo, también existen muchos casos de rellenos sanitarios o botaderos de basura a cielo abierto que han sido reinsertados exitosamente para darle lugar a nuevos usos. Y como ayuda para estos casos, se presenta a continuación varios



ejemplos basados en la recopilación de información técnica, para que puedan servir como referencia para los sitios que quedan pendientes, como es el caso del Relleno Sanitario de Pichacay en la ciudad de Cuenca.

La tendencia mundial sobre los posibles usos para los rellenos sanitarios una vez que hayan sido clausurados, es precisamente la transformación en áreas verdes. Por ello, los tres primeros ejemplos se plantearon con la idea de darle un uso recreativo o de espacio libre a estos sitios, comenzando por la re inserción del gran vertedero en la ciudad de Tel Aviv en Israel, continuando con el parque público Valdemingómez construido en la ciudad de Madrid, España y finalizando con la re inserción paisajística realizada en el relleno de Moravia en la ciudad de Medellín, Colombia.

Finalmente, se presentan dos casos en los Estados Unidos en donde se han destinado estos sitios de disposición para la construcción y el desarrollo urbano, como es el caso de la construcción de los generadores eólicos en el relleno de Frey Farm en el estado de Pensilvania y la cubierta de energía solar mediante el equipamiento de paneles solares en el relleno Hickory Ridge ubicado en el estado de Georgia.

#### **5.6.1. Tel Aviv (Israel)**

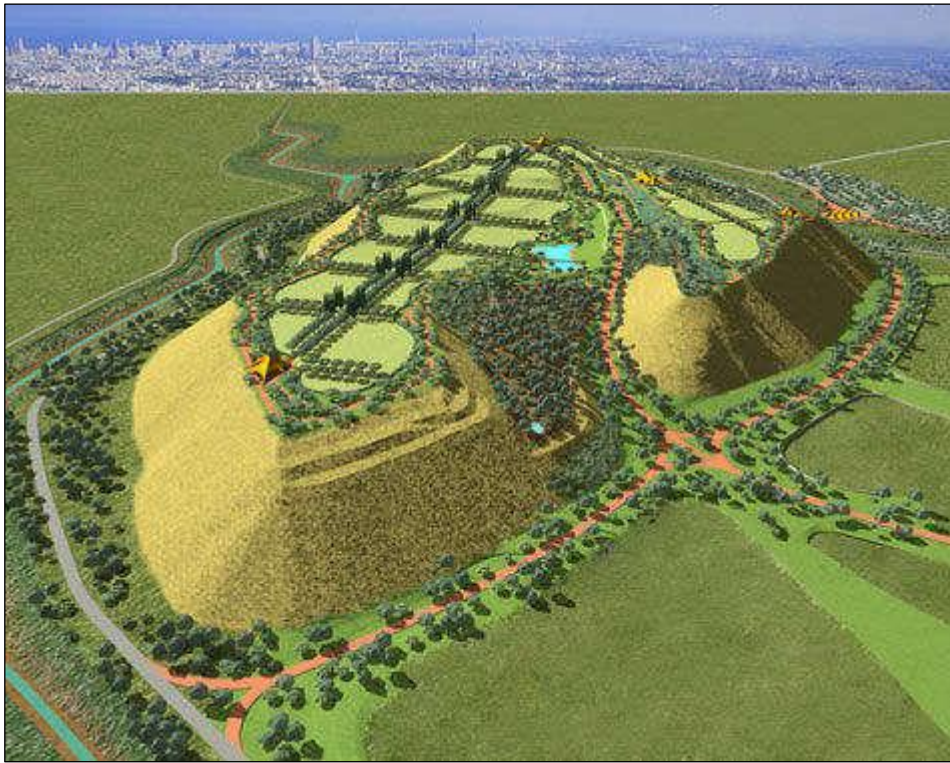
Entre los años 1952 y 1998 funcionó el relleno sanitario Hiriya, la cual se muestra en la Figura 5.4, ubicada a las afueras de la ciudad de Tel Aviv, en Israel. Este relleno recibía aproximadamente 3000 toneladas de residuos al día, alcanzando una altura de más o menos 80 metros, en donde se acumulan alrededor de 25 millones de toneladas de basura (Perrozzi, 2020).



*Figura 5.4. Relleno Sanitario Hiriya ubicado a las afueras de Tel Aviv, Israel [Fotografía].*

*Fuente: State of Israel (25 de octubre, 2012).*

El Hiriya fue clausurado en 1998 e inmediatamente inició con su proceso de recuperación y reinsertión. En el año 2014 se inauguró lo que actualmente es el Parque Ariel Sharon, el cual tenía programada culminar sus obras en el año 2020, albergando un anfiteatro para 50000 personas, rutas para practicar senderismo y ciclismo, canchas deportivas, lagunas y humedales. La propuesta de esta obra se la puede apreciar en la Figura 5.5, el cual se encuentra cubierto con una capa de bioplástico la cual ayuda como protección del contacto con el suelo contaminado (Israel Alba Estudio, 2016).



*Figura 5.5. Propuesta de reinserción del antiguo relleno al Parque Ariel Sharon.*

*Fuente: Preiss (2007).*

La capa de bioplástico y el diseño del proyecto en general fueron diseñados por el arquitecto paisajista y urbanista Peter Latz, el cual fue premiado por el Centro Europeo de Arquitectura en la categoría “Arquitectura del paisaje” (Israel Alba Estudio, 2016).

### **5.6.2. Madrid (España)**

El antiguo relleno sanitario de Valdemingómez alcanzó su límite de capacidad después de 22 años de operación, es decir desde 1978 hasta el año 2000, recibiendo aproximadamente 21,7 millones de toneladas de residuos sólidos generados en la ciudad de Madrid, España. Tras su clausura se empezó con el proyecto de recuperación y transformación de la superficie de más de 100 hectáreas en un parque forestal público. El antiguo relleno de Valdemingómez, como se muestra en la Figura 5.6, alcanzó una altura de 40 metros y alberga, a modo de jardín botánico, especies autóctonas de la comunidad de Madrid (Lobo et al., 2016).





*Figura 5.6. Antiguo relleno de Valdemingómez de la ciudad de Madrid, España [Fotografía].*

*Fuente: Israel Alba Estudio (15 de septiembre, 2016).*

A partir de la reforestación que se le ha dado al antiguo relleno, este proyecto completaba su recuperación mediante una serie de usos públicos como senderos, caminos, rutas para bicicletas, pequeños bosques, áreas verdes, un mirador urbano, dos lagunas a modo de humedales, entre otros (Braxton, 2014). Algunos de estos se pueden observar en la Figura 5.7.



*Figura 5.7. Espacios de recreación del antiguo relleno sanitario de Valdemingómez [Fotografía].*

*Fuente: Israel Alba Estudio (15 de septiembre, 2016).*

### 5.6.3. Medellín (Colombia)

Este sitio de disposición final comenzó siendo un terreno baldío que empezó a ocuparse en la década de los 60's hasta que fue decretado relleno sanitario a finales de los 70's. Esta montaña de residuos alcanzó los 30 metros de altura en una extensión de 7 hectáreas entre los años 1977 y 1984, en donde fue clausurado (Israel Alba Estudio, 2016).

La gran desventaja del relleno sanitario de Moravia frente a otros rellenos municipales, es que en este caso el gran crecimiento demográfico a lo largo de los años ha llegado a absorber el espacio utilizado para la disposición de los residuos al núcleo poblacional principal, tal como se observa en la Figura 5.8.



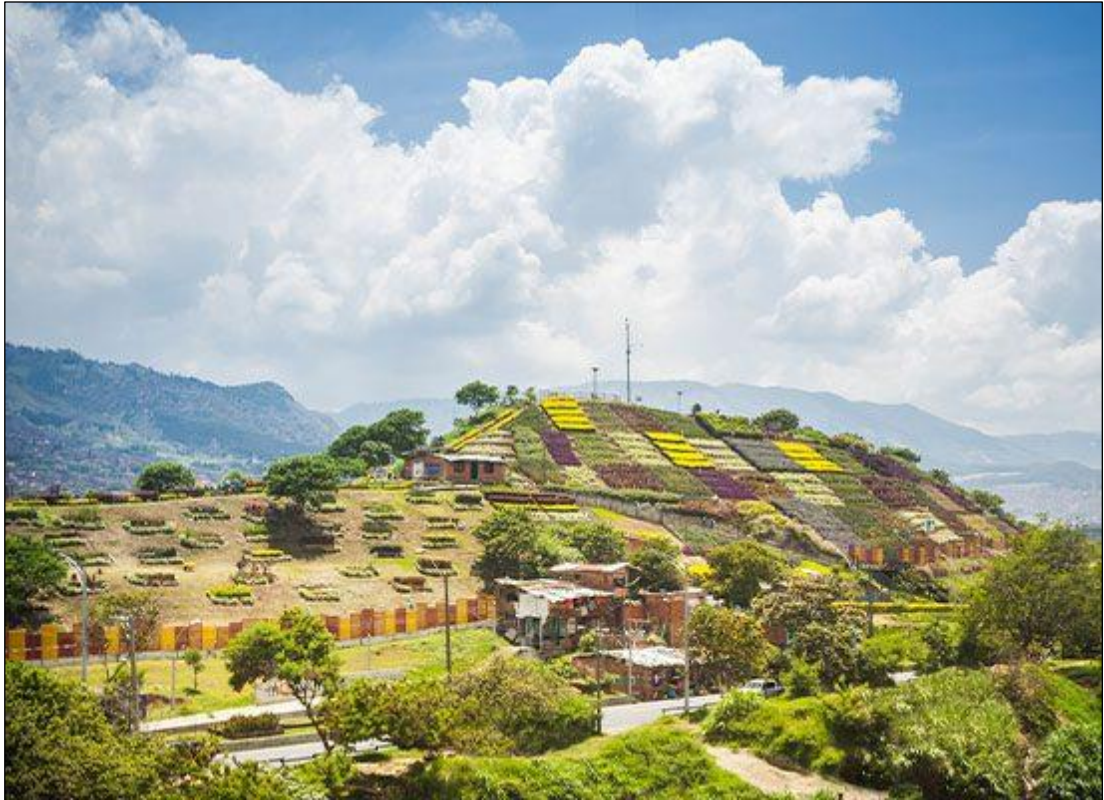
*Figura 5.8. Relleno Sanitario de Moravia absorbido por el núcleo poblacional [Fotografía].*

*Fuente: Alcaldía de Medellín (22 de octubre, 2015).*

Moravia, barrio de la ciudad de Medellín, necesitaba de una intervención urgente debido al gran problema de salud pública que provocaba este relleno sanitario, ya sea por los asentamientos, el suelo inestable y la continua exposición de los biogases. Por ello, a partir del 2004, se ejecutó un plan de mejoramiento integral, el cual los resultados se aprecian en la Figura 5.9. Este plan supuso la reubicación de cientos de



familias, la siembra de jardines con más de 46 especies de plantas ornamentales, la construcción de un centro de desarrollo cultural y un corredor peatonal, consiguiendo así el mejoramiento de un espacio público y de las fachadas aledañas (Israel Alba Estudio, 2016).



*Figura 5.9. Reconstrucción paisajística del relleno sanitario de Moravia [Fotografía].*

*Fuente: Medellín Travel (s. f.).*

#### **5.6.4. Pensilvania (Estados Unidos)**

Un planteamiento creciente que se ha dado en los últimos años con respecto al uso posterior que se pueda dar a un relleno sanitario después de haber cumplido un plan de seguimiento ambiental y mantenimiento de varios años posteriores al cierre, es la de convertir estos espacios en parques de generación de energía renovable. Se trata de aprovechar la localización de estos sitios y el poco valor que tiene ese suelo para transformarlos en un activo valioso.

Existen ya experiencias en el mundo sobre la instalación de generadores eólicos sobre estos sitios consiguiendo resultados exitosos como es el caso del relleno sanitario de

Frey Farm en Conestoga, población de Pensilvania, donde se instalaron dos turbinas de General Electric de 1,6 MW cada una, las cuales reciben directamente los vientos dominantes que vienen desde el noroeste. La Figura 5.10 muestra este planteamiento utilizado el cual es un caso muy complejo debido a que se debe preparar el suelo donde se va a cimentar para que los generadores se encuentren seguros (Lobo et al., 2016).



*Figura 5.10. Dos generadores eólicos instalados en el relleno sanitario de Frey Farm [Fotografía].*

*Fuente: LCSWMA (06 de octubre, 2018).*

La electricidad generada por este proyecto se envía por líneas subterráneas a la vecina Turkey Hill Dairy (empresa estadounidense de bebidas y postres congelados), donde se utiliza para alimentar sus operaciones en la fabricación de sus productos. De hecho, el 21-25% de las necesidades eléctricas anuales de esta empresa satisfacen utilizando la energía eólica de este proyecto (LCSWMA, 2020).

#### **5.6.5. Georgia (Estados Unidos)**

El relleno sanitario de Hickory Ridge en Atlanta, Georgia, solía ser una montaña gigante de basura que emitía gases nocivos a la atmósfera. Sin embargo, en el año 2011, el relleno ya cerrado utilizó un enfoque muy innovador mediante la cubierta

geosintética altamente duradera encima del terreno para luego ser equipada con paneles solares laminados que reducen la construcción de la capa de cobertura, los costos de mantenimiento y, además, proporcionan una fuente de energía renovable para una reutilización beneficiosa de un relleno sanitario clausurado.

Como se puede observar en la Figura 5.11, este proyecto utiliza 4 de las 19,4 hectáreas disponibles para la generación de energía solar, la cual consta de 7000 paneles laminados que generan alrededor de 1MW de electricidad renovable. Este planteamiento resulta ideal pues estos paneles son flexibles, livianos, no requieren refuerzos y por lo tanto no agregan carga puntual a la superficie de la masa de residuos en donde se asienta.

Los paneles tienen 6 milímetros de espesor aproximadamente y generan electricidad durante todo el año independientemente de las condiciones de luz y temperatura del lugar. Este sistema está diseñado de tal forma que los paneles puedan ser reemplazados fácilmente al final de su vida útil (DeVita, Perera y Roberts, 2017).





*Figura 5.11. Utilización de paneles solares en el relleno sanitario de Hickory Ridge [Fotografía].*

*Fuente: Keith Philpott (s.f.) citado en Braxton (2014).*

La utilización de los paneles solares en estos sitios de disposición final se está considerando e implementando cada vez más con éxito en los rellenos sanitarios clausurados de todo el mundo debido a sus importantes beneficios que tiene con respecto a la cubierta tradicional final. Además, es bastante ventajosa al aplicarse en rellenos sanitarios con sistemas de aprovechamiento del biogás que se genera en la masa de residuos, debido a que los paneles se pueden ir implantando a medida que se va reduciendo la descomposición orgánica y por ende la generación del biogás (USEPA, 2012).

### **5.7. Cierre y uso futuro del Relleno Sanitario de Pichacay**

Una vez realizado el análisis de proyectos similares de recuperación y reinserción de rellenos sanitarios alrededor de todo el mundo, se puede llegar a la conclusión de que el Relleno Sanitario de Pichacay puede ofrecer grandes ventajas a la ciudad de Cuenca a largo plazo, pues primeramente se debe esperar aproximadamente unos 20 años hasta que concluyan los procesos biológicos naturales para dedicar estos espacios a usos

recreacionales destinados a actividades de esparcimiento, descanso y prácticas deportivas. Sin embargo, una vez sellado y clausurado se pueden acondicionar estos lugares con vegetación transformándolos en áreas verdes. De ahí la importancia de la continuidad en esta línea de investigación acerca de las plantaciones de árboles en estas zonas, así como también la realización de pruebas con especies arbóreas, arbustivas y gramíneas.

Es importante además, estudiar más a profundidad el tipo de vegetación que sea apto para estos sitios de disposición final, como es el caso del penco, retama y zigzal, plantas que además de ayudar en la estabilidad de los taludes del relleno, también mejoran el impacto visual final de la zona.

## CONCLUSIONES

Los residuos sólidos depositados en el relleno sanitario son materiales heterogéneos que varían de acuerdo al tiempo, a la zona y a diferentes condiciones de la población, por lo que su composición porcentual va a depender según características culturales, situación económica y hábitos de consumo de la población. En este sentido, esta variación repercute directamente sobre los parámetros geomecánicos del material y por ende en los resultados finales de la presente investigación.

Los resultados obtenidos de los puntos topográficos analizados en el área de asentamientos de la fase norte dos del Relleno Sanitario de Pichacay muestran unas curvas bien definidas de asentamiento que van incrementando de manera exponencial conforme aumenta la altura de la columna de basura dispuesta en un período de un año a partir de la disposición de los residuos sólidos en el año 2018 hasta su finalización en el 2019 y una curva que muestra la disminución de los asentamientos después de pasado varios años como en este caso se tomó de referencia el año 2009 al 2019.

Se logró además determinar que los asentamientos se mantienen constantes entre 0 y 60 cm en los primeros 6 metros de altura de residuos sólidos. Luego existe un incremento de 40 a 80 cm cuando se llegan de los 8 a 10 metros de altura de basura y a partir de ahí empieza un crecimiento exponencial hasta alcanzar asentamientos cercanos a los 2 metros con alturas mayores a los 10 metros cuando se analizan los asentamientos a corto plazo.

Estos asentamientos sufridos por la basura depositada en el relleno sanitario conllevan una disminución en el volumen de la masa de residuos y por ende un aumento en su capacidad volumétrica y vida útil de estos sitios de disposición final.

En cuanto al estudio de estabilidad del Relleno Sanitario de Pichacay, se determinó mediante la caracterización geomecánica de la basura que ciertos parámetros, especialmente la cohesión y ángulo de fricción, van variando con el tiempo debido a la descomposición de la materia orgánica con el paso de los años. En este sentido, se concluye que, de acuerdo a la composición porcentual de los residuos sólidos se pueden utilizar valores de rellenos sanitarios de otros países siempre y cuando sean

comparables con el Ecuador, como es el caso de Chile, Brasil y Colombia, y no con valores provenientes de Estados Unidos o países de Europa, principalmente.

En lo que al análisis de los perfiles escogidos se refiere se tiene que, bajo las condiciones actuales del relleno sanitario, los perfiles 1 (en construcción), 4 y 5 (clausurados) se encuentran estables con factores de seguridad superiores a los mínimos requeridos y con opciones de optimizar su geometría. No obstante, se observa que los perfiles 2 y 3 (en construcción) no cumplen con los criterios de estabilidad, pues presentan factores de seguridad de 1,427 y 1,349 (inferiores a 1,5) para el caso estático y de 1,006 y 1,042 (inferiores a 1,05) para el caso pseudo estático, respectivamente.

Además, del perfil 1 se puede concluir que los asentamientos producidos en los taludes y bermas del relleno sanitario ayudan a mejorar la estabilidad de los taludes, puesto que estos movimientos de suelo verticales modifican, aunque en poco, la geometría principalmente construida, disminuyendo la inclinación de estos perfiles y por ende aumentando su factor de seguridad.

Por otra parte, del análisis de las alternativas de mejoramiento en solución a los perfiles inestables 2 y 3 se puede concluir que, la construcción de bermas ayuda también en la estabilidad de los rellenos que alcanzan grandes alturas, pues en estos casos es posible la construcción de mayor número de taludes de menor altura cada una, pero con pendientes más inclinadas, consiguiendo aumentar la capacidad volumétrica de estos sitios de disposición final y por tanto su tiempo de vida útil. Asimismo, otra de las ventajas relacionadas con la construcción de bermas es la utilización de estos espacios como paso de la maquinaria, zonas de acopio del material de cobertura, rutas de acceso para solucionar cualquier incidente que se pueda suscitar o simplemente para la ejecución de las operaciones en cuanto al mantenimiento del relleno. No obstante, si se debería realizar un adecuado estudio preliminar con el fin de establecer el método más apto acorde a las características propias de la zona, así como su costo económico y de implementación.

Acorde al análisis en cuanto a la variación en la geometría del relleno se concluye que, el incremento en altura de la masa de residuos disminuye la estabilidad de los taludes. Además, otra conclusión que se obtiene de los análisis realizados es que, a igualdad de

pendiente, los factores de seguridad incrementan conforme la anchura de las bermas aumenta, sin embargo, la construcción de bermas muy anchas podrían ser un gran problema en cuanto a la acumulación del agua superficial que se puede provocar en dichas zonas debido a los asentamientos del suelo, permitiendo el ingreso de estos fluidos al interior de las unidades y comprometiendo la estabilidad de la masa de residuos.

En lo que respecta a la caracterización del Relleno Sanitario de Pichacay, se deduce mediante el análisis de los perfiles 4 y 5 que la geometría manejada para el sellado y clausura de las terrazas no siguen un mismo parámetro de diseño, pues éstas se encuentran construidas con alturas que van desde los 6 hasta los 9 metros con ángulos de inclinación de los taludes que varían entre los 19° y 35°, lo que significa que, comparando con el diseño propuesto en principio, se está perdiendo aproximadamente un 31% de la capacidad volumétrica. No obstante, en cuanto a la geometría óptima se obtuvo a partir de los resultados obtenidos que una altura de 10 metros por cada terraza con bermas de 10 metros de ancho y un ángulo de inclinación de los taludes locales de 32° incrementan la capacidad volumétrica del relleno sanitario en un 40% aproximadamente.

Finalmente, una vez realizado el análisis de proyectos similares de recuperación y reinscripción de rellenos sanitarios alrededor de todo el mundo, se puede llegar a la conclusión de que el Relleno Sanitario de Pichacay puede ofrecer grandes ventajas a la ciudad de Cuenca a largo plazo, pues primeramente se debe esperar aproximadamente unos 20 años hasta que concluyan los procesos biológicos naturales para dedicar estos espacios a usos recreacionales destinados a actividades de esparcimiento, descanso y prácticas deportivas. Sin embargo, una vez sellado y clausurado se pueden acondicionar estos lugares con vegetación transformándolos en áreas verdes. De ahí la importancia de la continuidad en esta línea de investigación acerca de las plantaciones de árboles en estas zonas, así como también la realización de pruebas con especies arbóreas, arbustivas y gramíneas.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda a la Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca (EMAC EP) realizar levantamientos topográficos del Relleno Sanitario de Pichacay tanto de su fase norte uno y dos con la misma periodicidad de tiempo para poder evaluar y analizar permanentemente la geometría y los movimientos tanto horizontales como verticales que se producen en el relleno sanitario.
- Implementar en el Relleno Sanitario de Pichacay un sistema de redes de inclinómetros, piezómetros y placas de asentamientos que ayuden como medidas preventivas de monitoreo y control periódico durante la operación del relleno, para así contar con una base de datos con suficiente información que permita tomar en cuenta nuevas variables que no fueron tomadas en cuenta en este estudio, como son las deformaciones en el tiempo y la acumulación de los líquidos en la masa de residuos.
- Debido a la gran variabilidad de la información obtenida en la literatura internacional, se recomienda realizar un análisis detallado de los parámetros geomecánicos de los residuos sólidos propios del Relleno Sanitario de Pichacay mediante ensayos de campo y laboratorio, con el objetivo de determinar los valores de cohesión y ángulo de fricción interna a diferentes profundidades del relleno y la evolución que pueda experimentar estos con el paso del tiempo.
- Investigar más a fondo las variables que intervienen en cada método de diseño para la obtención del factor de seguridad como son los modelos propuestos por Fellenius, Bishop, Janbú, Spencer, Morgenstern-Price, entre otros, con el objetivo de brindar mayor confiabilidad al momento de la utilización de cualquiera de estos métodos en el análisis de estabilidad de los taludes.
- Se debería garantizar que el sistema de recolección y evacuación de las aguas lluvias, lixiviados y biogás funcione de manera adecuada desde su fase de operación hasta la posterior a su cierre. Para esto, se recomienda revisar periódicamente todos los elementos de estos sistemas con el objetivo de mantener las tuberías en buen estado y evitar posibles obstrucciones que ocasionen el almacenamiento de los líquidos o gases en la masa de residuos y

por consecuente el crecimiento de las presiones intersticiales que afecten la estabilidad del relleno.

- Con el fin de mantener el valor de densidad del Relleno Sanitario de Pichacay mayor a  $1 \text{ ton/m}^3$ , se recomienda continuar con la ejecución de las mismas prácticas realizadas hasta la fecha en lo que se refiere a la compactación de los residuos sólidos, pues este valor es un parámetro muy importante en el análisis de estabilidad de los taludes.
- Por último, para el sellado y reinsertión del Relleno Sanitario de Pichacay al término de su vida útil, se recomienda estudiar más a profundidad el tipo de vegetación que sea apto para estos sitios de disposición final, como es el caso del penco, retama y zigzal, plantas que además de ayudar en la estabilidad de los taludes del relleno, también mejoran el impacto visual final de la zona.

**BIBLIOGRAFÍA**

- AIDIS. (2018). *Gestión integral de residuos sólidos urbanos* (P. Tello, D. Campani, y D. R. Sarafian (eds.)).
- Alcaldía de Medellín. (2015). *¡ORGULLO! Con proyecto Moravia Florece para la Vida, hoy Medellín recibe reconocimiento en Premios @Corresponsables.* Twitter; @AlcaldiadeMed. <https://twitter.com/AlcaldiadeMed/status/657305927268311040>
- Ambiental Blog. (2010). *Los rellenos sanitarios.* Recuperado de <https://ambientalblog2010.wordpress.com/2010/12/07/los-rellenos-sanitarios>
- AME-INEC. (2019). *Registro de gestión de residuos sólidos.* Instituto nacional de estadística y censos (INEC). Recuperado de <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/gad-municipales/>
- Andrade, J. C. D. M. (2005). *Fitotransporte de metais em espécies arbóreas e arbustivas em aterro de resíduos sólidos urbanos [Fitotransporte de metales en especies arbóreas y arbustivas en vertedero de residuos sólidos urbanos]* (tesis doctoral) [Universidad Federal de Río de Janeiro]. Recuperado de [http://www.coc.ufrj.br/en/component/docman/?task=doc\\_download&gid=808&Itemid=](http://www.coc.ufrj.br/en/component/docman/?task=doc_download&gid=808&Itemid=)
- Ashford, S. A., y Sitar, N. (1994). *Seismic response of steep natural slopes [Respuesta sísmica de pendientes empinadas naturales].*
- Bishop, A. W. (1955). The use of slip circle in the stability analysis of earth slopes [El uso del círculo de deslizamiento en el análisis de estabilidad de pendientes de tierra]. *Geotechnique*, 5(1), 7-17.
- Braxton, A. (2014, mayo 20). Atlanta proposes placing solar farms on city landfills [Atlanta propone colocar granjas solares en los vertederos de la ciudad]. *The Southerner Online*. Recuperado de <https://thesoutherneronline.com/>
- Caceres, A. T. (2007). Recuperación paisajística de vertederos de basura: un ejemplo de brownfields. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 16, 71-80. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=2818/281821949007>
- Cárdenas, A. R. (2013). *Análisis de estabilidad de taludes en el relleno sanitario Río Azul* (tesis de pregrado) [Universidad de Costa Rica]. Recuperado de <https://ruie.ucr.ac.cr/catalogo/Record/INII-CEDI-CD-20160>
- Castillejo, M. A. (2004). *Estabilidad de taludes en macizos de residuos sólidos urbanos (trabajo de ascenso)* [Universidad Central de Venezuela]. Recuperado de <http://saber.ucv.ve/handle/123456789/7108>
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. (1997). *Guía para el manejo de residuos sólidos en ciudades pequeñas y zonas rurales.* Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente CEPIS/OPS/OMS. Recuperado de <http://www.ingenieroambiental.com/newinformes/pequena.pdf>



- CEPAL, OPS, y Universidad Nacional de Córdoba. (1999). Módulo Tres: Manejo y operación de un vertedero. En *Manejo y operación de un vertedero*.
- Chen, R., y Chen, K. (2006). Unsaturated consolidation theory for the prediction of long-term municipal solid waste landfill settlement [Teoría de la consolidación insaturada para la predicción de asentamientos de rellenos sanitarios de residuos sólidos urbanos a largo plazo]. *Waste Management and Research*, 24(1), 80-91. <https://doi.org/10.1177/0734242X06062579>
- Clough, R. W., y Woodward, R. J. (1967). Analysis of embankment stresses and deformations [Análisis de tensiones y deformaciones de terraplenes]. *Soil Mechanics and Foundation Division*, 93, 529-549. Recuperado de <https://trid.trb.org/view/126809>
- Collazos, H. (2001). *Diseño y operación de rellenos sanitarios* (1.<sup>a</sup> ed.). Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.
- Collazos, H. (2008). *Diseño y operación de rellenos sanitarios* (3.<sup>a</sup> ed.). Escuela Colombiana de Ingeniería. Recuperado de [http://biblioteca.unach.edu.ec/opac\\_css/index.php?lvl=notice\\_display&id=2729](http://biblioteca.unach.edu.ec/opac_css/index.php?lvl=notice_display&id=2729)
- Colomer, F. J., Gallardo, A., Bovea, M. D., y Carlos, M. (2009). Evaluación del riesgo geotécnico en vertederos de residuos sólidos: identificación de los principales peligros. *II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*, 1-18. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/228799921>
- Conto, O. A., y Tipán, D. J. (2018). *Evaluación del comportamiento hidráulico de los lixiviados de la fase norte I del relleno sanitario de Cuenca* (tesis de pregrado). Universidad del Azuay.
- Das, B. M. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones* (7.<sup>a</sup> ed.). CENGAGE Learning.
- Das, B. M. (2015). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica* (S. R. Cervantes (ed.); 4.<sup>a</sup> ed.). CENGAGE Learning.
- Davis, M. L., y Masten, S. J. (2005). *Ingeniería y ciencias ambientales*. McGraw-Hill.
- De Matteis, Á. F. (2003). Geología y geotecnia - Estabilidad de taludes [Universidad Nacional de Rosario]. En *Universidad Nacional de Rosario*. <https://doi.org/10.1126/science.1141199>
- DeVita, J., Perera, K., y Roberts, M. (2017, febrero). What is a solar energy landfill cover system? [Qué es un sistema de cobertura de vertederos de energía solar?]. *Insidewaste*, 30. Recuperado de <https://www.hdrinc.com/>
- Di Stefano, A. B. (1996). Settlement of Beddingham landfill [Asentamientos del relleno sanitario de Beddingham]. *Engineering Geology of Waste Disposal*, 11, 111-119. <https://doi.org/10.1144/GSL.ENG.1996.011.01.14>
- Diario La Tarde. (2014, julio 11). EMAC concientiza sobre la importancia del reciclaje. *Late*. Recuperado de <https://www.late.com.ec/>
- Diario La Tarde. (2017, julio 18). El parque La Alborada es inseguro. *Late*. Recuperado de <https://www.late.com.ec/>
- Díaz, J. J., y Iguarán, J. J. (2015). *Resistencia al corte de residuos sólidos municipales:*

- una revisión crítica al comportamiento y los parámetros de diseño* (tesis de pregrado). Pontificia Universidad Javeriana.
- Diosa, D. C. (2016). *Comportamiento geotécnico de los taludes conformados por residuos sólidos en rellenos sanitarios* (tesis de pregrado). En *Universidad La Gran Colombia*. Universidad La Gran Colombia.
- Duque, G., y Escobar, C. E. (2002). *Mecánica de los suelos*. Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/1864/9/cap8.pdf>
- Eguizabal, R. M. (2011). *Guía de diseño, construcción, operación, mantenimiento y cierre de relleno sanitario manual* (Ministerio del Ambiente - MINAM (ed.)). Red de Instituciones Especializadas en Capacitación para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos.
- EMAC EP. (2005). *Gestión integral de residuos sólidos* (p. 36). Recuperado de [http://www.globalmethane.org/documents/events\\_land\\_20061129\\_cuenca.pdf](http://www.globalmethane.org/documents/events_land_20061129_cuenca.pdf)
- EMAC EP. (2019). *Rendición de cuentas 2019*. Alcaldía de Cuenca.
- EMAC EP. (2020). Resumen de pesos monitoreados en el Relleno Sanitario de Pichacay. En *Resumen de pesos 2006-2019*. EMAC EP.
- Espinace, R., Palma, J. H., y Valenzuela, P. (2005). *Aspectos geotécnicos de la co disposición de lodos y residuos sólidos urbanos*.
- Espinosa, A., y González, A. (2001). La acumulación de basuras como material geotécnico II: Comportamiento de las basuras. *Revista de Ingeniería*, 0(14), 56-70. <https://doi.org/10.16924/riua.v0i14.539>
- Fassett, J. B., Leonard, G., y Reppeto, P. (1994). Geotechnical properties of municipal solid wastes and their use in landfill design [Propiedades geotécnicas de los residuos sólidos urbanos y su uso en el diseño de rellenos sanitarios]. *Waste Tech* 94, 31.
- Fellenius, W. (1927). *Erdstatische berechnungen mit reibung und kohasion (adhesion) und unter annahmekreiszyldrischer gleitflachen [Cálculos estáticos de la tierra con fricción y cohesión (adhesión) y asumiendo superficies deslizantes cilíndricas circulares]*.
- Fiallo, R. C. (2020). *Análisis de la generación per cápita y composición gravimétrica de residuos sólidos procedentes de diferentes fuentes de la ciudad de Cuenca* (tesis de pregrado). Universidad del Azuay.
- [1]GAD Cuenca (2014). Ordenanza que regula la gestión integral de los desechos y residuos sólidos en el cantón Cuenca, 11 (2014). Recuperado de <http://www.cuenca.gob.ec/?q=node/8881>
- Galarza, P., Parra, B., y Vásquez, P. (2013, junio). Relleno sanitario de Pichacay. *Revista Galileo*, 160-166. Recuperado de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/30005>
- Gomes, C., Lopes, M. L., y Venda, P. J. (2013). Municipal solid waste shear strength parameters defined through laboratorial and in situ tests [Parámetros de resistencia al corte de residuos sólidos urbanos definidos mediante pruebas de laboratorio e in situ]. *Air and Waste Management Association*, 63(11), 1352-

1368. <https://doi.org/10.1080/10962247.2013.813876>

- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., y Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica* (I. Capella y S. Ayerra (eds.)). Pearson Educación.
- Henriques, A. G. (2000). *Compresibilidad de los residuos sólidos urbanos* (tesis doctoral). Universidad de Oviedo.
- Hidalgo, R., y Marrero, D. A. (2015). *Proyecto de instalación de planta de tratamiento de lixiviados sostenible, caso aplicado al vertedero de Duquesa* (tesis de pregrado). Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.
- Hoek, E., y Bray, J. W. (1981). *Rock slope engineering [Ingeniería de taludes rocosos]* (3.<sup>a</sup> ed.). Institution of Mining and Metallurgy.
- Hoorweg, D., y Bhada-Tata, P. (2012). What a waste. A global review of solid waste management [Que desperdicio. Una revisión global de la gestión de residuos sólidos]. En *Urban Development and Local Government Unit*. <https://doi.org/10.1201/9781315593173-4>
- Howland, J. D., y Landva, A. O. (1992). Stability analysis of a municipal solid waste landfill [Análisis de estabilidad de un relleno sanitario municipal de residuos sólidos]. *Stability and Performance of Slope and Embankments - II*, 2.
- Inga, M. D., y Romero, L. F. (2011). *Problemas de estabilidad de taludes en el relleno sanitario de Pichacay, parroquia Santa Ana, cantón Cuenca* (tesis de pregrado). En *Escuela de Ingeniería Civil*. Universidad de Cuenca.
- Ismail, T., Tarek, D., Mejdi, S., Amira, B. yahmed, Murano, F., Neyla, S., y Naceur, J. (2011). Cascade bioreactor with submerged biofilm for aerobic treatment of Tunisian landfill leachate [Biorreactor en cascada con biopelícula sumergida para el tratamiento aeróbico de lixiviados del relleno sanitario de Túnez]. *Bioresource Technology*, 102(17), 7700-7706. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.05.069>
- Israel Alba Estudio. (2016). *Parque forestal de Valdemingómez*. Plataforma Arquitectura. Recuperado de <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl>
- Janbú, N. (1968). Slope stability computations [Cálculos de estabilidad de taludes]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*.
- Jaramillo, J. (2002). Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales. En *Organización Panamericana de la Salud*. Recuperado de <http://cdam.minam.gob.pe:8080/handle/123456789/294>
- Kavazanjian, E. J., Matasović, N., Bonaparte, R., y Schmertmann, G. R. (1995). Evaluation of MSW properties for seismic analysis [Evaluación de las propiedades de los RSU para el análisis sísmico]. *Geoenvironment* 2000, 2, 1126-1141.
- Kiss, G., y Encarnación, G. (2006). Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final. *Gaceta ecológica*, 79, 39-51. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=539/53907903>
- Knochenmus, G., Wojnarowicz, M., y Van Impe, W. F. (1998). Stability of municipal solid wastes [Estabilidad de los residuos sólidos urbanos]. *Third International Congress on Environmental Geotechnics*, 3, 977-1000.

- Kölsch, F. (1995). Material values for some mechanical properties of domestic waste [Valores de material para algunas propiedades mecánicas de los residuos domésticos]. *Sitting, Lining Drainage & Landfill Mechanics*, 2, 52-75.
- Krook, J., Svensson, N., y Eklund, M. (2012). Landfill mining: A critical review of two decades of research [Minería de vertederos: una revisión crítica de dos décadas de investigación]. *Waste Management*, 32(3), 513-520. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.10.015>
- Lancaster County Solid Waste Management Authority. (2020). *Frey Farm Landfill [Vertedero de Frey Farm]*. Integrated System. Recuperado de <https://www.lcswma.org/>
- Landva, A. O., y Clark, J. I. (1990). Geotechnics of waste fill [Geotecnia de relleno de residuos]. En A. Landva y G. D. Knowles (Eds.), *Geotechnics of Waste Fills - Theory and Practice* (pp. 86-103). American Society for Testing and Materials. <https://doi.org/10.1520/STP25301S>
- LCSWMA. (2020). *Wind energy [Energía eólica]*. Green energy portfolio. Recuperado de <https://www.lcswma.org/>
- Ling, H. I., Leshchinsky, D., Mohri, Y., y Kawabata, T. (1998). Estimation of municipal solid waste landfill settlement [Estimación del asentamiento de rellenos sanitarios de residuos sólidos urbanos]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(1), 21-28. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1998\)124:1\(21\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:1(21))
- Lobo, A., Szantó, M., y Llamas, S. (2016). Cierre, sellado y re inserción de antiguos vertederos. Experiencias en iberoamérica. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32(Especial Residuos Sólidos), 123-139. <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.05.09>
- MAE (2015). Acuerdo No. 061. Reforma del libro VI del texto unificado de legislación secundaria, Pub. L. No. 316, 80 (2015).
- Manassero, M., Van Impe, W. F., y Bouazza, A. (1997). Waste disposal and containment [Eliminación y contención de la basura]. En A. A. Balkema (Ed.), *Environmental Geotechnics* (pp. 1733-1751). Recuperado de <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=6241437>
- Manilla, A. A., Garnica, P., y Pérez, A. (2003). Evaluación indirecta de los módulos elásticos de rigidez in situ y la relación entre Vp/Vs y el ángulo de fricción interna. En *Secretaría de Comunicaciones y Transportes - Instituto Mexicano del Transporte* (Número 225). Recuperado de <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Evaluación+indirecta+de+los+módulos+elásticos+de+rigidez+in+situ+y+la+relación+entre+vp/vs+y+el+angulo+de+fricción+interna#0>
- Markland, J. T. (1972). *A useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge slide type of failure is expected [Una técnica útil para estimar la estabilidad de taludes rocosos cuando se espera el tipo de falla de deslizamiento de cuña rígida]* (Imperial College of Science and Technology (ed.)). Interdepartmental Rock Mechanics Project.
- Martinez, Y. M. (2016). *Estabilización de deslizamientos de tierras mediante pilotes*

- (tesis de maestría). Universidad Politécnica de Cataluña.
- Medellin Travel. (s. f.). *Un jardín: Símbolo de reinención (Moravia)*. Medellin.Travel. Recuperado 14 de enero de 2021, de <https://www.medellin.travel/>
- Medina, M. E. (2018). *Problemas geotécnicos en los rellenos sanitarios* (tesis de especialización) [Universidad Tecnológica Nacional]. <http://hdl.handle.net/20.500.12272/3768>
- Mejía, M. E., y Pinos, M. A. (2011). *Los problemas ambientales producidos por el relleno sanitario de Pichacay en la parroquia «Santa Ana» del cantón Cuenca* (tesis de pregrado). Universidad de Cuenca.
- Melo, E., y Schneider, I. (2000). Caracterização da vegetação e solo de uma antiga área de disposição de resíduos sólidos urbanos de Passo Fundo [Caracterización de la vegetación y suelo de una zona antigua para la disposición de residuos sólidos urbanos de Paso Hondo]. *Simpósio Nacional de Recuperação de Áreas Degradadas*, 4, 250.
- Ministerio de Desarrollo Económico (2005). Decreto 838 de 2005. En: Artículo 1. Definiciones. Por el cual se modifica el Decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones. Colombia. Recuperado de: [http://www.corpamag.gov.co/archivos/normatividad/Decreto838\\_20050323.htm](http://www.corpamag.gov.co/archivos/normatividad/Decreto838_20050323.htm)
- Mitchell, R. A., y Mitchell, J. K. (1992). Stability evaluation of waste landfills [Evaluación de la estabilidad de rellenos sanitarios de residuos]. *Stability and Performance of Slope and Embankments - II*, 2.
- Montalván, F., Loor, M., Pérez, L., Carrión, P., Álvarez, A., Reyes, B., y Herrera, G. (2017). Estabilidad de taludes para un diseño de un relleno sanitario manual para una población de 5000 habitantes. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, 4(3), 103-110. <https://doi.org/10.26423/rctu.v4i3.276>
- Moreno, J. M. (2001). Fotointerpretación y dinámica del deslizamiento en el relleno sanitario de Doña Juana, Bogotá - Colombia. *Geología Colombiana*, 26, 153-175.
- Moreno, L. A. (2013). *Metodología de diseño de estabilidad de taludes para rellenos sanitarios de residuos sólidos urbanos* (tesis de pregrado) [Universidad del Bío-Bío]. En *Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile U. cybertesis.ubiobio.cl/tesis/2013/machuca\_g/html/index.html%0A*
- NEC-SE-DS (2015). Peligro sísmico, diseño sismo resistente parte 1, Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda 1 (2015). Recuperado de <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/documentos-normativos-nec-norma-ecuatoriana-de-la-construccion/>
- NEC-SE-GC (2015). Geotécnica y Cimentaciones, Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (2015). Recuperado de <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/documentos-normativos-nec-norma-ecuatoriana-de-la-construccion/>
- Oliva, A. O. (1999). *Análisis de la estabilidad y seguridad de taludes* (tesis doctoral)

- [Universidad de Oviedo]. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=207461>
- Ordóñez, C. A., y Villarraga, M. R. (2005). Asentamientos en el relleno sanitario Curva de Rodas de la ciudad de Medellín, Colombia. *Revista Politécnica*, 1(2), 57-72. <https://doi.org/10.33571/rpolitec>
- Ordóñez, C. A., y Villarraga, M. R. (2007). Resistencia al corte de residuos sólidos urbanos: estado del arte. *Revista Politécnica*, 3(5), 113-121. <https://doi.org/10.33571/rpolitec>
- Ortiz, Y. M. (2017). *Ciclo de vida de una central de biogás* (tesis de maestría). Instituto Politécnico de Leiria.
- Palma, A. A. (2018). *Estabilidad de taludes en tierra para el sitio del relleno sanitario del cantón Portoviejo* (tesis de pregrado) [Universidad Estatal del Sur de Manabí]. Recuperado de <http://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/1408>
- Palma, J. H. (1995). *Comportamiento geotécnico de vertederos controlados de residuos sólidos urbanos* (tesis doctoral). Universidad de Cantabria.
- Palma, Juan H., Espinace, R., y Valenzuela, P. (1995). *Análisis de la estabilidad de rellenos sanitarios*. 15. Recuperado de [http://icc.ucv.cl/geotecnia/05\\_publicaciones/public\\_prop/analisis\\_de\\_la\\_estabilidad\\_de\\_rs.pdf](http://icc.ucv.cl/geotecnia/05_publicaciones/public_prop/analisis_de_la_estabilidad_de_rs.pdf)
- Perrozzì, A. (2020, junio 25). Reconversión de vertederos en parques urbanos: 5 casos. *Transecto*. Recuperado de <https://transecto.com/>
- Pincay, R. A. (2020). *Propuesta para evaluación de estabilidad de taludes en rellenos sanitarios, según la clasificación de suelos ASTM-D 2487* (tesis de pregrado). Universidad Estatal del Sur de Manabí.
- Preiss, B. (2007). *Garbage dump turned eco-theme park [Basurero convertido en parque temático ecológico]*. Trend Hunter Inc. Recuperado de <https://www.trendhunter.com/>
- Presidencia de la República del Ecuador (2003). Libro VI Anexo 6: Norma de calidad ambiental para el manejo y disposición final de desechos sólidos no peligrosos, 429 (2003).
- Prieto, C. C. (2011). *Metodología para la evaluación de riesgos por deslizamientos en líneas de conducción de hidrocarburos* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia.
- PROMAS. (2020). *Levantamientos topográficos para el relleno sanitario de Pichacay y escombreras operadas por EMAC EP*.
- Qian, X., Koerner, R. M., y Gray, D. H. (2002). *Geotechnical aspects of landfill design and construction [Aspectos geotécnicos del diseño y la construcción de rellenos sanitarios]* (Pearson (ed.); 1.<sup>a</sup> ed.). Prentice Hall.
- Ramírez, P., y Alejano, L. R. (2004). *Mecánica de rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Ramos, A., y Gorraiz, J. V. (2015). Estabilidad de taludes de un relleno sanitario: caso carrapacho, Chiquinquirá, Boyacá. *III Seminario Internacional de Ingeniería*

*Sísmica y Geotecnia*. Recuperado de <http://rdigitales.uptc.edu.co/>

- Revelo, V. U. (2008). *Modelo para la estabilización de taludes en las carreteras del subtrópico del nor occidente del Ecuador a fin de evitar accidentes de tránsito y disminuir los costos de operación vehicular* (tesis de maestría). Universidad Técnica de Ambato.
- Rivera, I. (2012). *Determinación de asentamientos teóricos en rellenos sanitarios (Proyecto de graduación)* [Instituto Tecnológico de Costa Rica]. Recuperado de <https://repositoriotec.tec.ac.cr/>
- Röben, E. (2002). *Diseño, Construcción, Operación y Cierre de Rellenos Sanitarios Municipales*. DED - Deutscher Entwicklungsdienst.
- Rodrigo, M. E. (2020). *Evaluación conjunta de la producción de lixiviados y biogás en vertederos de residuos sólidos urbanos* (tesis doctoral). Universidad Politécnica de Valencia.
- Rosas, F. J. (2004). *Clausura, sellado y recuperación de un relleno sanitario* (tesis de pregrado) [Universidad Andrés Bello]. Recuperado de <http://repositorio.unab.cl/xmlui/handle/ria/14884>
- Sandoval, E. A., Ramírez, A., y Cuarán, D. (2015). Resistencia al esfuerzo cortante en rellenos sanitarios. *Dyna*, 82(193), 83-92. <https://doi.org/10.15446/dyna.v82n193.46046>
- Sandoval, L. (2010). *Informe anual de residuos sólidos municipales y no municipales en el Perú*. Recuperado de <https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/archivos/public/docs/2093.pdf>
- SEMARNAT. (2016). Informe de la situación del medio ambiente en México. En *Compendio de Estadísticas Ambientales, Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde*.
- Shafer, A. L., Hargrove, J. Q., y Harris, J. M. (2003). *Stability analysis for bioreactor landfill operations [Análisis de estabilidad para operaciones de rellenos sanitarios de biorreactores]*.
- Siegel, R. A., Robertson, R. J., y Anderson, D. G. (1990). Slope stability investigations at a landfill in southern California [Investigaciones de estabilidad de taludes en un relleno sanitario al sur de California]. En A. Landva y G. D. Knowles (Eds.), *Geotechnics of Waste Fills - Theory and Practice* (pp. 259-284). American Society for Testing and Materials. <https://doi.org/10.1520/STP25311S>
- Singh, S., y Murphy, B. (1990). Evaluation of the stability of sanitary landfills [Evaluación de la estabilidad de rellenos sanitarios]. En A. Landva y G. D. Knowles (Eds.), *Geotechnics of Waste Fills - Theory and Practice* (pp. 240-258). American Society for Testing and Materials. <https://doi.org/10.1520/STP25310S>
- Sowers, G. F. (1973). Settlement of waste disposal fills [Asentamientos de residuos en rellenos sanitarios]. *International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (ICSMFE)*, 2, 207-210. Recuperado de <https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?ID=143173>
- Spencer, E. (1967). A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slices forces [Un método de análisis de la estabilidad de terraplenes]

- asumiendo fuerzas paralelas entre cortes]. *Geotechnique*, 17(1), 11-26.
- State of Israel. (2012). *Ariel Sharon Park [Parque Ariel Sharon]*. Flickr; StateofIsrael. Recuperado de <https://www.flickr.com/>
- Suárez, J. (1998a). Caracterización de los movimientos. En Ingeniería de Suelos Ltda. (Ed.), *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales* (pp. 1-34). Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.
- Suárez, J. (1998b). Lluvias, presión de poros y sus efectos. En Ingeniería de Suelos Ltda. (Ed.), *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales* (pp. 233-274). Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.
- Suárez, J. (1998c). Modelos de análisis de estabilidad. En Ingeniería de Suelos Ltda. (Ed.), *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales* (pp. 117-150). Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.
- Suárez, J. (2009a). Comportamiento sísmico de los taludes. En *Deslizamientos - Análisis Geotécnico Vol. 1* (pp. 267-306).
- Suárez, J. (2009b). Control de caídos y deslizamientos en roca. En *Deslizamientos - Técnicas de Remediación Vol. 2* (pp. 313-360).
- Suárez, J. (2009c). Nomenclatura y clasificación de los movimientos. En *Deslizamientos - Análisis Geotécnico Vol. 1* (pp. 1-36). Recuperado de <http://www.erosion.com.co/deslizamientos-tomo-i-analisis-geotecnico.html>
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., y Vigil, S. (1993). Propiedades físicas, químicas y biológicas de los residuos sólidos urbanos. En *Gestión Integral de Residuos Sólidos* (pp. 81-113). McGraw-Hill. Recuperado de <http://web.frm.utn.edu.ar/webutn/archivos/civil/Sanitaria/Capitulo4.pdf>
- Torres, S., Barrientos, B., Hernández, M. del C., Gómez, G., y Macedo, M. G. (2011). Afectación ambiental del tiradero a cielo abierto de Almoloya del Río, estado de México. *Hacia la sustentabilidad: Los residuos sólidos como fuente de energía y materia prima*, 253-257.
- Turcumán, M., Fiore, J. M., y Vázquez, G. (2009). Estudio de un vertedero controlado. Análisis de su estabilidad a través de la estimación de la compresibilidad. *II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*, 1. [http://www.redisa.uji.es/artSim2009/ImpactoYRiesgoAmbiental/Estudio de un vertedero controlado\\_Análisis de su estabilidad a través de la estimación de la compresibilidad.pdf](http://www.redisa.uji.es/artSim2009/ImpactoYRiesgoAmbiental/Estudio%20de%20un%20vertedero%20controlado_An%C3%A1lisis%20de%20su%20estabilidad%20a%20trav%C3%A9s%20de%20la%20estimaci%C3%B3n%20de%20la%20compresibilidad.pdf)
- UNEP. (2005a). *Solid waste management [Manejo de residuos sólidos]* (L. F. Diaz, G. M. Savage, y L. L. Eggerth (eds.)). CalRecovery, Inc. <https://doi.org/10.1016/j.ijpara.2010.01.008>
- UNEP. (2005b). *Training module - Closing an open dumpsite and shifting from open dumping to controlled dumping and to sanitary land filling [Módulo de capacitación - Cierre de un botadero a cielo abierto y cambio de un botadero a cielo abierto a relleno sanitario]*.
- UNEP. (2010). *ABC of SCP: Clarifying concepts on sustainable consumption and production [ABC de CPS: Clarificación de conceptos sobre consumo y producción sostenibles]* (L. Angharad y M. Solis (eds.)). Recuperado de



[http://www.uneptie.org/scp/marrakech/pdf/ABC of SCP - Clarifying Concepts on SCP.pdf%0Ahttps://sustainabledevelopment.un.org/index.php?page=view&type=400&nr=945&menu=1515](http://www.uneptie.org/scp/marrakech/pdf/ABC_of_SCP_-_Clarifying_Concepts_on_SCP.pdf%0Ahttps://sustainabledevelopment.un.org/index.php?page=view&type=400&nr=945&menu=1515)

- USEPA. (2012). *Landfill methane outreach program [Programa de extensión de metano en vertederos]*. Recuperado de <https://www.epa.gov/lmop>
- Vanegas, C. (2010). *Estudio sobre criterios de rotura mediante método tenso deformacionales y métodos de equilibrio límite para un macizo rocoso con aplicación al talud izquierdo del cuenco disipador del proyecto hidroeléctrico Mazar* (tesis de maestría). Universidad de Cuenca.
- Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes [Tipos y procesos de movimiento de pendientes]. En R. L. Schuster y R. J. Krizek (Eds.), *Landslides - Analysis and Control* (Transporta, pp. 11-33). National Academy of Sciences.
- Worrell, W., y Vesilind, A. (2012). *Solid waste engineering [Ingeniería de residuos sólidos]* (Second Edi). CENGAGE Learning. Recuperado de [https://books.google.com.ec/books?id=DOmQ2hAx-ooC&printsec=frontcover&dq=william+worrell&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiMwOSsonMAhVFdR4KHcvaBkEQ6AEIGzAA#v=onepage&q=william worrell&f=false](https://books.google.com.ec/books?id=DOmQ2hAx-ooC&printsec=frontcover&dq=william+worrell&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiMwOSsonMAhVFdR4KHcvaBkEQ6AEIGzAA#v=onepage&q=william%20worrell&f=false)
- Yepes, J. A. (2015). *Ajuste de un modelo para estimar asentamientos en el relleno sanitario La Pradera* (tesis de maestría) [Universidad Nacional de Colombia]. Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co/>
- Yepes, J. A., y Villarraga, M. R. (2018). Análisis de los asentamientos en los rellenos sanitarios La Pradera y Curva de Rodas. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 43, 24-33. <https://doi.org/10.15446/rbct.n43.61433>
- Zekkos, D. (2008). Geotechnical characterization, field measurement, and laboratory testing of municipal solid waste [Caracterización geotécnica, medición de campo y pruebas de laboratorio de residuos sólidos urbanos]. *2008 International Symposium on Waste Mechanics*, 237. Recuperado de <http://www.pubs.asce.org/>

## **ANEXOS**

**Anexo 1.** Ensayos de laboratorio del suelo de cobertura M1.

**LABORATORIO DE SUELOS**  
 ING. CRISTINA VINTIMILLA MSC.

Dirección: General Torres 18-40 Y Eugenio Espejo  
 Teléfonos: 4058706 / 2824513 / Cel.: 0984746016  
 email.: laboratoriosueloscris@hotmail.com. / cuenca - Ecuador

<b>PROYECTO:</b> Calculos de asentamientos para el Relleno de Pichacay de la Ciudad de Cuenca					
<b>UBICACIÓN:</b> Pichacay					
<b>PERFORACIÓN:</b> M1					
<b>FECHA:</b> 15/2/2021			<b>No. Muestra:</b> M1		
<b>CORTE DIRECTO MUESTRA REMOLDEADA</b>					ASTM D-3080
<b>Características de la muestra:</b>					
Diametro (cm):	6.16	Humedad (%):	19.27%		
Altura (cm):	2.01	Peso (gr):	101.83		
Area (cm <sup>2</sup> ):	29.79	Densidad húmeda (kg/m <sup>3</sup> ):	1701		
Volumen (cm <sup>3</sup> ):	59.88	Densidad seca (kg/m <sup>3</sup> ):	1426		
<b>Aplicaciones de carga</b>					
Velocidad de carga de máquina (mm/min) =		0.65			
Carga normal (kgf) =		12.75			
Esfuerzo Normal $\sigma$ (kg/cm <sup>2</sup> ) =		0.43			
Esfuerzo Cortante $\tau$ (kg/cm <sup>2</sup> ) =		0.23			
LECTURA SEGUNDOS	LECTURA DIAL DE CARGA		ESFUERZO CORTANTE	DEFORMACIÓN	DEFORMACIÓN UNITARIA
seg	N	(kg)	(kg/cm <sup>2</sup> )	(mm)	%
0.00	0	0.000	0.00	0.00	0.00
15.00	21	2.142	0.07	0.11	0.18
15.00	29	2.958	0.10	0.29	0.47
15.00	35	3.570	0.12	0.45	0.73
15.00	42	4.284	0.14	0.60	0.97
15.00	47	4.794	0.16	0.76	1.23
15.00	51	5.202	0.17	0.90	1.46
15.00	55	5.610	0.19	1.02	1.66
15.00	58	5.916	0.20	1.19	1.93
15.00	60	6.120	0.21	1.36	2.21
15.00	61	6.222	0.21	1.47	2.39
30.00	63	6.426	0.22	1.78	2.89
30.00	64	6.528	0.22	2.09	3.39
30.00	65	6.630	0.22	2.43	3.94
30.00	66	6.732	0.23	2.76	4.48
60.00	66	6.732	0.23	3.36	5.45
60.00		0.000	0.00		0.00
60.00		0.000	0.00		0.00
60.00		0.000	0.00		0.00
90.00		0.000	0.00		0.00
90.00		0.000	0.00		0.00
90.00		0.000	0.00		0.00
90.00		0.000	0.00		0.00



**LABORATORIO DE SUELOS**

ING. CRISTINA VINTIMILLA MSC.

Dirección: General Torres 18-40 Y Eugenio Espejo

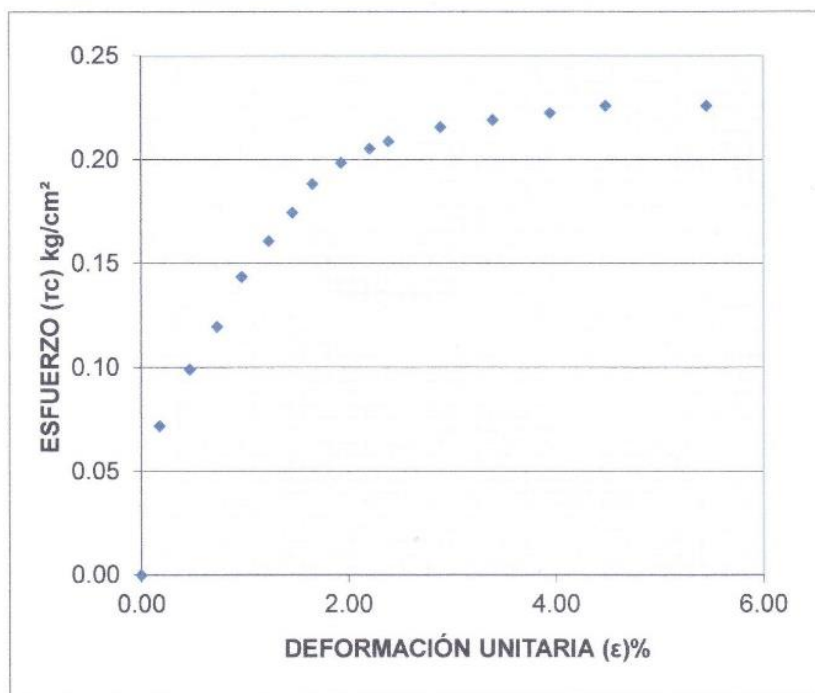
Teléfonos: 4058706 / 2824513 / Cel.: 0984746016

email.: laboratoriosueloscris@hotmail.com. / cuenca - Ecuador



PROYECTO:	Calculos de asentamientos para el Relleno de Pichacay de la Ciudad de Cuenca		
UBICACIÓN:	Pichacay		
PERFORACIÓN:	M1	PROFUNDIDAD:	0/1/1900
FECHA:	15/2/2021	No. Muestra:	M1
<b>CORTE DIRECTO MUESTRA REMOLDEADA</b>			ASTM D-3080

**Gráfico esfuerzo cortante ( $\tau_c$ ) vs. deformación**



Especimen #: 1		
Esfuerzo Cortante		
$\tau$ max=	0.23	kg/cm <sup>2</sup>
Esfuerzo Normal		
$\sigma$ =	0.43	kg/cm <sup>2</sup>





**LABORATORIO DE SUELOS**

ING. CRISTINA VINTIMILLA MSC.

Dirección: General Torres 18-40 Y Eugenio Espejo

Teléfonos: 4058706 / 2824513 / Cel.: 0984746016

email.: laboratoriosueloscris@hotmail.com. / cuenca - Ecuador



<b>PROYECTO:</b>	Calculos de asentamientos para el Relleno de Pichacay de la Ciudad de Cuenca								
<b>UBICACIÓN:</b>	Pichacay								
<b>PERFORACIÓN:</b>	M1								
<b>FECHA DE ENSAYO:</b>	15/2/2021								
<b>CORTE DIRECTO MUESTRA REMOLDEADA</b>									
ASTM D-3080									
<b>Características del espécimen:</b>									
Espécimen	Altura	Diametro A	Diametro B	Area	Volumen	W molde	W molde + muestra	W húmedo muestra	ph
#	(cm)	(cm)	(cm)	(cm <sup>2</sup> )	(cm <sup>3</sup> )	(gr)	(gr)	(gr)	(kg/m3)
1	2.01	6.16	6.16	29.79	59.88	41.62	143.45	101.83	1700.58
2	2.01	6.16	6.16	29.79	59.88	40.74	142.58	101.84	1700.75
3	2.01	6.16	6.16	29.79	59.88	42.96	144.76	101.80	1700.08
<b>Contenido de humedad:</b>									
Espécimen	# tarro	W tarro	W tarro+muestra	W seco	Humedad ω (%)	Promedio parcial ω (%)			
1	3	17.23	33.26	30.67	19.27%	19.27%			
2	6	16.81	33.29	30.64	19.16%	19.16%			
3	9	16.70	34.32	31.46	19.38%	19.38%			
<b>Resumen de Datos</b>									
Humedad Promedio Total:					19.27	%			
Densidad Húmeda Prom. Total:					1700	(kg/m <sup>3</sup> )			



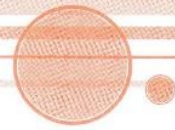
**LABORATORIO DE SUELOS**

ING. CRISTINA VINTIMILLA MSC.

Dirección: General Torres 18-40 Y Eugenio Espejo

Teléfonos: 4058706 / 2824513 / Cel.: 0984746016

email.: laboratoriosueloscris@hotmail.com. / cuenca - Ecuador



<b>PROYECTO:</b> Calculos de asentamientos para el Relleno de Pichacay de la Ciudad de Cuenca					
<b>UBICACIÓN:</b> Pichacay					
<b>PERFORACIÓN:</b> M1					
<b>FECHA:</b> 15/2/2021			<b>No. Muestra:</b> M2		
<b>CORTE DIRECTO MUESTRA REMOLDEADA</b>					ASTM D-3080
<b>Características de la muestra:</b>					
Diametro (cm):	6.16	Humedad (%):	19.16%		
Altura (cm):	2.01	Peso (gr):	101.84		
Area (cm <sup>2</sup> ):	29.79	Densidad húmeda (kg/m3)	1700.75		
Volumen (cm <sup>3</sup> ):	59.88	Densidad seca (kg/m3)	1427.27		
<b>Aplicaciones de carga</b>					
Velocidad de carga de máquina (mm/min) =		0.65			
Carga normal (kgf) =		25.5			
Esfuerzo Normal $\sigma$ (kg/cm2) =		0.86			
Esfuerzo Cortante $\tau$ (kg/cm2) =		0.33			
LECTURA SEGUNDOS	LECTURA DIAL DE CARGA		ESFUERZO CORTANTE	DEFORMACIÓN	DEFORMACIÓN UNITARIA
seg	N	(kg)	(kg/cm2)	(mm)	%
0.00	0	0.000	0.00	0.00	0.00
15.00	35	3.570	0.12	0.11	0.18
15.00	46	4.692	0.16	0.30	0.49
15.00	53	5.406	0.18	0.47	0.76
15.00	66	6.732	0.23	0.62	1.01
15.00	73	7.446	0.25	0.75	1.22
15.00	77	7.854	0.26	0.90	1.46
15.00	84	8.568	0.29	1.03	1.67
15.00	88	8.976	0.30	1.19	1.93
15.00	91	9.282	0.31	1.37	2.22
15.00	93	9.486	0.32	1.48	2.40
30.00	95	9.690	0.33	1.77	2.87
30.00	96	9.792	0.33	2.04	3.31
30.00	97	9.894	0.33	2.46	3.99
30.00	97	9.894	0.33	3.32	5.39
60.00		0.000	0.00		0.00
60.00		0.000	0.00		0.00
60.00		0.000	0.00		0.00
60.00		0.000	0.00		0.00
90.00		0.000	0.00		0.00
90.00		0.000	0.00		0.00
90.00		0.000	0.00		0.00
90.00					
90.00					



**LABORATORIO DE SUELOS**

ING. CRISTINA VINTIMILLA MSC.

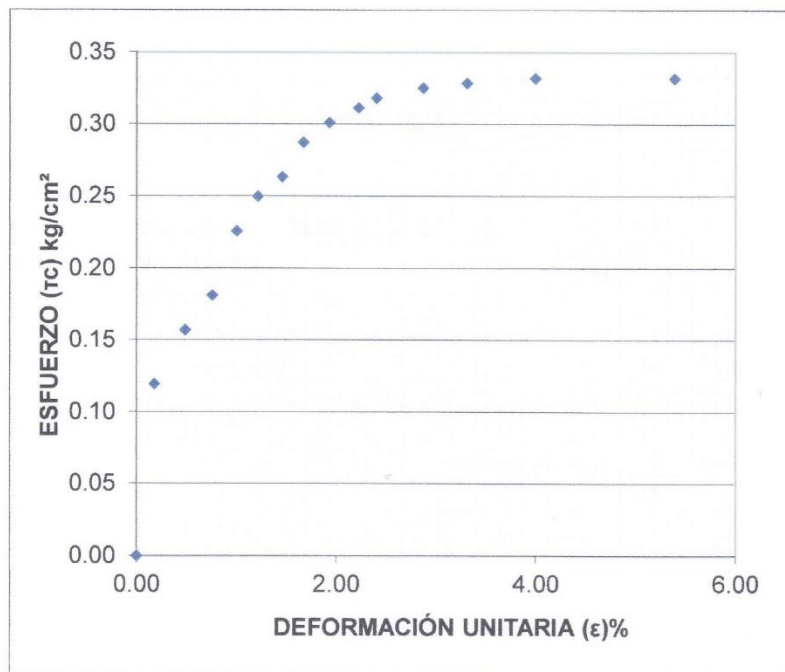
Dirección: General Torres 18-40 Y Eugenio Espejo

Teléfonos: 4058706 / 2824513 / Cel.: 0984746016

email.: laboratoriosueloscris@hotmail.com. / cuenca - Ecuador

PROYECTO:	Calculos de asentamientos para el Relleno de Pichacay de la Ciudad de Cuenca		
UBICACIÓN:	Pichacay		
PERFORACIÓN:	M1	No. Muestra:	M2
FECHA:	15/2/2021		
<b>CORTE DIRECTO MUESTRA REMOLDEADA</b>		ASTM D-3080	

Gráfico esfuerzo cortante ( $\tau_c$ ) vs. deformación



Especimen #: 2		
Esfuerzo Cortante		
$\tau$ max=	0.33	kg/cm <sup>2</sup>
Esfuerzo Normal		
$\sigma$ =	0.86	kg/cm <sup>2</sup>





**LABORATORIO DE SUELOS**

ING. CRISTINA VINTIMILLA MSC.

Dirección: General Torres 18-40 Y Eugenio Espejo

Teléfonos: 4058706 / 2824513 / Cel.: 0984746016

email.: laboratoriosueloscris@hotmail.com. / cuenca - Ecuador

<b>PROYECTO:</b>		Calculos de asentamientos para el Relleno de Pichacay de la Ciudad de Cuenca			
<b>UBICACIÓN:</b>		Pichacay			
<b>PERFORACIÓN:</b>		M1			
<b>FECHA:</b>		15/2/2021		<b>No. Muestra:</b> M3	
<b>CORTE DIRECTO MUESTRA REMOLDEADA</b>					ASTM D-3080
<b>Características de la muestra:</b>					
Diametro (cm):	6.16	Humedad (%):	19.38%		
Altura (cm):	2.01	Peso (gr):	101.84		
Area (cm <sup>2</sup> ):	29.79	Densidad húmeda (kg/m3)	1700.08		
Volumen (cm <sup>3</sup> ):	59.88	Densidad seca (kg/m3)	1424.13		
<b>Aplicaciones de carga</b>					
Velocidad de carga de máquina (mm/min) =		0.65			
Carga normal (kgf) =		51			
Esfuerzo Normal $\sigma$ (kg/cm <sup>2</sup> ) =		1.71			
Esfuerzo Cortante $\tau$ (kg/cm <sup>2</sup> ) =		0.57			
LECTURA SEGUNDOS	LECTURA DIAL DE CARGA		ESFUERZO CORTANTE	DEFORMACIÓN	DEFORMACIÓN UNITARIA
seg	N	(kg)	(kg/cm <sup>2</sup> )	(mm)	%
0.00	0	0.000	0.00	0.00	0.00
15.00	51	5.202	0.17	0.12	0.19
15.00	67	6.834	0.23	0.30	0.49
15.00	81	8.262	0.28	0.46	0.75
15.00	96	9.792	0.33	0.61	0.99
15.00	106	10.812	0.36	0.77	1.25
15.00	112	11.424	0.38	0.90	1.46
15.00	118	12.036	0.40	1.02	1.66
15.00	126	12.852	0.43	1.19	1.93
15.00	135	13.770	0.46	1.36	2.21
15.00	146	14.892	0.50	1.48	2.40
30.00	151	15.402	0.52	1.77	2.87
30.00	156	15.912	0.53	2.05	3.33
30.00	160	16.320	0.55	2.46	3.99
30.00	163	16.626	0.56	2.75	4.46
60.00	165	16.830	0.56	3.32	5.39
60.00	166	16.932	0.57	3.97	6.44
60.00		0.000	0.00		0.00
60.00		0.000	0.00		0.00
90.00		0.000	0.00		0.00
90.00		0.000	0.00		0.00
90.00		0.000	0.00		0.00
90.00		0.000	0.00		0.00
90.00		0.000	0.00		0.00
90.00		0.000	0.00		0.00





**LABORATORIO DE SUELOS**

ING. CRISTINA VINTIMILLA MSC.

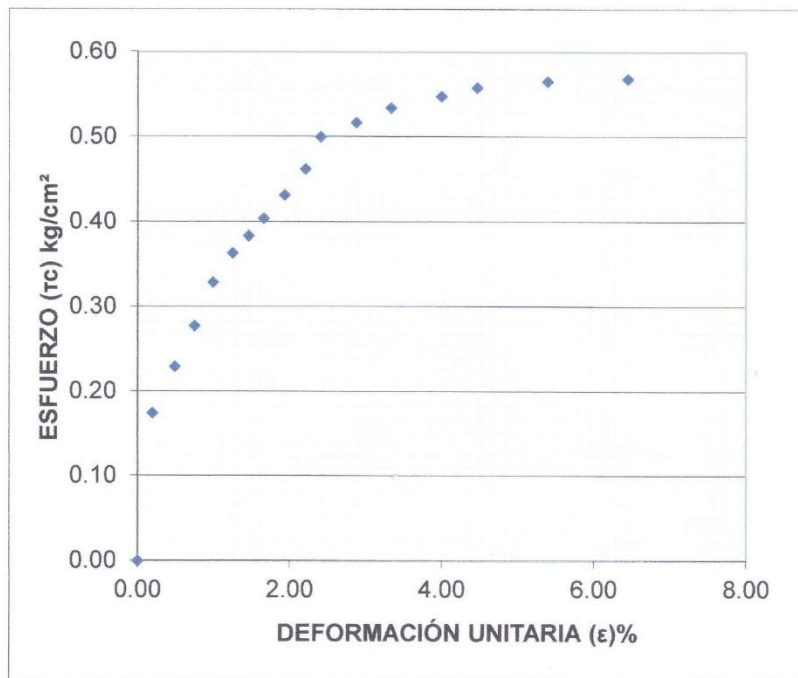
Dirección: General Torres 18-40 Y Eugenio Espejo

Teléfonos: 4058706 / 2824513 / Cel.: 0984746016

email.: laboratoriosueloscris@hotmail.com. / cuenca - Ecuador

PROYECTO:	Calculos de asentamientos para el Relleno de Pichacay de la Ciudad de Cuenca		
UBICACIÓN:	Pichacay		
PERFORACIÓN:	M1	No. Muestra:	M3
FECHA:	15/2/2021		
<b>CORTE DIRECTO MUESTRA REMOLDEADA</b>			ASTM D-3086

**Gráfico esfuerzo cortante ( $\tau_c$ ) vs. deformación**



Especimen #: 3		
Esfuerzo Cortante		
$\tau$ max=	0.57	kg/cm <sup>2</sup>
Esfuerzo Normal		
$\sigma$ =	1.71	kg/cm <sup>2</sup>



**LABORATORIO DE SUELOS**

ING. CRISTINA VINTIMILLA MSC.

Dirección: General Torres 18-40 Y Eugenio Espejo

Teléfonos: 4058706 / 2824513 / Cel.: 0984746016

email.: laboratoriosueloscris@hotmail.com. / cuenca - Ecuador

**PROYECTO:** Calculos de asentamientos para el Relleno de Pichacay de la Ciudad de Cuenca

**UBICACIÓN:** Pichacay

**PERFORACIÓN:** M1

**FECHA:** 15/2/2021

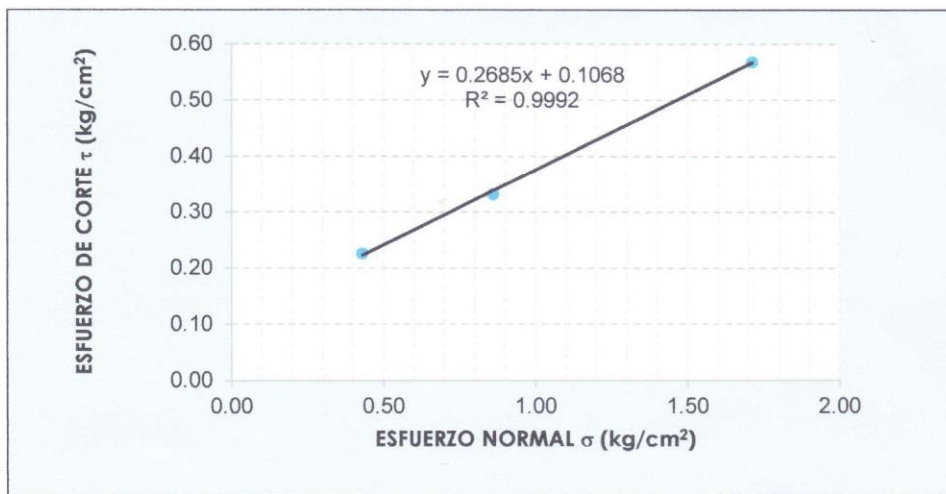
---

**CORTE DIRECTO MUESTRA REMOLDEADA**

ASTM D-3080

**GRÁFICO DE LA ENVOLVENTE DE FALLA: MUESTRAS REMOLDEADAS**

DATOS				
Especimen	Esfuerzo Normal $\sigma$ kg/cm <sup>2</sup>	Esfuerzo de Corte $\tau$ kg/cm <sup>2</sup>	$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \phi$	
			C kg/cm <sup>2</sup>	$\phi$ (°)
1	0.43	0.23	0.11	15
2	0.86	0.33		
3	1.71	0.57		



RESULTADOS			ENVOLVENTE DE FALLA
C=	0.11	kg/cm <sup>2</sup>	
$\phi$ =	15	°	

  
**ING. CRISTINA VINTIMILLA**  
 SENESCYT 1007-05-605320



**Anexo 2.** Ensayos de laboratorio del suelo de cobertura M2.

**LABORATORIO DE SUELOS**

ING. CRISTINA VINTIMILLA MSC.

Dirección: General Torres 18-40 Y Eugenio Espejo

Teléfonos: 4058706 / 2824513 / Cel.: 0984746016

email.: laboratoriosueloscris@hotmail.com. / cuenca - Ecuador

<b>PROYECTO:</b>		Calculos de asentamientos para el Relleno de Pichacay de la Ciudad de Cuenca			
<b>UBICACIÓN:</b>		Pichacay			
<b>PERFORACIÓN:</b>		M2			
<b>FECHA:</b>		15/2/2021		<b>No. Muestra:</b>	Muestra 1
<b>CORTE DIRECTO MUESTRA REMOLDEADA</b>					ASTM D-3080
<b>Características de la muestra:</b>					
Diametro (cm):	6.16	Humedad (%):	19.10%		
Altura (cm):	2.01	Peso (gr):	102.00		
Area (cm <sup>2</sup> ):	29.79	Densidad húmeda (kg/m3)	1703		
Volumen (cm <sup>3</sup> ):	59.88	Densidad seca (kg/m3)	1430		
<b>Aplicaciones de carga</b>					
Velocidad de carga de máquima (mm/min) =		0.65			
Carga normal (kgf) =		12.75			
Esfuerzo Normal $\sigma$ (kg/cm2) =		0.43			
Esfuerzo Cortante $\tau$ (kg/cm2) =		0.22			
LECTURA SEGUNDOS	LECURA DIAL DE CARGA		ESFUERZO CORTANTE	DEFORMACIÓN	DEFORMACIÓN UNITARIA
seg	N	(kg)	(kg/cm2)	(mm)	%
0.00	0	0.000	0.00	0.00	0.00
15.00	19	1.938	0.07	0.12	0.19
15.00	24	2.448	0.08	0.30	0.49
15.00	29	2.958	0.10	0.46	0.75
15.00	35	3.570	0.12	0.61	0.99
15.00	39	3.978	0.13	0.77	1.25
15.00	42	4.284	0.14	0.91	1.48
15.00	46	4.692	0.16	1.02	1.66
15.00	50	5.100	0.17	1.18	1.92
15.00	53	5.406	0.18	1.35	2.19
15.00	55	5.610	0.19	1.46	2.37
30.00	57	5.814	0.20	1.75	2.84
30.00	59	6.018	0.20	2.05	3.33
30.00	60	6.120	0.21	2.44	3.96
30.00	61	6.222	0.21	2.74	4.45
60.00	62	6.324	0.21	3.37	5.47
60.00	63	6.426	0.22	3.98	6.46
60.00	63	6.426	0.22	4.52	7.34
60.00	60	6.120	0.21	5.06	8.21
90.00	58	5.916	0.20	5.56	9.03
90.00		0.000	0.00		0.00
90.00		0.000	0.00		0.00
90.00		0.000	0.00		0.00





**LABORATORIO DE SUELOS**

ING. CRISTINA VINTIMILLA MSC.

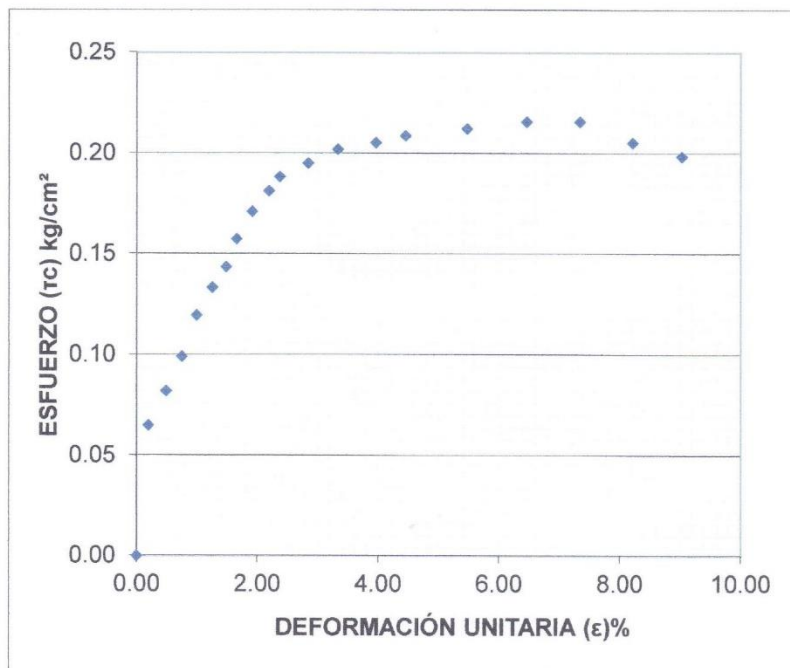
Dirección: General Torres 18-40 Y Eugenio Espejo

Teléfonos: 4058706 / 2824513 / Cel.: 0984746016

email.: laboratoriosueloscris@hotmail.com. / cuenca - Ecuador

PROYECTO:	Calculos de asentamientos para el Relleno de Pichacay de la Ciudad de Cuenca		
UBICACIÓN:	Pichacay		
PERFORACIÓN:	M2		
FECHA:	15/2/2021	No. Muestra:	Muestra 1
<b>CORTE DIRECTO MUESTRA REMOLDEADA</b>			ASTM D-3080

**Gráfico esfuerzo cortante ( $\tau_c$ ) vs. deformación**



Especimen #: 1		
Esfuerzo Cortante		
$\tau_{max} =$	0.22	kg/cm <sup>2</sup>
Esfuerzo Normal		
$\sigma =$	0.43	kg/cm <sup>2</sup>



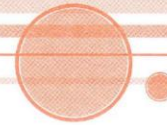
**LABORATORIO DE SUELOS**

ING. CRISTINA VINTIMILLA MSC.

Dirección: General Torres 18-40 Y Eugenio Espejo

Teléfonos: 4058706 / 2824513 / Cel.: 0984746016

email.: laboratoriosueloscris@hotmail.com. / cuenca - Ecuador



<b>PROYECTO:</b>	Calculos de asentamientos para el Relleno de Pichacay de la Ciudad de Cuenca								
<b>UBICACIÓN:</b>	Pichacay								
<b>PERFORACIÓN:</b>	M2								
<b>FECHA DE ENSAYO:</b>	15/2/2021								
<b>CORTE DIRECTO MUESTRA REMOLDEADA</b>									
ASTM D-3080									
<b>Características del espécimen:</b>									
Especimen	Altura	Diámetro A	Diámetro B	Area	Volumen	W molde	W molde + muestra	W húmedo muestra	ph
#	(cm)	(cm)	(cm)	(cm <sup>2</sup> )	(cm <sup>3</sup> )	(gr)	(gr)	(gr)	(kg/m <sup>3</sup> )
1	2.01	6.16	6.16	29.79	59.88	41.62	143.62	102.00	1703.42
2	2.01	6.16	6.16	29.79	59.88	40.74	142.75	102.01	1703.59
3	2.01	6.16	6.16	29.79	59.88	42.96	144.86	101.90	1701.75
<b>Contenido de humedad:</b>									
Especimen	# tarro	W tarro	W tarro+muestra	W seco	Humedad ω (%)	Promedio parcial ω (%)			
1	2	16.75	35.64	32.61	19.10%	19.10%			
2	4	17.09	35.79	32.78	19.18%	19.18%			
3	10	16.63	35.54	32.46	19.46%	19.46%			
<b>Resumen de Datos</b>									
Humedad Promedio Total:					19.25	%			
Densidad Húmeda Prom. Total:					1703	(kg/m <sup>3</sup> )			



**LABORATORIO DE SUELOS**

ING. CRISTINA VINTIMILLA MSC.

Dirección: General Torres 18-40 Y Eugenio Espejo

Teléfonos: 4058706 / 2824513 / Cel.: 0984746016

email.: laboratoriosueloscris@hotmail.com. / cuenca - Ecuador

<b>PROYECTO:</b> Cálculos de asentamientos para el Relleno de Pichacay de la Ciudad de Cuenca					
<b>UBICACIÓN:</b> Pichacay					
<b>PERFORACIÓN:</b> M2					
<b>FECHA:</b> 15/2/2021		<b>No. Muestra:</b> Muestra 2			
<b>CORTE DIRECTO MUESTRA REMOLDEADA</b>					ASTM D-3080
<b>Características de la muestra:</b>					
Diametro (cm):	6.16	Humedad (%):	19.18%		
Altura (cm):	2.01	Peso (gr):	102.01		
Area (cm <sup>2</sup> ):	29.79	Densidad húmeda (kg/m3)	1703.59		
Volumen (cm <sup>3</sup> ):	59.88	Densidad seca (kg/m3)	1429.38		
<b>Aplicaciones de carga</b>					
Velocidad de carga de máquima (mm/min) =		0.65			
Carga normal (kgf) =		25.5			
Esfuerzo Normal $\sigma$ (kg/cm2) =		0.86			
Esfuerzo Cortante $\tau$ (kg/cm2) =		0.30			
LECTURA SEGUNDOS	LECURA DIAL DE CARGA		ESFUERZO CORTANTE	DEFORMACIÓN	DEFORMACIÓN UNITARIA
seg	N	(kg)	(kg/cm2)	(mm)	%
0.00	0	0.000	0.00	0.00	0.00
15.00	28	2.856	0.10	0.12	0.19
15.00	34	3.468	0.12	0.29	0.47
15.00	46	4.692	0.16	0.46	0.75
15.00	52	5.304	0.18	0.61	0.99
15.00	60	6.120	0.21	0.75	1.22
15.00	65	6.630	0.22	0.91	1.48
15.00	69	7.038	0.24	1.05	1.70
15.00	73	7.446	0.25	1.21	1.96
15.00	76	7.752	0.26	1.35	2.19
15.00	79	8.058	0.27	1.46	2.37
30.00	82	8.364	0.28	1.75	2.84
30.00	84	8.568	0.29	2.06	3.34
30.00	86	8.772	0.29	2.47	4.01
30.00	89	9.078	0.30	3.31	5.37
60.00	89	9.078	0.30	3.98	6.46
60.00	76	7.752	0.26	4.58	7.44
60.00	74	7.548	0.25	5.12	8.31
60.00		0.000	0.00		0.00
90.00		0.000	0.00		0.00
90.00		0.000	0.00		0.00
90.00		0.000	0.00		0.00
90.00					
90.00					





**LABORATORIO DE SUELOS**

ING. CRISTINA VINTIMILLA MSC.

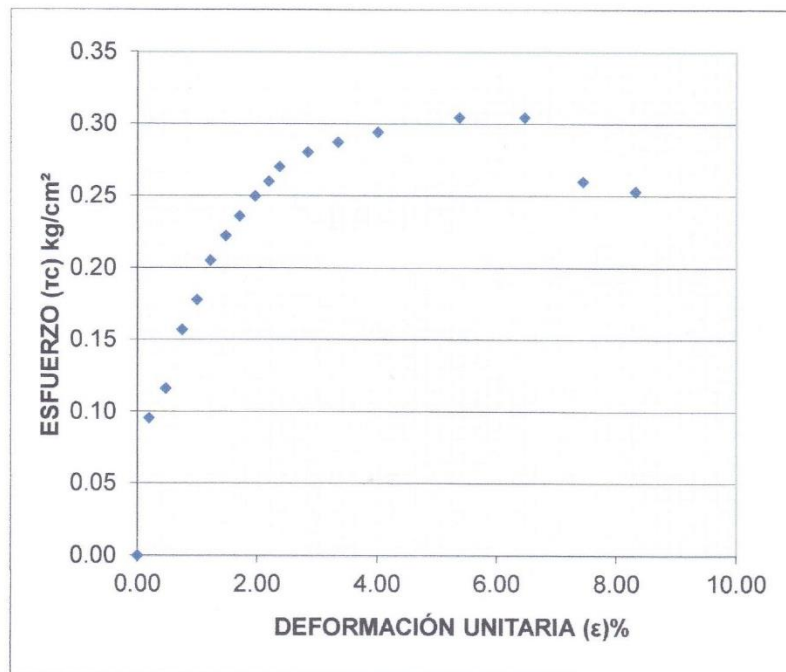
Dirección: General Torres 18-40 Y Eugenio Espejo

Teléfonos: 4058706 / 2824513 / Cel.: 0984746016

email.: laboratoriosueloscris@hotmail.com. / cuenca - Ecuador

PROYECTO:	Calculos de asentamientos para el Relleno de Pichacay de la Ciudad de Cuenca		
UBICACIÓN:	Pichacay		
PERFORACIÓN:	M2	No. Muestra:	Muestra 2
FECHA:	15/2/2021		
<b>CORTE DIRECTO MUESTRA REMOLDEADA</b>		ASTM D-3080	

**Gráfico esfuerzo cortante ( $\tau_c$ ) vs. deformación**



Especimen #: 2		
Esfuerzo Cortante		
$\tau$ max=	0.30	kg/cm <sup>2</sup>
Esfuerzo Normal		
$\sigma$ =	0.86	kg/cm <sup>2</sup>





**LABORATORIO DE SUELOS**

ING. CRISTINA VINTIMILLA MSC.

Dirección: General Torres 18-40 Y Eugenio Espejo

Teléfonos: 4058706 / 2824513 / Cel.: 0984746016

email.: laboratoriosueloscris@hotmail.com. / cuenca - Ecuador

<b>PROYECTO:</b> Calculos de asentamientos para el Relleno de Pichacay de la Ciudad de Cuenca					
<b>UBICACIÓN:</b> Pichacay					
<b>PERFORACIÓN:</b> M2					
<b>FECHA:</b> 15/2/2021			<b>No. Muestra:</b> Muestra 3		
<b>CORTE DIRECTO MUESTRA REMOLDEADA</b>					ASTM D-3080
<b>Características de la muestra:</b>					
Diametro (cm):	6.16	Humedad (%):	19.46%		
Altura (cm):	2.01	Peso (gr):	102.01		
Area (cm <sup>2</sup> ):	29.79	Densidad húmeda (kg/m <sup>3</sup> ):	1701.75		
Volumen (cm <sup>3</sup> ):	59.88	Densidad seca (kg/m <sup>3</sup> ):	1424.58		
<b>Aplicaciones de carga</b>					
Velocidad de carga de máquina (mm/min) =		0.65			
Carga normal (kgf) =		51			
Esfuerzo Normal $\sigma$ (kg/cm <sup>2</sup> ) =		1.71			
Esfuerzo Cortante $\tau$ (kg/cm <sup>2</sup> ) =		0.47			
LECTURA SEGUNDOS	LECTURA DIAL DE CARGA		ESFUERZO CORTANTE	DEFORMACIÓN	DEFORMACIÓN UNITARIA
seg	N	(kg)	(kg/cm <sup>2</sup> )	(mm)	%
0.00	0	0.000	0.00	0.00	0.00
15.00	42	4.284	0.14	0.11	0.18
15.00	58	5.916	0.20	0.29	0.47
15.00	72	7.344	0.25	0.45	0.73
15.00	89	9.078	0.30	0.60	0.97
15.00	102	10.404	0.35	0.76	1.23
15.00	118	12.036	0.40	0.91	1.48
15.00	122	12.444	0.42	1.03	1.67
15.00	125	12.750	0.43	1.18	1.92
15.00	129	13.158	0.44	1.37	2.22
15.00	132	13.464	0.45	1.49	2.42
30.00	134	13.668	0.46	1.81	2.94
30.00	136	13.872	0.47	2.09	3.39
30.00	138	14.076	0.47	2.46	3.99
30.00	138	14.076	0.47	2.77	4.50
60.00		0.000	0.00		0.00
60.00		0.000	0.00		0.00
60.00		0.000	0.00		0.00
60.00		0.000	0.00		0.00
90.00		0.000	0.00		0.00
90.00		0.000	0.00		0.00
90.00		0.000	0.00		0.00
90.00		0.000	0.00		0.00
90.00		0.000	0.00		0.00
90.00		0.000	0.00		0.00



**LABORATORIO DE SUELOS**

ING. CRISTINA VINTIMILLA MSC.

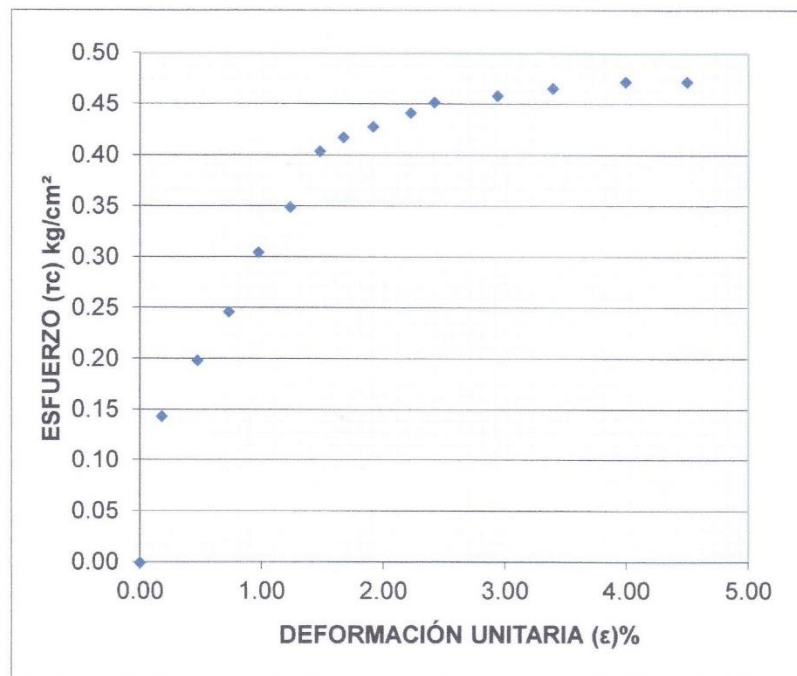
Dirección: General Torres 18-40 Y Eugenio Espejo

Teléfonos: 4058706 / 2824513 / Cel.: 0984746016

email.: laboratoriosueloscris@hotmail.com. / cuenca - Ecuador

<b>PROYECTO:</b>	Calculos de asentamientos para el Relleno de Pichacay de la Ciudad de Cuenca		
<b>UBICACIÓN:</b>	Pichacay		
<b>DESCRIPCION DEL SUELO:</b>	0		
<b>PERFORACIÓN:</b>	M2		
<b>FECHA:</b>	15/2/2021	<b>No. Muestra:</b>	Muestra 3
<b>CORTE DIRECTO MUESTRA REMOLDEADA</b>			ASTM D-3086

**Gráfico esfuerzo cortante ( $\tau_c$ ) vs. deformación**



<b>Espécimen #: 3</b>		
Esfuerzo Cortante		
$\tau$ max=	0.47	kg/cm <sup>2</sup>
Esfuerzo Normal		
$\sigma$ =	1.71	kg/cm <sup>2</sup>



**LABORATORIO DE SUELOS**

ING. CRISTINA VINTIMILLA MSC.

Dirección: General Torres 18-40 Y Eugenio Espejo

Teléfonos: 4058706 / 2824513 / Cel.: 0984746016

email.: laboratoriosueloscris@hotmail.com. / cuenca - Ecuador

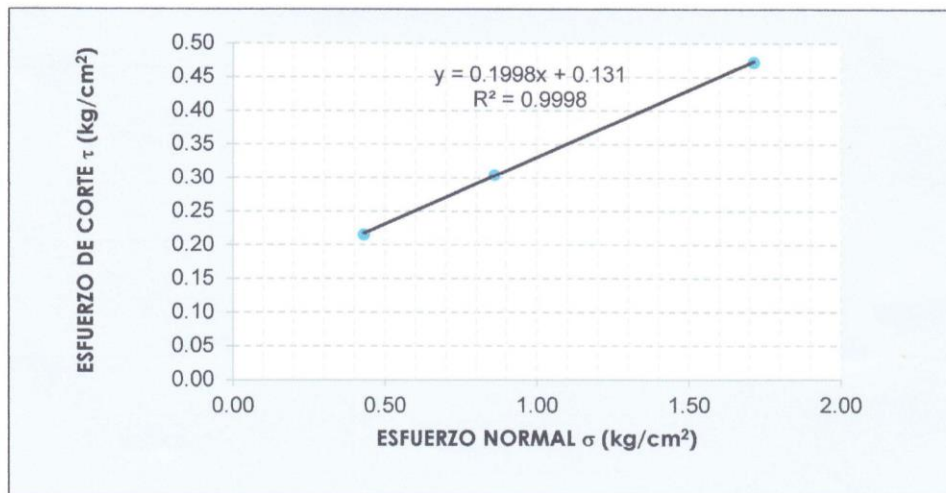
**PROYECTO:** Calculos de asentamientos para el Relleno de Pichacay de la Ciudad de Cuenca  
**UBICACIÓN:** Pichacay  
**PERFORACIÓN:** M2  
**FECHA:** 15/2/2021

**CORTE DIRECTO MUESTRA REMOLDEADA**

ASTM D-3080

**GRÁFICO DE LA ENVOLVENTE DE FALLA: MUESTRAS REMOLDEADAS**

Especimen	Esfuerzo Normal $\sigma$	Esfuerzo de Corte $\tau$	$\tau = c + \sigma \text{tg } \phi$	
			C	$\phi$
#	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	(°)
1	0.43	0.22	0.13	11
2	0.86	0.30		
3	1.71	0.47		



RESULTADOS			ENVOLVENTE DE FALLA
C=	0.13	kg/cm <sup>2</sup>	
$\phi$ =	11	°	

  
**ING. CRISTINA VINTIMILLA**  
 SENESCYT 1007-05-665320



**Anexo 3.** Volúmenes de corte y relleno de las topografías 2018-2019.

<b>Abscisa</b>	<b>Área Corte (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Volumen Corte (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Área Relleno (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Volumen Relleno (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Vol. Acum. Corte (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Vol. Acum. Relleno (m<sup>3</sup>)</b>
0+000.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0+010.000	0.00	0.00	77.88	259.58	0.00	259.58
0+020.000	0.00	0.00	117.28	969.06	0.00	1228.65
0+030.000	0.00	0.00	147.57	1321.36	0.00	2550.00
0+040.000	0.00	0.00	170.81	1590.50	0.00	4140.50
0+050.000	0.00	0.00	206.07	1881.64	0.00	6022.14
0+060.000	0.00	0.00	254.41	2298.17	0.00	8320.31
0+070.000	0.00	0.00	448.77	3470.25	0.00	11790.56
0+080.000	0.00	0.00	526.38	4870.60	0.00	16661.16
0+090.000	0.00	0.00	490.37	5082.68	0.00	21743.83
0+100.000	0.00	0.00	519.02	5046.24	0.00	26790.08
0+110.000	0.00	0.00	489.17	5040.17	0.00	31830.25
0+120.000	0.20	0.68	466.26	4776.65	0.68	36606.90
0+130.000	2.49	11.36	479.26	4727.41	12.04	41334.31
0+140.000	1.57	20.13	592.83	5350.37	32.16	46684.68
0+150.000	21.22	95.19	875.93	7297.90	127.36	53982.57
0+160.000	17.73	194.52	1077.43	9749.44	321.87	63732.01
0+170.000	27.62	224.96	1121.03	10991.58	546.83	74723.60
0+180.000	62.73	439.91	1222.17	11712.37	986.74	86435.96
0+190.000	69.61	661.40	1389.48	13049.33	1648.14	99485.29
0+200.000	11.85	367.31	1652.87	15192.74	2015.45	114678.03

0+210.000	15.48	136.28	1603.43	16280.88	2151.73	130958.91
0+220.000	29.92	223.08	1315.08	14568.72	2374.82	145527.63
0+230.000	81.27	535.03	1213.86	12641.28	2909.84	158168.91
0+240.000	372.36	2091.97	1085.09	11488.71	5001.81	169657.62
0+250.000	555.59	4609.28	919.51	10011.60	9611.10	179669.22
0+260.000	941.72	7402.15	532.48	7172.42	17013.24	186841.64
0+270.000	843.43	8921.24	269.27	3934.69	25934.49	190776.33
0+280.000	390.54	6026.34	328.02	2981.63	31960.83	193757.95
0+290.000	239.10	3117.38	51.02	1694.67	35078.21	195452.63
0+299.038	2.95	809.24	73.57	559.90	35887.45	196012.53

*Fuente: Elaboración Propia.*



**Anexo 4.** Volúmenes de corte y relleno de las topografías 2018-2020.

<b>Abscisa</b>	<b>Área Corte (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Volumen Corte (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Área Relleno (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Volumen Relleno (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Vol. Acum. Corte (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Vol. Acum. Relleno (m<sup>3</sup>)</b>
0+000.000	0.00	0.00	23.41	0.00	0.00	0.00
0+010.000	0.00	0.00	93.43	584.18	0.00	584.18
0+020.000	0.00	0.00	123.06	1082.44	0.00	1666.62
0+030.000	0.00	0.00	148.45	1357.54	0.00	3024.17
0+040.000	0.00	0.00	179.78	1641.16	0.00	4665.33
0+050.000	0.00	0.00	216.27	1980.27	0.00	6645.61
0+060.000	0.00	0.00	250.98	2336.27	0.00	8981.87
0+070.000	0.00	0.00	376.95	3139.64	0.00	12121.51
0+080.000	0.00	0.00	491.39	4341.70	0.00	16463.22
0+090.000	0.00	0.00	477.66	4845.28	0.00	21308.50
0+100.000	0.00	0.00	495.73	4866.96	0.00	26175.45
0+110.000	0.00	0.00	471.74	4837.35	0.00	31012.81
0+120.000	2.29	11.45	462.71	4672.25	11.45	35685.06
0+130.000	0.00	11.45	558.68	5106.92	22.90	40791.98
0+140.000	2.15	10.73	825.13	6919.03	33.63	47711.01
0+150.000	3.62	28.82	1256.39	10407.60	62.45	58118.61
0+160.000	17.49	105.57	1752.75	15045.69	168.01	73164.30
0+170.000	43.99	307.43	2006.97	18798.58	475.45	91962.88
0+180.000	68.39	561.91	2297.98	21524.75	1037.36	113487.63
0+190.000	73.44	709.15	2479.40	23886.92	1746.51	137374.55

0+200.000	21.85	476.45	2527.88	25036.44	2222.96	162410.99
0+210.000	22.72	222.87	2182.62	23552.51	2445.83	185963.50
0+220.000	58.07	403.96	1887.49	20350.54	2849.79	206314.04
0+230.000	198.82	1284.43	1770.28	18288.86	4134.22	224602.89
0+240.000	523.85	3613.35	1582.48	16763.81	7747.57	241366.70
0+250.000	913.62	7187.39	899.08	12407.82	14934.96	253774.52
0+260.000	1061.75	9876.89	370.22	6346.51	24811.85	260121.03
0+270.000	672.19	8669.72	310.44	3403.28	33481.57	263524.31
0+280.000	508.63	5904.13	149.06	2297.51	39385.70	265821.83
0+290.000	247.21	3779.25	33.08	910.70	43164.95	266732.53

*Fuente: Elaboración Propia.*

**Anexo 5.** Volúmenes de corte y relleno de las topografías 2019-2020.

<b>Abscisa</b>	<b>Área Corte (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Volumen Corte (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Área Relleno (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Volumen Relleno (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Vol. Acum. Corte (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Vol. Acum. Relleno (m<sup>3</sup>)</b>
0+000.000	2.82	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
0+010.000	5.07	39.47	0.08	0.48	39.47	0.48
0+020.000	6.27	56.71	0.19	1.35	96.18	1.83
0+030.000	6.32	62.96	0.25	2.19	159.14	4.02
0+040.000	9.44	78.84	0.66	4.52	237.98	8.54
0+050.000	14.48	119.60	0.38	5.20	357.58	13.74
0+060.000	15.58	150.30	0.85	6.19	507.88	19.93
0+070.000	33.42	245.00	0.99	9.24	752.88	29.17
0+080.000	39.18	362.98	0.44	7.18	1115.85	36.34
0+090.000	32.37	357.75	3.58	20.09	1473.60	56.43
0+100.000	32.23	323.01	7.37	54.75	1796.61	111.18
0+110.000	27.64	299.38	7.09	72.34	2095.99	183.52
0+120.000	26.51	270.77	24.34	157.19	2366.76	340.71
0+130.000	39.73	331.19	70.28	473.10	2697.95	813.81
0+140.000	66.14	529.33	155.72	1130.00	3227.28	1943.81
0+150.000	57.21	616.77	337.92	2468.22	3844.05	4412.03
0+160.000	69.31	632.62	656.25	4970.83	4476.68	9382.86
0+170.000	75.82	725.67	888.63	7724.40	5202.34	17107.26
0+180.000	83.34	795.80	1056.70	9726.66	5998.14	26833.92
0+190.000	91.85	875.94	1074.70	10656.97	6874.08	37490.89



0+200.000	99.67	957.63	919.49	9970.93	7831.71	47461.82
0+210.000	65.69	826.85	713.10	8162.96	8658.56	55624.79
0+220.000	42.87	542.83	671.06	6920.84	9201.39	62545.62
0+230.000	57.45	501.63	652.63	6618.48	9703.02	69164.10
0+240.000	125.97	917.14	654.79	6537.09	10620.17	75701.19
0+250.000	245.57	1857.73	356.10	5054.42	12477.89	80755.61
0+260.000	192.52	2190.44	31.40	1937.48	14668.33	82693.09
0+270.000	83.83	1381.74	69.65	505.24	16050.06	83198.33
0+280.000	155.71	1197.68	13.72	416.87	17247.75	83615.19
0+290.000	134.65	1451.78	4.55	91.38	18699.53	83706.57
0+293.678	90.91	414.85	4.13	15.97	19114.37	83722.55

*Fuente: Elaboración Propia.*

**Anexo 6.** Cálculo de alturas de columnas de residuos sólidos y asentamientos de los puntos de análisis topográficos.

ABS		COTA 2009				COTA 2018		COTA 2019		COTA 2020		AL
<b>0+000,00</b>	<b>-65</b>	<b>2652</b>	<b>2658.54</b>	<b>2663.45</b>	<b>2663.48</b>	<b>4.91</b>	<b>11.45</b>					
	-60	2652	2657	2663.3	2663.28	6.3	11.3	0.02	0.18%	0.32%	0.18	
	-55	2652	2655.71	2663	2662.84	7.29	11	0.16	1.45%	2.19%	1.45	
	-50	2652	2655.15	2662.25	2662.21	7.1	10.25	0.04	0.39%	0.56%	0.39	
	-45	2652	2653.76	2661.19	2660.98	7.43	9.19	0.21	2.29%	2.83%	2.29	
	-40	2651.1	2653.67	2660.04	2659.8	6.37	8.94	0.24	2.68%	3.77%	2.68	
	-35	2648.71	2649.84	2658.89	2658.77	9.05	10.18	0.12	1.18%	1.33%	1.18	
	-30	2646.25	2648.27	2658.42	2658.19	10.15	12.17	0.23	1.89%	2.27%	1.89	
	-25	2644.25	2646.16	2658.29	2657.91	12.13	14.04	0.38	2.71%	3.13%	2.71	
	-20	2643.26	2646.02	2658.07	2657.79	12.05	14.81	0.28	1.89%	2.32%	1.89	
	-15	2642.77	2646.54	2657.83	2657.67	11.29	15.06	0.16	1.06%	1.42%	1.06	
	-10	2642.36	2648.34	2657.55	2657.47	9.21	15.19	0.08	0.53%	0.87%	0.53	
	-5	2641.96	2650.6	2656.52	2656.52	5.92	14.56	0	0.00%	0.00%	0	
	0	2641.65	2652.82	2655.36	2655.26	2.54	13.71	0.1	0.73%	3.94%	0.73	
	5	2641.44	2652.25	2654.34	2654	2.09	12.9	0.34	2.64%	16.27%	2.64	
	10	2641.07	2651.56	2653.21	2653.13	1.65	12.14	0.08	0.66%	4.85%	0.66	
	15	2638.49	2650.83	2652.3	2652.11	1.47	13.81	0.19	1.38%	12.93%	1.38	
	20	2635.61	2650.16	2651.61	2651.44	1.45	16	0.17	1.06%	11.72%	1.06	
	25	2633.57	2650.07	2650.88	2650.75	0.81	17.31	0.13	0.75%	16.05%	0.75	
	30	2631.8	2649.67	2650.31	2650	0.64	18.51	0.31	1.67%	48.44%	1.67	
	35	2628.2	2649.29	2649.91	2649.56	0.62	21.71	0.35	1.61%	56.45%	1.61	
	40	2624.55	2648.77	2649.71	2649.27	0.94	25.16	0.44	1.75%	46.81%	1.75	
	45	2621.29	2648.46	2649.58	2649.14	1.12	28.29	0.44	1.56%	39.29%	1.56	

	50	2619.77	2648.03	2649.25	2648.84	1.22	29.48	0.41	1.39%	33.61%	1.39
	54.25	2619.55	2647.53	2648.4	2648.12	0.87	28.85	0.28	0.97%	32.18%	0.97
0+010,00	-65	2652	2659.53	2663.75	2663.7	4.22	11.75	0.05	0.43%	1.18%	0.43
	-60	2652	2658.05	2663.77	2663.77	5.72	11.77	0	0.00%	0.00%	0
	-55	2652	2656.63	2663.67	2663.59	7.04	11.67	0.08	0.69%	1.14%	0.69
	-50	2652	2655.44	2663.55	2663.52	8.11	11.55	0.03	0.26%	0.37%	0.26
	-45	2652	2654.76	2663.43	2663.31	8.67	11.43	0.12	1.05%	1.38%	1.05
	-40	2651.09	2653.06	2663.38	2663.05	10.32	12.29	0.33	2.69%	3.20%	2.69
	-35	2648.79	2650.84	2663.21	2662.77	12.37	14.42	0.44	3.05%	3.56%	3.05
	-30	2646.71	2648.64	2662.82	2662.55	14.18	16.11	0.27	1.68%	1.90%	1.68
	-25	2644.91	2646.58	2661.97	2661.69	15.39	17.06	0.28	1.64%	1.82%	1.64
	-20	2643.79	2646.71	2660.93	2660.59	14.22	17.14	0.34	1.98%	2.39%	1.98
	-15	2643.31	2646.97	2659.9	2659.6	12.93	16.59	0.3	1.81%	2.32%	1.81
	-10	2642.92	2649.13	2658.78	2658.55	9.65	15.86	0.23	1.45%	2.38%	1.45
	-5	2642.63	2654.42	2658.06	2658	3.64	15.43	0.06	0.39%	1.65%	0.39
	0	2642.48	2653.48	2657.89	2657.75	4.41	15.41	0.14	0.91%	3.17%	0.91
	5	2642.26	2654	2657.78	2657.5	3.78	15.52	0.28	1.80%	7.41%	1.80
	10	2639.81	2653.96	2657.54	2657.24	3.58	17.73	0.3	1.69%	8.38%	1.69
	15	2637.55	2653.64	2657.21	2657.01	3.57	19.66	0.2	1.02%	5.60%	1.02
	20	2635.55	2653.6	2657.02	2656.58	3.42	21.47	0.44	2.05%	12.87%	2.05
	25	2633.66	2653.77	2655.5	2655.08	1.73	21.84	0.42	1.92%	24.28%	1.92
	30	2632.14	2652.54	2653.73	2653.29	1.19	21.59	0.44	2.04%	36.97%	2.04
	35	2630.14	2649.98	2653.13	2652.67	3.15	22.99	0.46	2.00%	14.60%	2.00
	40	2626.06	2649	2652.29	2652.08	3.29	26.23	0.21	0.80%	6.38%	0.80
	45	2619.98	2649.25	2651.04	2650.82	1.79	31.06	0.22	0.71%	12.29%	0.71
	50	2622.66	2649.41	2650.26	2649.98	0.85	27.6	0.28	1.01%	32.94%	1.01

	54.25	2625.05	2649.41	2649.99	2649.75	0.58	24.94	0.24	0.96%	41.38%	0.96
0+020,00	-65	2652	2660.25	2664.26	2664.22	4.01	12.26	0.04	0.33%	1.00%	0.33
	-60	2652	2658.73	2664.13	2664.09	5.4	12.13	0.04	0.33%	0.74%	0.33
	-55	2652	2657.17	2664	2663.99	6.83	12	0.01	0.08%	0.15%	0.08
	-50	2652	2655.46	2664	2664	8.54	12	0	0.00%	0.00%	0
	-45	2652	2654.49	2664	2664.01	9.51	12				
	-40	2651.34	2653.33	2663.99	2664.08	10.66	12.65				
	-35	2649.38	2651.15	2663.98	2663.82	12.83	14.6	0.16	1.10%	1.25%	1.10
	-30	2647.46	2648.95	2664.23	2663.4	15.28	16.77	0.83	4.95%	5.43%	4.95
	-25	2645.6	2647.17	2663.88	2662.97	16.71	18.28	0.91	4.98%	5.45%	4.98
	-20	2643.92	2647.27	2663.46	2662.94	16.19	19.54	0.52	2.66%	3.21%	2.66
	-15	2643.51	2647.74	2663.1	2662.57	15.36	19.59	0.53	2.71%	3.45%	2.71
	-10	2643.32	2649.98	2662.97	2662.5	12.99	19.65	0.47	2.39%	3.62%	2.39
	-5	2643.11	2652.85	2662.85	2662.2	10	19.74	0.65	3.29%	6.50%	3.29
	0	2643.04	2654	2661.64	2661.42	7.64	18.6	0.22	1.18%	2.88%	1.18
	5	2642.39	2654.01	2660.71	2660.36	6.7	18.32	0.35	1.91%	5.22%	1.91
	10	2640.2	2654.08	2659.61	2659.3	5.53	19.41	0.31	1.60%	5.61%	1.60
	15	2638.96	2654.21	2658.62	2658.37	4.41	19.66	0.25	1.27%	5.67%	1.27
	20	2637.11	2654.11	2657.52	2657.04	3.41	20.41	0.48	2.35%	14.08%	2.35
	25	2634.51	2654.03	2655.16	2654.7	1.13	20.65	0.46	2.23%	40.71%	2.23
	30	2631.79	2654.01	2654.01	2653.74		22.22	0.27	1.22%		
	35	2629.85	2652.13	2654.31	2653.38	2.18	24.46	0.93	3.80%	42.66%	3.80
	40	2624.53	2650.65	2653.6	2653.1	2.95	29.07	0.5	1.72%	16.95%	1.72
	45	2621.05	2650.23	2653	2652.68	2.77	31.95	0.32	1.00%	11.55%	1.00
	50	2626.34	2650	2653	2652.5	3	26.66	0.5	1.88%	16.67%	1.88
	53	2628.09	2650	2653.02	2652.5	3.02	24.93	0.52	2.09%	17.22%	2.09

0+030,00	-65	2652	2660.44	2664.5	2664.51	4.06	12.5				
	-60	2652	2658.93	2664.5	2664.46	5.57	12.5	0.04	0.32%	0.72%	0.32
	-55	2652	2657.38	2664.42	2664.33	7.04	12.42	0.09	0.72%	1.28%	0.72
	-50	2652	2655.9	2664.34	2664.26	8.44	12.34	0.08	0.65%	0.95%	0.65
	-45	2652	2655.3	2664.35	2664.1	9.05	12.35	0.25	2.02%	2.76%	2.02
	-40	2651.85	2653.85	2664.47	2664.33	10.62	12.62	0.14	1.11%	1.32%	1.11
	-35	2649.72	2651.65	2664.49	2664.48	12.84	14.77	0.01	0.07%	0.08%	0.07
	-30	2647.67	2649.44	2664.43	2664.07	14.99	16.76	0.36	2.15%	2.40%	2.15
	-25	2645.67	2647.9	2663.99	2663.5	16.09	18.32	0.49	2.67%	3.05%	2.67
	-20	2644	2647.89	2663.68	2663.5	15.79	19.68	0.18	0.91%	1.14%	0.91
	-15	2643.75	2648.94	2663.51	2664.12	14.57	19.76				
	-10	2643.51	2651.7	2663.46	2663	11.76	19.95	0.46	2.31%	3.91%	2.31
	-5	2643.31	2654.42	2663.06	2662.62	8.64	19.75	0.44	2.23%	5.09%	2.23
	0	2643.08	2654.39	2663.51	2662.5	9.12	20.43				
	5	2642.39	2654.53	2663.54	2662.49	9.01	21.15				
	10	2642.01	2654.67	2662.75	2662.42	8.08	20.74	0.33	1.59%	4.08%	1.59
	15	2641	2654.54	2660.75	2660.08	6.21	19.75	0.67	3.39%	10.79%	3.39
	20	2637.63	2654.36	2657.51	2657.06	3.15	19.88	0.45	2.26%	14.29%	2.26
	25	2634.06	2654.18	2654.96	2654.58	0.78	20.9	0.38	1.82%	48.72%	1.82
	30	2630.21	2654	2654.44	2653.87	0.44	24.23	0.57	2.35%	129.55%	2.35
	35	2626.57	2651.88	2654	2653.55	2.12	27.43	0.45	1.64%	21.23%	1.64
	40	2623	2651.26	2653.75	2653.27	2.49	30.75	0.48	1.56%	19.28%	1.56
	45	2622.14	2650.76	2653.52	2653.08	2.76	31.38	0.44	1.40%	15.94%	1.40
	50	2630.34	2650.65	2653.5	2653	2.85	23.16	0.5	2.16%	17.54%	2.16
	53	2632.06	2650.72	2653.48	2652.96	2.76	21.42	0.52	2.43%	18.84%	2.43
0+040,00	-65	2650.84	2660.58	2665.19	2664.88	4.61	14.35	0.31	2.16%	6.72%	2.16

	-60	2650.92	2659.03	2665.26	2664.75	6.23	14.34	0.51	3.56%	8.19%	3.56
	-55	2652.41	2657.37	2664.95	2664.68	7.58	12.54	0.27	2.15%	3.56%	2.15
	-50	2652.6	2655.82	2664.99	2664.6	9.17	12.39	0.39	3.15%	4.25%	3.15
	-45	2652.46	2655.37	2665.55	2664.5	10.18	13.09				
	-40	2652.08	2654.34	2665.67	2664.5	11.33	13.59				
	-35	2650.18	2652.15	2665.81	2664.93	13.66	15.63	0.88	5.63%	6.44%	5.63
	-30	2647.9	2649.9	2665.85	2665	15.95	17.95	0.85	4.74%	5.33%	4.74
	-25	2645.77	2648.68	2664.81	2663.82	16.13	19.04	0.99	5.20%	6.14%	5.20
	-20	2644	2648.73	2665	2663.5	16.27	21				
	-15	2644	2650.24	2665.5	2664.19	15.26	21.5				
	-10	2643.71	2653.02	2665.04	2663.78	12.02	21.33				
	-5	2643.67	2655	2663.49	2663.34	8.49	19.82	0.15	0.76%	1.77%	0.76
	0	2643.28	2655.01	2663.49	2662.83	8.48	20.21	0.66	3.27%	7.78%	3.27
	5	2639.7	2655	2664	2662.74	9	24.3				
	10	2638.51	2654.91	2663.14	2662.53	8.23	24.63	0.61	2.48%	7.41%	2.48
	15	2638	2654.61	2661.07	2660.47	6.46	23.07	0.6	2.60%	9.29%	2.60
	20	2634.76	2654.27	2657.58	2657.25	3.31	22.82	0.33	1.45%	9.97%	1.45
	25	2631.17	2654.13	2654.88	2654.59	0.75	23.71	0.29	1.22%	38.67%	1.22
	30	2628.44	2652.56	2654.5	2654.04	1.94	26.06	0.46	1.77%	23.71%	1.77
	35	2625.81	2651.95	2654.49	2653.72	2.54	28.68	0.77	2.68%	30.31%	2.68
	40	2623.53	2651.54	2654	2653.58	2.46	30.47	0.42	1.38%	17.07%	1.38
	45	2624.83	2652.18	2653.93	2653.47	1.75	29.1	0.46	1.58%	26.29%	1.58
	50	2633.34	2653.64	2653.86	2653.39	0.22	20.52	0.47	2.29%		2.29
	53	2635.61	2654.43	2653.89	2653.4		18.28	0.49	2.68%		2.68
0+050,00	-65	2646.31	2660.8	2665.5	2665.29	4.7	19.19	0.21	1.09%	4.47%	1.09
	-60	2648.67	2659.31	2665.66	2665.2	6.35	16.99	0.46	2.71%	7.24%	2.71

	-55	2651.24	2657.8	2665.58	2665	7.78	14.34	0.58	4.04%	7.46%	4.04
	-50	2652.42	2656.07	2665.5	2664.92	9.43	13.08	0.58	4.43%	6.15%	4.43
	-45	2652.03	2655.69	2665.56	2664.81	9.87	13.53	0.75	5.54%	7.60%	5.54
	-40	2650.73	2654.72	2665.72	2664.74	11	14.99	0.98	6.54%	8.91%	6.54
	-35	2648.89	2652.63	2665.96	2664.86	13.33	17.07				
	-30	2647.14	2650.37	2666	2665	15.63	18.86	1	5.30%	6.40%	5.30
	-25	2645.37	2649.89	2664.99	2664.14	15.1	19.62	0.85	4.33%	5.63%	4.33
	-20	2644.98	2649.86	2664.99	2664	15.13	20.01	0.99	4.95%	6.54%	4.95
	-15	2644.99	2651.63	2664.61	2663.89	12.98	19.62	0.72	3.67%	5.55%	3.67
	-10	2646.26	2654.19	2663.99	2663.46	9.8	17.73	0.53	2.99%	5.41%	2.99
	-5	2645.72	2655.01	2663.84	2663.15	8.83	18.12	0.69	3.81%	7.81%	3.81
	0	2645.12	2655.02	2663.71	2663	8.69	18.59	0.71	3.82%	8.17%	3.82
	5	2645.1	2655.01	2664	2663	8.99	18.9	1	5.29%	11.12%	5.29
	10	2643.7	2655.01	2663.51	2662.67	8.5	19.81	0.84	4.24%	9.88%	4.24
	15	2642.7	2655	2661.16	2660.48	6.16	18.46	0.68	3.68%	11.04%	3.68
	20	2641.08	2654.59	2657.94	2657.57	3.35	16.86	0.37	2.19%	11.04%	2.19
	25	2638.78	2654.09	2655.38	2655.06	1.29	16.6	0.32	1.93%	24.81%	1.93
	30	2635.96	2652	2654.49	2654.1	2.49	18.53	0.39	2.10%	15.66%	2.10
	35	2630.49	2651.99	2654.49	2654	2.5	24	0.49	2.04%	19.60%	2.04
	40	2625.53	2653.83	2654.42	2654.04	0.59	28.89	0.38	1.32%	64.41%	1.32
	45	2627.95	2655.05	2654.39	2655		26.44				
	50	2634.44	2655.05	2654.35	2654.09		19.91	0.26	1.31%	#DIV/0!	1.31
	53	2637.07	2655.05	2654.37	2653.99		17.3	0.38	2.20%	#DIV/0!	2.20
0+060,00	-65	2644.33	2661.36	2665.93	2665.73	4.57	21.6	0.2	0.93%	4.38%	0.93
	-60	2646.89	2659.91	2666.42	2666.15	6.51	19.53	0.27	1.38%	4.15%	1.38
	-55	2649.41	2658.33	2666.48	2666.42	8.15	17.07	0.06	0.35%	0.74%	0.35

	-50	2650.96	2656.85	2666.43	2666.22	9.58	15.47	0.21	1.36%	2.19%	1.36
	-45	2649.33	2656.29	2665.49	2666.12	9.2	16.16				
	-40	2647.42	2655.08	2666.28	2666.45	11.2	18.86				
	-35	2645.62	2653.05	2666.33	2665.5	13.28	20.71	0.83	4.01%	6.25%	4.01
	-30	2645	2651.03	2666.5	2665.32	15.47	21.5				
	-25	2644.99	2650.34	2665.37	2665.01	15.03	20.38	0.36	1.77%	2.40%	1.77
	-20	2644.99	2650.55	2665.78	2664.87	15.23	20.79	0.91	4.38%	5.98%	4.38
	-15	2645.13	2652.67	2665.88	2664.09	13.21	20.75				
	-10	2647.84	2655	2665.47	2663.62	10.47	17.63				
	-5	2646.26	2655.03	2665.11	2663.4	10.08	18.85				
	0	2646.34	2655.01	2663.99	2663.28	8.98	17.65	0.71	4.02%	7.91%	4.02
	5	2646.26	2655	2664	2663.12	9	17.74	0.88	4.96%	9.78%	4.96
	10	2645.36	2654.97	2663.85	2663	8.88	18.49	0.85	4.60%	9.57%	4.60
	15	2642.82	2654.96	2661.39	2661.03	6.43	18.57	0.36	1.94%	5.60%	1.94
	20	2639.22	2654.98	2658.43	2657.86	3.45	19.21	0.57	2.97%	16.52%	2.97
	25	2635.49	2655	2656.1	2655.6	1.1	20.61	0.5	2.43%	45.45%	2.43
	30	2633.53	2652.36	2654.71	2654.49	2.35	21.18	0.22	1.04%	9.36%	1.04
	35	2629.14	2652	2654.76	2654.26	2.76	25.62	0.5	1.95%	18.12%	1.95
	40	2626.9	2654.24	2654.55	2654.17	0.31	27.65	0.38	1.37%	122.58%	1.37
	45	2630.37	2655.05	2654.75	2654.45		24.38	0.3	1.23%	#¡DIV/0!	1.23
	50	2636.09	2655.11	2654.75	2654.32		18.66	0.43	2.30%	#¡DIV/0!	2.30
	54.25	2638.49	2655.1	2654.71	2654.3		16.22	0.41	2.53%	#¡DIV/0!	2.53
0+070,00	-65	2642.41	2661.71	2666.16	2666	4.45	23.75	0.16	0.67%	3.60%	0.67
	-60	2644.8	2660.17	2666.33	2666.81	6.16	21.53				0.00
	-55	2647.13	2658.55	2666.03	2666.81	7.48	18.9				0.00
	-50	2647.2	2656.92	2666	2666.94	9.08	18.8				0.00



	-45	2645.94	2656.4	2665.98	2667	9.58	20.04				0.00
	-40	2645.55	2655.55	2665.98	2666.42	10.43	20.43				0.00
	-35	2645.17	2653.54	2665.99	2665.5	12.45	20.82	0.49	2.35%	3.94%	2.35
	-30	2645	2651.48	2665.99	2665.35	14.51	20.99	0.64	3.05%	4.41%	3.05
	-25	2644.82	2651.11	2665.69	2665.18	14.58	20.87	0.51	2.44%	3.50%	2.44
	-20	2644.97	2651.3	2665.33	2664.91	14.03	20.36	0.42	2.06%	2.99%	2.06
	-15	2646.49	2653.88	2664.97	2664.48	11.09	18.48	0.49	2.65%	4.42%	2.65
	-10	2649	2656.01	2664.97	2664.2	8.96	15.97	0.77	4.82%	8.59%	4.82
	-5	2647.36	2655.54	2664.62	2663.89	9.08	17.26	0.73	4.23%	8.04%	4.23
	0	2647.2	2655.08	2664.36	2663.69	9.28	17.16	0.67	3.90%	7.22%	3.90
	5	2646.18	2655.07	2664.14	2663.5	9.07	17.96	0.64	3.56%	7.06%	3.56
	10	2642.32	2655.11	2664.01	2663.2	8.9	21.69	0.81	3.73%	9.10%	3.73
	15	2638.63	2655.07	2661.57	2661.17	6.5	22.94	0.4	1.74%	6.15%	1.74
	20	2635.99	2655.05	2658.82	2658.57	3.77	22.83	0.25	1.10%	6.63%	1.10
	25	2633.17	2655.02	2656.37	2656.1	1.35	23.2	0.27	1.16%	20.00%	1.16
	30	2630.28	2653.67	2655.51	2655.29	1.84	25.23	0.22	0.87%	11.96%	0.87
	35	2626.99	2653	2655.51	2654.98	2.51	28.52	0.53	1.86%	21.12%	1.86
	40	2629.26	2654.63	2655.16	2654.83	0.53	25.9	0.33	1.27%	62.26%	1.27
	45	2634.02	2655.15	2655.16	2654.79	0.01	21.14	0.37	1.75%		1.75
	50	2639.02	2655.38	2655.12	2654.76		16.1	0.36	2.24%		2.24
	54.25	2639.88	2655.4	2655.02	2654.82		15.14	0.2	1.32%		1.32
0+080,00	-65	2641.57	2661.91	2666.5	2666.5	4.59	24.93	0	0.00%	0.00%	0
	-60	2642.5	2660.27	2666.65	2667.53	6.38	24.15		0.00%	0.00%	0.00
	-55	2643.29	2658.73	2666.97	2667.61	8.24	23.68		0.00%	0.00%	0.00
	-50	2644.52	2657.94	2667	2667.48	9.06	22.48		0.00%	0.00%	0.00
	-45	2645.5	2657.28	2666.49	2667.08	9.21	20.99		0.00%	0.00%	0.00

	-40	2645.18	2655.65	2666.77	2665.95	11.12	21.59	0.82	3.80%	7.37%	3.80
	-35	2645.07	2653.88	2667.5	2665.56	13.62	22.43				
	-30	2644.75	2652.03	2667.25	2665.65	15.22	22.5				
	-25	2644.32	2651.94	2666.3	2665.66	14.36	21.98	0.64	2.91%	4.46%	2.91
	-20	2644.4	2652.63	2666.99	2666	14.36	22.59	0.99	4.38%	6.89%	4.38
	-15	2647.81	2655.09	2666.4	2665.84	11.31	18.59	0.56	3.01%	4.95%	3.01
	-10	2649	2656	2665.58	2665	9.58	16.58	0.58	3.50%	6.05%	3.50
	-5	2648.34	2655.65	2665.01	2664.5	9.36	16.67	0.51	3.06%	5.45%	3.06
	0	2647.34	2655.41	2665.01	2664.5	9.6	17.67	0.51	2.89%	5.31%	2.89
	5	2646.12	2655.36	2664.66	2664.02	9.3	18.54	0.64	3.45%	6.88%	3.45
	10	2642.25	2655.39	2664.4	2663.63	9.01	22.15	0.77	3.48%	8.55%	3.48
	15	2639.84	2655.39	2662.55	2661.85	7.16	22.71	0.7	3.08%	9.78%	3.08
	20	2638.13	2655.33	2659.73	2659.56	4.4	21.6	0.17	0.79%	3.86%	0.79
	25	2636.53	2655.22	2656.88	2656.76	1.66	20.35	0.12	0.59%	7.23%	0.59
	30	2633.88	2655.1	2656.14	2655.79	1.04	22.26	0.35	1.57%	33.65%	1.57
	35	2631	2654.12	2655.88	2655.51	1.76	24.88	0.37	1.49%	21.02%	1.49
	40	2628.97	2655.57	2655.58	2655.29	0.01	26.61	0.29	1.09%		1.09
	45	2634.4	2656.01	2655.51	2655.25		21.11	0.26	1.23%		
	50	2640.84	2655.95	2655.5	2655.11		14.66	0.39	2.66%		
	54.25	2642.14	2655.83	2655.44	2655		13.3	0.44	3.31%		
0+090,00	-65	2642.16	2662.56	2666.93	2667	4.37	24.77				
	-60	2642.41	2661.08	2666.99	2667.79	5.91	24.58				
	-55	2642.66	2659.76	2666.97	2668	7.21	24.31				
	-50	2642.92	2659.32	2666.99	2667.29	7.67	24.07				
	-45	2643.51	2658.17	2666.92	2666.45	8.75	23.41	0.47	2.01%	5.37%	2.01
	-40	2644.29	2656.35	2666.75	2666.2	10.4	22.46	0.55	2.45%	5.29%	2.45

	-35	2644.94	2654.54	2666.67	2666.17	12.13	21.73	0.5	2.30%	4.12%	2.30
	-30	2644.63	2652.84	2666.63	2666.1	13.79	22	0.53	2.41%	3.84%	2.41
	-25	2644.31	2652.81	2666.31	2665.94	13.5	22	0.37	1.68%	2.74%	1.68
	-20	2645.81	2653.79	2666.3	2665.77	12.51	20.49	0.53	2.59%	4.24%	2.59
	-15	2648.92	2656.01	2666.15	2665.5	10.14	17.23	0.65	3.77%	6.41%	3.77
	-10	2648.99	2656.08	2666.44	2665.5	10.36	17.45	0.94	5.39%	9.07%	5.39
	-5	2648.45	2655.91	2666.61	2665.58	10.7	18.16				
	0	2647.65	2655.78	2666.21	2665.3	10.43	18.56	0.91	4.90%	8.72%	4.90
	5	2646.23	2655.71	2664.87	2664.27	9.16	18.64	0.6	3.22%	6.55%	3.22
	10	2643.79	2655.7	2664.61	2663.97	8.91	20.82	0.64	3.07%	7.18%	3.07
	15	2640.86	2655.72	2662.64	2662.25	6.92	21.78	0.39	1.79%	5.64%	1.79
	20	2638.87	2655.65	2659.92	2659.61	4.27	21.05	0.31	1.47%	7.26%	1.47
	25	2637.41	2655.64	2657.5	2657.08	1.86	20.09	0.42	2.09%	22.58%	2.09
	30	2635.88	2655.85	2656.5	2655.91	0.65	20.62	0.59	2.86%		2.86
	35	2634.26	2656.02	2656.33	2655.69	0.31	22.07	0.64	2.90%		2.90
	40	2630.84	2656.02	2655.58	2655.58		24.74				
	45	2635.17	2656.04	2655.53	2655.67		20.36				
	50	2642.12	2656.03	2655.6	2655.75		13.48				
	54.25	2643.75	2656.02	2655.58	2655.63		11.83				
0+100,00	-65	2642.38	2662.74	2667.35	2667.47	4.61	24.97				
	-60	2642.48	2661.54	2667.43	2667.42	5.89	24.95	0.01	0.04%	0.17%	0.04
	-55	2642.67	2661.17	2667.2	2667.15	6.03	24.53	0.05	0.20%	0.83%	0.20
	-50	2642.89	2660.68	2667.5	2666.99	6.82	24.61	0.51	2.07%	7.48%	2.07
	-45	2642.95	2658.9	2667.93	2666.8	9.03	24.98				
	-40	2643.35	2657.09	2667.99	2666.93	10.9	24.64				
	-35	2644.53	2655.29	2667.78	2666.48	12.49	23.25				

	-30	2646.67	2653.76	2667.51	2666.26	13.75	20.84				
	-25	2647.34	2653.81	2667.1	2666	13.29	19.76				
	-20	2647.76	2655.06	2667.6	2666	12.54	19.84				
	-15	2649.06	2656.27	2667.49	2667.51	11.22	18.43				
	-10	2649.13	2656.48	2667.34	2666.61	10.86	18.21	0.73	4.01%	6.72%	4.01
	-5	2649.03	2656.19	2667.06	2666.05	10.87	18.03				
	0	2648.51	2655.97	2666.58	2664.97	10.61	18.07				
	5	2646.96	2655.96	2665.3	2664.55	9.34	18.34	0.75	4.09%	8.03%	4.09
	10	2644.72	2655.98	2665.08	2664.29	9.1	20.36	0.79	3.88%	8.68%	3.88
	15	2642.1	2656	2663.14	2662.64	7.14	21.04	0.5	2.38%	7.00%	2.38
	20	2640.01	2656.1	2660.38	2660.02	4.28	20.37	0.36	1.77%	8.41%	1.77
	25	2638.87	2656.23	2658.05	2657.67	1.82	19.18	0.38	1.98%	20.88%	1.98
	30	2637.84	2656.36	2656.5	2656.28	0.14	18.66	0.22	1.18%	157.14%	1.18
	35	2636.88	2656.42	2656.5	2655.99	0.08	19.62	0.51	2.60%	637.50%	2.60
	40	2631.48	2656.33	2656.5	2656.21	0.17	25.02	0.29	1.16%	170.59%	1.16
	45	2635.16	2656.19	2656.41	2656	0.22	21.25	0.41	1.93%	186.36%	1.93
	50	2642.82	2655.99	2656.02	2656	0.03	13.2	0.02	0.15%	66.67%	0.15
	54.25	2644.93	2655.98	2656.02	2656	0.04	11.09	0.02	0.18%	50.00%	0.18
0+110,00	-65	2642.71	2664.18	2667.61	2667.6	3.43	24.9	0.01	0.04%	0.29%	0.04
	-60	2642.8	2662.81	2667.77	2667.6	4.96	24.97	0.17	0.68%	3.43%	0.68
	-55	2642.86	2662.28	2668.01	2667.47	5.73	25.15	0.54	2.15%	9.42%	2.15
	-50	2642.98	2661.86	2668.1	2667.34	6.24	25.12	0.76	3.03%	12.18%	3.03
	-45	2643.43	2660.07	2668.41	2667.6	8.34	24.98	0.81	3.24%	9.71%	3.24
	-40	2645.11	2658.12	2668.73	2669.05	10.61	23.62				
	-35	2648.15	2656.11	2668.85	2669	12.74	20.7				
	-30	2649.12	2654.61	2667.48	2668.65	12.87	18.36				

	-25	2649.37	2654.73	2667.05	2666.57	12.32	17.68	0.48	2.71%	3.90%	2.71
	-20	2649.33	2655.9	2667.11	2666.34	11.21	17.78	0.77	4.33%	6.87%	4.33
	-15	2649.51	2657	2666.72	2665.98	9.72	17.21	0.74	4.30%	7.61%	4.30
	-10	2649.66	2656.74	2666	2665.67	9.26	16.34	0.33	2.02%	3.56%	2.02
	-5	2649.73	2656.45	2666	2665.33	9.55	16.27	0.67	4.12%	7.02%	4.12
	0	2649.55	2656.24	2665.52	2665	9.28	15.97	0.52	3.26%	5.60%	3.26
	5	2648.43	2656.17	2665.35	2664.81	9.18	16.92	0.54	3.19%	5.88%	3.19
	10	2646.15	2656.28	2665.11	2664.5	8.83	18.96	0.61	3.22%	6.91%	3.22
	15	2644.2	2656.38	2663.98	2663.41	7.6	19.78	0.57	2.88%	7.50%	2.88
	20	2642.97	2656.41	2661.33	2660.98	4.92	18.36	0.35	1.91%	7.11%	1.91
	25	2641.7	2656.58	2658.88	2658.56	2.3	17.18	0.32	1.86%	13.91%	1.86
	30	2640.74	2656.78	2657	2656.66	0.22	16.26	0.34	2.09%	154.55%	2.09
	35	2639.25	2656.89	2656.88	2656.65		17.63	0.23	1.30%		1.30
	40	2634.39	2656.75	2657.01	2656.67	0.26	22.62	0.34	1.50%	130.77%	1.50
	45	2636.67	2656.31	2657.01	2656.51	0.7	20.34	0.5	2.46%	71.43%	2.46
	50	2640.8	2655.99	2656.98	2656.69	0.99	16.18	0.29	1.79%	29.29%	1.79
	54.25	2642.44	2656	2656.94	2656.88	0.94	14.5	0.06	0.41%	6.38%	0.41
0+120,00	-65	2645.1	2665.76	2668	2668.04	2.24	22.9				
	-60	2646.19	2663.88	2668.11	2668.01	4.23	21.92	0.1	0.46%	2.36%	0.46
	-55	2647.24	2663.25	2668.17	2668.06	4.92	20.93	0.11	0.53%	2.24%	0.53
	-50	2648.38	2662.72	2668.29	2667.93	5.57	19.91	0.36	1.81%	6.46%	1.81
	-45	2649.64	2660.76	2668.95	2668.02	8.19	19.31	0.93	4.82%	11.36%	4.82
	-40	2650.01	2658.74	2669	2668	10.26	18.99	1	5.27%	9.75%	5.27
	-35	2650	2656.68	2669	2667.5	12.32	19				
	-30	2649.96	2655.76	2668.72	2667.19	12.96	18.76				
	-25	2649.94	2655.86	2667.43	2667	11.57	17.49	0.43	2.46%	3.72%	2.46

	-20	2649.85	2656.96	2667.14	2666.64	10.18	17.29	0.5	2.89%	4.91%	2.89
	-15	2650	2657	2666.62	2666.12	9.62	16.62	0.5	3.01%	5.20%	3.01
	-10	2652.43	2656.98	2666.22	2665.71	9.24	13.79	0.51	3.70%	5.52%	3.70
	-5	2653.37	2656.97	2665.91	2665.39	8.94	12.54	0.52	4.15%	5.82%	4.15
	0	2652.51	2656.82	2665.68	2665.15	8.86	13.17	0.53	4.02%	5.98%	4.02
	5	2650.27	2656.72	2665.5	2664.95	8.78	15.23	0.55	3.61%	6.26%	3.61
	10	2648.72	2656.68	2665.3	2664.69	8.62	16.58	0.61	3.68%	7.08%	3.68
	15	2647.49	2656.76	2665.02	2664.51	8.26	17.53	0.51	2.91%	6.17%	2.91
	20	2645.74	2656.76	2663.03	2662.26	6.27	17.29	0.77	4.45%	12.28%	4.45
	25	2643.45	2656.84	2660.11	2659.8	3.27	16.66	0.31	1.86%	9.48%	1.86
	30	2641.16	2657.01	2657.59	2657.3	0.58	16.43	0.29	1.77%	50.00%	1.77
	35	2640.22	2657.04	2657.49	2657.19	0.45	17.27	0.3	1.74%	66.67%	1.74
	40	2638.43	2657	2657.51	2657.23	0.51	19.08	0.28	1.47%	54.90%	1.47
	45	2640.27	2656.54	2657.47	2657.31	0.93	17.2	0.16	0.93%	17.20%	0.93
	50	2641.9	2656.46	2657.47	2657.44	1.01	15.57	0.03	0.19%	2.97%	0.19
	54.25	2642.23	2656.59	2657.4	2657.28	0.81	15.17	0.12	0.79%	14.81%	0.79
0+130,00	-65	2650.16	2666.35	2668.42	2668.5	2.07	18.26				
	-60	2650.29	2664.93	2668.49	2668.5	3.56	18.2				
	-55	2650.35	2663.87	2668.5	2668.5	4.63	18.15	0	0.00%	0.00%	0
	-50	2650.42	2663.37	2668.54	2668.36	5.17	18.12	0.18	0.99%	3.48%	0.99
	-45	2650.61	2661.49	2668.71	2668.22	7.22	18.1	0.49	2.71%	6.79%	2.71
	-40	2650.48	2659.41	2668.71	2668.07	9.3	18.23	0.64	3.51%	6.88%	3.51
	-35	2650.14	2657.3	2669.17	2667.88	11.87	19.03				
	-30	2651.55	2656.45	2668.65	2667.7	12.2	17.1	0.95	5.56%	7.79%	5.56
	-25	2652.97	2657	2667.77	2667.44	10.77	14.8	0.33	2.23%	3.06%	2.23
	-20	2654.51	2657.1	2667.29	2666.86	10.19	12.78	0.43	3.36%	4.22%	3.36

	-15	2656.32	2657.4	2666.88	2666.37	9.48	10.56	0.51	4.83%	5.38%	4.83
	-10	2657.04	2657.44	2666.49	2665.96	9.05	9.45	0.53	5.61%	5.86%	5.61
	-5	2656.63	2657.4	2666.2	2665.64	8.8	9.57	0.56	5.85%	6.36%	5.85
	0	2654.47	2657.36	2666.03	2665.46	8.67	11.56	0.57	4.93%	6.57%	4.93
	5	2652.26	2657.31	2665.98	2665.25	8.67	13.72	0.73	5.32%	8.42%	5.32
	10	2649.87	2657.26	2665.52	2664.97	8.26	15.65	0.55	3.51%	6.66%	3.51
	15	2647.1	2657.09	2665.1	2664.52	8.01	18	0.58	3.22%	7.24%	3.22
	20	2645.35	2657.06	2663.38	2663.03	6.32	18.03	0.35	1.94%	5.54%	1.94
	25	2643.74	2657.07	2661.28	2661.12	4.21	17.54	0.16	0.91%	3.80%	0.91
	30	2641.32	2657.09	2658.74	2658.67	1.65	17.42	0.07	0.40%	4.24%	0.40
	35	2639.38	2657.07	2658.01	2657.87	0.94	18.63	0.14	0.75%	14.89%	0.75
	40	2640.59	2657.04	2657.95	2657.5	0.91	17.36	0.45	2.59%	49.45%	2.59
	45	2644.3	2656.4	2657.42	2657.21	1.02	13.12	0.21	1.60%	20.59%	1.60
	50	2646.12	2655.17	2656.26	2656.2	1.09	10.14	0.06	0.59%	5.50%	0.59
	54.25	2647.09	2654.42	2655.81	2655.73	1.39	8.72	0.08	0.92%	5.76%	0.92
0+140,00	-65	2650.57	2667.03	2668.8	2668.76	1.77	18.23	0.04	0.22%	2.26%	0.22
	-60	2650.66	2665.11	2668.84	2668.61	3.73	18.18	0.23	1.27%	6.17%	1.27
	-55	2650.82	2664.64	2668.88	2668.93	4.24	18.06				
	-50	2650.97	2664.23	2669.08	2669	4.85	18.11	0.08	0.44%	1.65%	0.44
	-45	2652.73	2662.26	2669.16	2668.87	6.9	16.43	0.29	1.77%	4.20%	1.77
	-40	2654.7	2660.14	2669.23	2668.6	9.09	14.53	0.63	4.34%	6.93%	4.34
	-35	2656.28	2657.8	2668.83	2668.5	11.03	12.55	0.33	2.63%	2.99%	2.63
	-30	2657.9	2657.54	2668.5	2668.27	10.96	10.6	0.23	2.17%	2.10%	2.17
	-25	2659.58	2658	2668.15	2667.83	10.15	8.57	0.32	3.73%	3.15%	3.73
	-20	2659.92	2658	2667.65	2667.1	9.65	7.73	0.55	7.12%	5.70%	7.12
	-15	2658.46	2658	2666.99	2666.48	8.99	8.53	0.51	5.98%	5.67%	5.98

	-10	2656.46	2658	2666.73	2666.14	8.73	10.27	0.59	5.74%	6.76%	5.74
	-5	2654.13	2658	2665.82	2665.32	7.82	11.69	0.5	4.28%	6.39%	4.28
	0	2653.46	2657.96	2664.82	2664.26	6.86	11.36	0.56	4.93%	8.16%	4.93
	5	2651.37	2657.93	2663.32	2663.05	5.39	11.95	0.27	2.26%	5.01%	2.26
	10	2648.9	2657.85	2662.45	2662.05	4.6	13.55	0.4	2.95%	8.70%	2.95
	15	2647.19	2657.44	2661.54	2661.11	4.1	14.35	0.43	3.00%	10.49%	3.00
	20	2645.48	2657.04	2659.83	2659.73	2.79	14.35	0.1	0.70%	3.58%	0.70
	25	2643.14	2656.68	2658.31	2658.84	1.63	15.17				
	30	2641.56	2655.5	2657.22	2657.34	1.72	15.66				
	35	2640.08	2654.74	2656.54	2656.49	1.8	16.46				
	40	2643.59	2654.23	2656.26	2656.29	2.03	12.67				
	45	2646.59	2653.97	2655.67	2655.72	1.7	9.08				
	50	2648.62	2653.9	2655.34	2655.43	1.44	6.72				
	54.25	2649.62	2653.89	2655.21	2655.26	1.32	5.59				
0+144,25	-65	2650.75	2667.06	2669	2668.85	1.94	18.25	0.15	0.82%	7.73%	0.82
	-60	2650.81	2665.45	2668.98	2668.69	3.53	18.17	0.29	1.60%	8.22%	1.60
	-55	2650.97	2665.08	2668.99	2668.5	3.91	18.02	0.49	2.72%	12.53%	2.72
	-50	2652.73	2664.64	2669.35	2669	4.71	16.62	0.35	2.11%	7.43%	2.11
	-45	2654.88	2662.62	2669.5	2669	6.88	14.62	0.5	3.42%	7.27%	3.42
	-40	2656.99	2660.45	2669.23	2668.84	8.78	12.24	0.39	3.19%	4.44%	3.19
	-35	2658.85	2658.03	2668.73	2668.62	10.7	9.88	0.11	1.11%	1.03%	1.11
	-30	2660.49	2658	2668.43	2668.23	10.43	7.94	0.2	2.52%	1.92%	2.52
	-25	2660.81	2658.26	2666.99	2666.53	8.73	6.18	0.46	7.44%	5.27%	7.44
	-20	2660.62	2658	2665.24	2665.07	7.24	4.62	0.17	3.68%	2.35%	3.68
	-15	2659.75	2658	2665.09	2664.77	7.09	5.34	0.32	5.99%	4.51%	5.99
	-10	2657.55	2658	2664.99	2664.68	6.99	7.44	0.31	4.17%	4.43%	4.17



	-5	2654.36	2658	2663.75	2663.67	5.75	9.39	0.08	0.85%	1.39%	0.85
	0	2652.39	2658	2662.7	2662.65	4.7	10.31	0.05	0.48%	1.06%	0.48
	5	2650.93	2657.82	2661.68	2661.67	3.86	10.75	0.01	0.09%	0.26%	0.09
	10	2648.74	2657.32	2660.79	2660.63	3.47	12.05	0.16	1.33%	4.61%	1.33
	15	2646.91	2656.85	2659.84	2659.63	2.99	12.93	0.21	1.62%	7.02%	1.62
	20	2645.2	2656.15	2658.25	2657.99	2.1	13.05	0.26	1.99%	12.38%	1.99
	25	2641.32	2654.96	2657.23	2657.24	2.27	15.91				
	30	2640.99	2654.8	2656.66	2656.73	1.86	15.67				
	35	2641.18	2654.55	2656.21	2656.23	1.66	15.03				
	40	2644.18	2654.24	2655.89	2655.85	1.65	11.71	0.04	0.34%	2.42%	0.34
	45	2647.3	2653.97	2655.65	2655.44	1.68	8.35	0.21	2.51%	12.50%	2.51
	50	2649.56	2653.95	2655.17	2655.14	1.22	5.61	0.03	0.53%	2.46%	0.53
	54.25	2650.53	2653.95	2655.02	2655.03	1.07	4.49				

*Fuente: Elaboración Propia.*

**Anexo 7.** Parámetros de resistencia al corte en rellenos sanitarios obtenidos por distintos autores a nivel global.

<b>Fuente</b>	<b>Cohesión (ton/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Ángulo de fricción (°)</b>	<b>Observaciones</b>
Fang et al. (1977)	6,2	18	▪ Relleno sanitario de Pensilvania, EEUU.
Gay et al. (1981)	0,7	42	▪ Edad de residuos: 9 meses. ▪ Ensayo de compresión simple.
	2,8	26,5	▪ Basura fresca. ▪ Ensayo de compresión simple.
Landva y Clark (1986)	1,6 – 1,9	38 – 42	▪ Basura vieja.
	1,6	33	▪ Edad de residuos: mayor a 1 año.
	2,3	24	▪ Basura fresca.
Pagotto y Rimoldi (1987)	2,9	22	▪ No se conocen datos sobre el tipo de desechos que trabajaron.
Saarela (1987)	6,7	20	▪ Ensayos realizados en el relleno sanitario de la ciudad de Helsinki, Finlandia. ▪ Ensayo triaxial.
Turczynki (1988)	4 – 5	38 – 40	▪ Residuos frescos.
	1,5	35	▪ Edad residuos: 3 años.
	1,2	32	▪ Edad residuos: 5 años.
	1	26	▪ Edad residuos: 14 años.

Landva y Clark (1990)	1,9 – 2,2	24 – 39	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Esfuerzo normal superior a 48 ton/m<sup>2</sup>.</li> <li>▪ Relleno sanitario de Edmonton, Canadá.</li> </ul>
Siegel et al. (1990)	0	39 – 53	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ensayo de corte directo.</li> <li>▪ Relleno sanitario de Monterey Par, California, EEUU.</li> </ul>
Richardson y Reynolds (1991)	1	18 – 43	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Esfuerzo normal aplicado entre 1,4 y 3,8 ton/m<sup>2</sup>.</li> <li>▪ Densidad estimada de residuos: 1,5 ton/m<sup>3</sup>. ▪ Ensayos in situ y corte directo.</li> <li>▪ Central Maine, EEUU.</li> </ul>
Benvenuto y Cunha (1991)	1,35	22	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Back analysis del deslizamiento en el relleno sanitario Bandeirantes, Sao Paulo, Brasil.</li> </ul>
Grisolia et al. (1991)	1	17	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ensayo triaxial.</li> <li>▪ 20% deformación.</li> </ul>
	2,2	42	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ensayo triaxial.</li> <li>▪ 35% deformación.</li> </ul>
Benson y Othman (1992)	2	61	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ensayo de corte directo.</li> <li>▪ Presencia de plástico, caucho y alambres influyeron en los resultados.</li> </ul>

Cowland et al. (1993)	1,02	23	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Back analysis.</li> <li>▪ Trinchera profunda.</li> </ul>
Golder Associates (1993)	0	41	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ensayo de corte directo.</li> </ul>
Jessberger y Kockel (1993)	2,2	17	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ensayo triaxial consolidado drenado.</li> <li>▪ 20% deformación.</li> <li>▪ Alemania.</li> </ul>
Jessberger (1994)	0 – 2,86	15 – 42	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ensayos de corte, back analysis y valores estimados.</li> </ul>
Fassett et al. (1994)	1,02	23 – 32	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sugeridos por los autores.</li> </ul>
Del Greco y Oggen (1994)	1,57	21	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Baja densidad.</li> </ul>
	2,4	22	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Alta densidad.</li> </ul>
Kölsch (1995)	1,52	15	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Residuos de menor edad.</li> <li>▪ Ensayo de corte directo.</li> </ul>
	1,84	22	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Residuos mayor edad, condición de basura descompuesta.</li> <li>▪ Ensayo de corte directo.</li> </ul>
Sánchez, Palma y Sagasetta (1995)	0 – 2	16 – 26	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Densidad sin compactar de 0,2 ton/m<sup>3</sup> y compactados de 0,8 a 1 ton/m<sup>3</sup>.</li> </ul>

Houston et al. (1995)	0,41 – 0,51	33 – 36	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Relleno sanitario de Arizona, EEUU.</li> </ul>
Kavazanjian (1995)	0,51	28	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Back analysis.</li> <li>▪ Densidades entre 0,86 y 1,02 ton/m<sup>3</sup>.</li> <li>▪ Esfuerzos normales entre 4,5 y 18 ton/m<sup>2</sup>.</li> <li>▪ California, EEUU.</li> </ul>
Gabr y Valero (1995)	0 – 2,75	20,5 – 39	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Residuos con un alto grado de degradación (15 a 30 años de deposición).</li> <li>▪ Ensayo de corte directo y compresión triaxial.</li> <li>▪ Relleno sanitario de Pioneer Crossing, Pensilvania, EEUU.</li> </ul>
Withiam et al. (1995)	1	30	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ensayo de corte directo in situ.</li> <li>▪ Relleno sanitario de Dekorte Park, New Jersey, EEUU.</li> </ul>
Gotteland et al. (1995)	1	25	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ensayos de corte directo in situ.</li> <li>▪ Desplazamiento máximo del 35%.</li> </ul>
Edinçliler et al. (1996)	2,4	41	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ensayo de corte directo.</li> <li>▪ Muestras de distintas edades y lugares del relleno de Wisconsin, EEUU.</li> </ul>

Sadat International (1998)	6,7 – 6,8	23	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Relleno sanitario Doña Juana, Bogotá, Colombia.</li> </ul>
Carvalho (1999)	2,3 – 7,8	15 – 28	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ensayos realizados a muestras del relleno sanitario de Bandeirantes, Brasil.</li> </ul>
Mazzucato et al. (1999)	2,24	17	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Residuos recompactados.</li> <li>▪ Ensayo de corte directo.</li> <li>▪ Densidad de 0,7 ton/m<sup>3</sup>.</li> <li>▪ Italia.</li> </ul>
	2,45	18	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Muestra extraída.</li> <li>▪ Ensayo in situ.</li> <li>▪ Densidad de 0,7 ton/m<sup>3</sup>.</li> <li>▪ Italia.</li> </ul>
Kavazanjian (1999)	4,38	31	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ensayo de corte directo.</li> <li>▪ Relleno sanitario de California, EEUU.</li> </ul>
Eid et al. (2000) y Stark et al. (2000)	2,54	35	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Relleno sanitario de Cincinnati, Ohio, EEUU.</li> </ul>
D'Esquivan (2000)	1	25	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Densidad de 2 ton/m<sup>3</sup>.</li> <li>▪ Relleno sanitario La Bonanza en Caracas, Venezuela.</li> </ul>
Integral (2001)	3	17	

	2	25	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ensayos realizados a muestras de residuos del relleno sanitario Curva de Rodas, Medellín, Colombia.</li> </ul>
Hydroestudios Integral (2001)	1,25 – 2,5	20 – 28	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Relleno sanitario Doña Juana, Bogotá, Colombia.</li> </ul>
Caicedo et al. (2002)	2,6	24	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Muestras obtenidas del deslizamiento del relleno sanitario Doña Juana, Bogotá, Colombia.</li> </ul>
Sabatini et al. (2002)	2,15 – 4,32	18,4	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Relleno sanitario de California, EEUU.</li> </ul>
González y Espinoza (2003)	0 – 1,1	8,1 – 37	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ensayos realizados en perforaciones en diferentes zonas del relleno sanitario Doña Juana, Bogotá, Colombia.</li> </ul>
	0,42 – 2,33	13 – 29,9	
Grupo de Geotecnia (2003)	5	18	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Densidad 1,2 ton/m<sup>3</sup>.</li> <li>▪ Relleno sanitario Loma Los Colorados, Chile.</li> </ul>
Fucale (2005)	2,97	42,5	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ensayo de corte directo.</li> <li>▪ 20% de deformación.</li> <li>▪ Relleno sanitario de Ihlenberg, Alemania.</li> </ul>
	3	46	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ensayo de corte directo.</li> <li>▪ 20% de deformación.</li> <li>▪ Relleno sanitario de Buchen, Alemania.</li> </ul>

Nascimento (2007)	0,46 – 2,58	27 – 35	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ensayo triaxial consolidado drenado.</li> <li>▪ Residuos de diferentes edades.</li> <li>▪ Deformación axial del 20%.</li> <li>▪ Relleno sanitario Metropolitano Centro, Salvador, Brasil.</li> </ul>
Reddy et al. (2008)	3,16 – 6,4	26 – 30	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ensayo de corte directo drenado, con diferentes contenidos de humedad.</li> <li>▪ Rellenos sanitarios de Orchard e Illinois, EEUU.</li> </ul>
Grupo Geotecnia (2008)	0,5	17	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Densidad de 0,55 ton/m<sup>3</sup>.</li> <li>▪ Basura sin compactación, ni sistema de manejo de lixiviados y biogás.</li> <li>▪ Relleno sanitario Viñales, Constitución, Chile.</li> </ul>
Geotecnia Ambiental Ltda. (2010)	2 – 8	19 – 22	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Residuos compactados con densidad de 1,2 ton/m<sup>3</sup>.</li> <li>▪ Relleno sanitario de Santa Marta, Chile.</li> </ul>
SIGA (2012)	2,24	25,7	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Residuos compactados con densidad de 1,2 ton/m<sup>3</sup>.</li> <li>▪ Relleno sanitario de Valdivia, Chile.</li> </ul>



EIA (2012)	0 – 1,5	20 – 35	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Adecuada compactación y sistema de drenaje de biogás y lixiviados.</li> <li>▪ Relleno sanitario de Cartagena, Chile.</li> </ul>
Ramos y Gorraiz (2013)	1,8	20	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Densidad de 1 t/m<sup>3</sup>.</li> <li>▪ Relleno sanitario Carapacho, Chiquinquirá, Colombia.</li> </ul>
Sandoval, Ramirez y Cuarán (2015)	0,91 – 3,14	29,1 – 34,7	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ensayos a los 8 y 60 meses a profundidades de 3 a 5 metros.</li> <li>▪ Densidades de 0,8 y 1,4 ton/m<sup>3</sup>.</li> <li>▪ Relleno sanitario Presidente, Valle del Cauca, Colombia.</li> </ul>
Montalván et al. (2017)	2,2	11 – 17	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Parámetros considerados para el diseño de un relleno sanitario manual en la provincia de Santa Elena, Ecuador.</li> </ul>

**Fuente:** Adaptado de Castillejo (2004, pp. 310-311), Colomer et al. (2009, pp. 4-5), Espinace et al. (2005, p. 10), Montalván et al. (2017, pp. 107-108), Moreno (2013, pp. 54-56), Ordóñez y Villarraga (2007, p. 120), Ramos y Gorraiz (2015, p. 10) y Sandoval et al. (2015, p. 88).

**Anexo 8.** Composición porcentual de los residuos sólidos municipales para diferentes lugares del mundo.

<b>Relleño Sanitario</b>	<b>Materia Orgánica (%)</b>	<b>Papel (%)</b>	<b>Plástico/Caucho (%)</b>	<b>Textil (%)</b>	<b>Madera/Cuero (%)</b>	<b>Metal (%)</b>	<b>Vidrio (%)</b>	<b>Otros (%)</b>
Bandeirantes, Sao Paulo (Brasil)	55	2	19	3	4	2	2	-
Muribeca, Recife (Brasil)	60	15	8	-	-	2	2	13
Belo Horizonte (Brasil)	64,4	13,5	6,5	-	-	2,7	2,2	10,7
Salvador (Brasil)	61,8	11,7	9,8	-	-	4,3	3,9	8,5
Bangkok (Tailandia)	44	25	-	3	7	1	1	19
Doña Juana, Bogotá (Colombia)	49,53	13,61	20,46	3,56	3,19	3,35	4,22	-
Curva de Rodas, Medellín (Colombia)	59,48	9,85	11,73	3,22	-	1,31	2,65	11,76
Pekín (China)	45	5	1	-	1	1	1	46

Nairobi (Kenia)	74	12	5	-	-	3	4	2
Hong Kong	15	3	-	10	7	3	10	22
New York (EEUU)	20	22	-	-	3	5	6	46
Estambul (Turquía)	61	10	3	3	6	2	1	14
Atenas (Grecia)	59	19	7	-	4	4	2	5
Cochabamba (Bolivia)	71	2	3	-	1	1	1	21
Varsovia (Polonia)	32,6	22,2	9,7	4,5	-	4,9	11,9	14,2
Italia	42,1	22,3	7,2	-	-	3	7,1	18,3
Reino Unido	23,4	33,9	4,2	-	-	7,1	14,4	17
Japón	22,2	31,1	15,5	-	-	6,4	13,8	10,6
Buenos Aires (Argentina)	43,56	14,4	12,6	4,65	2,05	1,73	3,86	17,15

<b>Cuenca (Ecuador)*</b>	<b>61,22</b>	<b>16,48</b>	<b>13,07</b>	<b>3,12</b>	<b>0,38</b>	<b>1,14</b>	<b>2</b>	<b>2,59</b>
Caracas (Venezuela)	40,4	34,9	7,8	-	-	6	6,6	2,3
Santa Marta, Región Metropolitana (Chile)	56,7	12,7	11,4	-	-	1,1	3,5	14,4
Chiquinquirá (Colombia)	48,47	3,23	12,6	-	-	3,23	4,85	27,63

*Fuente: Adaptado de AME-INEC (2019)\*, Medina (2018, p. 11) y Ordóñez y Villarraga (2007, p. 116).*

**Anexo 9.** Factores de seguridad obtenidos de diferentes geometrías para 6 terrazas de 5 metros de altura cada una.

<b>Factores de Seguridad</b>																	
<b>ANÁLISIS LOCAL</b>			<b>ANÁLISIS GLOBAL</b>														
			<b>Ancho Berma [m]</b>														
			4			6			8			10			12		
<b>[°]</b>	<b>FSE</b>	<b>FSD</b>	<b>[°]</b>	<b>FSE</b>	<b>FSD</b>	<b>[°]</b>	<b>FSE</b>	<b>FSD</b>	<b>[°]</b>	<b>FSE</b>	<b>FSD</b>	<b>[°]</b>	<b>FSE</b>	<b>FSD</b>	<b>[°]</b>	<b>FSE</b>	<b>FSD</b>
14	4,054	2,409	12	2,564	1,456	11	2,738	1,508	10	2,913	1,556	9	3,087	1,601	9	3,261	1,643
16	3,769	2,341	13	2,328	1,38	12	2,505	1,438	11	2,68	1,491	10	2,854	1,54	10	3,029	1,586
18	3,54	2,285	14	2,139	1,314	13	2,319	1,377	12	2,497	1,436	11	2,672	1,489	10	2,847	1,538
20	3,357	2,235	16	1,986	1,255	14	2,167	1,324	13	2,348	1,387	12	2,526	1,444	11	2,7	1,497
22	3,198	2,19	17	1,851	1,2	15	2,04	1,275	14	2,221	1,344	13	2,405	1,406	12	2,58	1,461
24	3,075	2,144	18	1,698	1,122	16	1,932	1,232	15	2,113	1,304	13	2,299	1,37	12	2,477	1,429
26	2,958	2,098	19	1,616	1,075	17	1,826	1,189	15	2,022	1,268	14	2,206	1,339	13	2,39	1,401
28	2,838	2,055	20	1,572	1,054	18	1,718	1,135	16	1,942	1,236	14	2,125	1,308	13	2,312	1,375

30	2,727	2,013	22	1,53	1,035	19	1,639	1,085	17	1,839	1,189	15	2,056	1,281	14	2,242	1,351
32	2,63	1,978	23	1,49	1,025	20	1,601	1,069	17	1,776	1,163	16	1,995	1,256	14	2,18	1,328
34	2,543	1,936	24	1,438	1,013	20	1,57	1,048	18	1,696	1,116	16	1,936	1,233	14	2,123	1,306
36	2,465	1,903	25	1,374	0,999	21	1,54	1,038	19	1,648	1,088	16	1,858	1,197	15	2,071	1,286
38	2,388	1,865	26	1,307	0,957	22	1,51	1,03	19	1,62	1,076	17	1,81	1,177	15	2,025	1,269
40	2,316	1,833	27	1,23	0,904	23	1,484	1,023	20	1,596	1,058	17	1,755	1,149	16	1,985	1,251
42	2,264	1,798	28	1,206	0,893	23	1,443	1,014	20	1,575	1,051	18	1,707	1,122	16	1,944	1,236
44	2,202	1,764	29	1,164	0,867	24	1,4	1,005	21	1,556	1,043	18	1,68	1,11	16	1,899	1,218
46	2,216	1,734	30	1,133	0,841	25	1,349	0,974	21	1,536	1,037	19	1,656	1,099	17	1,851	1,196
48	2,159	1,715	30	1,117	0,834	25	1,296	0,946	22	1,514	1,032	19	1,623	1,07	17	1,805	1,171
50	2,112	1,68	31	1,098	0,827	26	1,257	0,92	22	1,497	1,027	19	1,607	1,07	17	1,773	1,154
52	2,153	1,697	32	1,084	0,819	27	1,214	0,892	23	1,473	1,021	20	1,591	1,057	17	1,729	1,13
54	2,111	1,628	33	1,055	0,812	27	1,184	0,872	23	1,447	1,015	20	1,577	1,05	18	1,694	1,108
56	1,962	1,632	34	1,021	0,789	28	1,169	0,867	24	1,401	0,997	21	1,564	1,045	18	1,685	1,109

58	2,165	1,613	35	1,003	0,78	29	1,151	0,85	24	1,382	0,998	21	1,551	1,042	18	1,663	1,096
60	2,139	1,586	36	0,991	0,771	29	1,135	0,843	25	1,343	0,974	22	1,536	1,037	19	1,643	1,083
62	2,117	1,566	37	0,969	0,764	30	1,122	0,836	25	1,286	0,932	22	1,522	1,033	19	1,629	1,076
64	2,094	1,539	38	0,945	0,747	31	1,11	0,83	26	1,279	0,932	22	1,508	1,03	19	1,617	1,066
66	2,067	1,666	39	0,925	0,733	31	1,099	0,824	26	1,241	0,907	22	1,495	1,027	19	1,606	1,061
68	2,045	1,397	40	0,905	0,718	32	1,088	0,821	27	1,215	0,89	23	1,482	1,022	20	1,6	1,058
70	2,022	1,365	41	0,886	0,706	32	1,064	0,815	27	1,21	0,891	23	1,46	1,018	20	1,585	1,059

*Fuente: Elaboración Propia.*

**Anexo 10.** Factores de seguridad obtenidos de diferentes geometrías para 3 terrazas de 10 metros de altura cada una.

Factores de Seguridad																	
ANÁLISIS LOCAL			ANÁLISIS GLOBAL														
			Ancho Berma [m]														
			4			6			8			10			12		
[°]	FSE	FSD	[°]	FSE	FSD	[°]	FSE	FSD	[°]	FSE	FSD	[°]	FSE	FSD	[°]	FSE	FSD
20	2,42	1,651	18	1,792	1,18	17	1,895	1,224	16	1,984	1,259	15	2,069	1,292	14	2,154	1,323
22	2,275	1,593	19	1,648	1,099	18	1,73	1,144	17	1,83	1,195	16	1,937	1,241	15	2,027	1,275
24	2,149	1,537	21	1,583	1,06	19	1,628	1,082	18	1,697	1,124	17	1,765	1,153	16	1,904	1,228
26	2,044	1,487	22	1,527	1,043	21	1,578	1,058	19	1,624	1,08	18	1,676	1,105	17	1,763	1,154
28	1,949	1,441	24	1,443	1,03	22	1,53	1,044	20	1,582	1,058	19	1,628	1,078	18	1,682	1,108
30	1,87	1,403	25	1,332	0,966	23	1,459	1,032	22	1,54	1,045	20	1,59	1,061	19	1,636	1,084
<b>32</b>	<b>1,791</b>	<b>1,361</b>	27	1,244	0,915	24	1,359	0,98	23	1,488	1,036	<b>21</b>	<b>1,556</b>	<b>1,05</b>	20	1,607	1,068
34	1,724	1,325	28	1,189	0,883	26	1,265	0,923	24	1,419	1,021	22	1,518	1,04	20	1,574	1,057



36	1,661	1,289	29	1,146	0,851	27	1,219	0,899	25	1,332	0,969	23	1,465	1,032	21	1,545	1,046
38	1,608	1,258	31	1,122	0,839	28	1,175	0,87	26	1,245	0,909	24	1,397	1,009	22	1,503	1,038
40	1,553	1,226	32	1,098	0,828	29	1,146	0,853	27	1,221	0,901	25	1,32	0,957	23	1,458	1,03
42	1,503	1,194	34	1,057	0,818	30	1,125	0,839	28	1,179	0,872	25	1,268	0,926	23	1,36	0,973
44	1,452	1,168	35	1,016	0,805	31	1,104	0,83	29	1,155	0,855	26	1,217	0,891	24	1,339	0,967
46	1,409	1,182	36	0,993	0,783	33	1,069	0,822	30	1,134	0,845	27	1,191	0,873	25	1,277	0,928
48	1,375	1,156	38	0,965	0,761	34	1,032	0,815	30	1,116	0,838	28	1,173	0,864	25	1,25	0,913
50	1,346	1,123	39	0,933	0,739	35	1,01	0,796	31	1,1	0,829	29	1,153	0,853	26	1,211	0,884

*Fuente: Elaboración Propia.*

**Anexo 11.** Factores de seguridad obtenidos de diferentes geometrías para 2 terrazas de 15 metros de altura cada una.

<b>Factores de Seguridad</b>																	
<b>ANÁLISIS LOCAL</b>			<b>ANÁLISIS GLOBAL</b>														
			<b>Ancho Berma [m]</b>														
			4			6			8			10			12		
<b>[°]</b>	<b>FSE</b>	<b>FSD</b>	<b>[°]</b>	<b>FSE</b>	<b>FSD</b>	<b>[°]</b>	<b>FSE</b>	<b>FSD</b>	<b>[°]</b>	<b>FSE</b>	<b>FSD</b>	<b>[°]</b>	<b>FSE</b>	<b>FSD</b>	<b>[°]</b>	<b>FSE</b>	<b>FSD</b>
14	2,371	1,536	13	2,376	1,403	13	2,386	1,407	12	2,433	1,422	12	2,48	1,437	12	2,527	1,451
16	2,289	1,589	15	2,1	1,306	14	2,146	1,323	14	2,192	1,34	14	2,24	1,357	13	2,288	1,374
18	2,156	1,456	17	1,905	1,229	16	1,953	1,248	15	2	1,267	15	2,048	1,285	14	2,097	1,304
20	2,091	1,435	18	1,716	1,142	18	1,747	1,151	17	1,828	1,198	16	1,882	1,22	16	1,937	1,24
22	1,95	1,371	20	1,612	1,08	19	1,64	1,093	18	1,682	1,121	18	1,708	1,127	17	1,772	1,166
24	1,828	1,314	22	1,549	1,052	21	1,579	1,062	20	1,607	1,078	19	1,634	1,089	18	1,669	1,11
26	1,726	1,262	23	1,455	1,037	22	1,511	1,046	21	1,551	1,054	20	1,583	1,064	19	1,612	1,085
28	1,637	1,216	25	1,356	0,988	24	1,415	1,025	23	1,474	1,041	21	1,532	1,049	20	1,566	1,058

30	1,559	1,175	27	1,253	0,924	25	1,319	0,967	24	1,374	0,99	23	1,447	1,036	22	1,508	1,047
32	1,488	1,137	28	1,175	0,87	27	1,241	0,918	25	1,277	0,934	24	1,336	0,966	23	1,428	1,018
34	1,425	1,101	30	1,141	0,852	28	1,174	0,871	26	1,223	0,905	25	1,257	0,918	24	1,344	0,977
36	1,37	1,069	31	1,113	0,838	29	1,142	0,85	28	1,178	0,877	26	1,21	0,891	25	1,278	0,936
38	1,33	1,038	33	1,06	0,827	31	1,116	0,838	29	1,145	0,856	27	1,18	0,874	26	1,209	0,887
40	1,27	1,007	34	1,02	0,813	32	1,07	0,827	30	1,123	0,84	28	1,152	0,854	27	1,19	0,884

*Fuente: Elaboración Propia.*

**Anexo 12.** Factores de seguridad obtenidos de diferentes geometrías para 1 terraza de 30 metros de altura.

<b>Factores de Seguridad</b>		
<b>[°]</b>	<b>FSE</b>	<b>FSD</b>
14	2,263	1,366
16	2,02	1,278
18	1,816	1,196
20	1,64	1,097
22	1,566	1,06
24	1,462	1,042
26	1,351	0,99
28	1,227	0,908
30	1,162	0,868

*Fuente: Elaboración Propia.*

**Anexo 13.** Planos de ortofoto, topografías y perfiles del Relleno Sanitario de Pichacay.

Documento: Anexo13\_Moreira\_Patiño.pdf