



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Propuesta para un plan de rehabilitación de
sitios de disposición final no autorizados.
Caso Sierra de Santa Catarina, Ciudad de
México

TESINA

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

Especialista en Ingeniería Sanitaria

P R E S E N T A

Aldo RIVERA AmBRIZ

DIRECTOR DE TESINA

DR. LUIS ANTONIO GARCÍA VILLANUEVA



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024

Agradecimientos institucionales

Agradezco al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo económico recibido durante mis estudios de especialidad y para el desarrollo de este trabajo.

A la Facultad de Ingeniería y sus docentes por enriquecer mi formación.

Al Dr. Luis Antonio García Villanueva por ser mi asesor y orientarme. A mis sinodales: M.I. Alba Beatriz Vázquez González, M.I. Alejandra Medina Arévalo, M. Antonio Jacintos Nieves, M.I. Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose, por aceptar formar parte del jurado y por complementar este trabajo con sus comentarios.

Al personal de la Coordinación del Área Natural Protegida Sierra de Santa Catarina por las facilidades y apoyo para el mapeo de los tiraderos, especialmente a la Ing. Gloria Guadalupe Jiménez Becerril y Biol. Erick Jesús Anaya Gutiérrez.

A la Ing. Flor Gutiérrez Jiménez por la atención y seguimiento en los trámites de titulación.

A la Planta de Producción de Composta Laboratorio y Vivero (PPCLV) “Doctor Héctor Uriel Mayagoitia Domínguez” por la donación del material de composta con el que se inició el proyecto de tecnosuelos en la Sierra de Santa Catarina, el cual, fue fundamental para esta propuesta técnica, especialmente a la M. Judith y al M. José Hipólito Rosas Molina por el apoyo.

Agradecimientos personales

Gracias papá y mamá por apoyarme en esta nueva etapa que complementa mi formación académica., gracias por siempre apoyarme en cumplir mis sueños y metas, sobre todo por su amor y crianza.

A Lili por su apoyo en toda mi vida académica desde pequeño, su amor y crianza.

A mis sobrinos, siempre les agradeceré por darle alegría a mi vida.

A Fer y Luis por su apoyo y risas en casa.

A Abril; mi compañera de vida, gracias por tu apoyo en todos mis proyectos y a impulsarme a hacer más por el cuidado a la naturaleza cuando la adversidad estaba presente. Eres mi casita, te amo.

A Ethel, Sofi y el marrano por siempre compartir momentos divertidos en la ciudad.

Resumen

La Ciudad de México presenta rezagos en el manejo de residuos, así como en la protección de Áreas Naturales Protegidas (ANP), especialmente en la Sierra de Santa Catarina (SSC) al oriente de la ciudad. El objetivo de este trabajo fue proponer un plan de rehabilitación de sitios de disposición final de residuos no autorizados (tiraderos) con fines de restauración ecológica. Se encontraron 22 tiraderos, ubicados mayormente en ANP y en suelos de conservación, conforme el ordenamiento territorial de la Ciudad de México, mismos que fueron plasmados en una base georreferenciada. En las observaciones en campo, se encontró que los tiraderos se encuentran en colindancia con las áreas urbanas, la composición de los residuos es múltiple, sin embargo, predominan los residuos de la construcción y la demolición (RCD), así como sólidos urbanos (RSU). Por lo anterior, se proponen dos técnicas para la recuperación de servicios ecosistémicos: las fitocapas, para aquellos sitios en donde predominan los RSU, y los tecnosuelos, para sitios en donde predominan los RCD, además de considerar los criterios establecidos en la NOM-083-SEMARNAT-2003 y estudios de suelo en materia de contaminación por residuos peligrosos. Debido a que la complejidad de la problemática socioambiental que atraviesa la SSC, se propone un esquema sustentable con seis áreas estratégicas: la rehabilitación ambiental, la gobernanza, el manejo comunitario, el ordenamiento territorial, la generación de espacios de calidad y la promoción de la salud, el bienestar y la disminución de riesgos.

Índice general

1	INTRODUCCIÓN	1
2	OBJETIVOS	3
2.1.	OBJETIVO GENERAL	3
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3	ANTECEDENTES	4
3.1.	SUELO	4
3.2.	CONTAMINACIÓN POR SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL	7
3.3.	REHABILITACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL	10
4	NORMATIVIDAD	16
5	CASO DE ESTUDIO: SIERRA DE SANTA CATARINA	21
6	METODOLOGÍA	25
6.1.	BASE DE DATOS GEORREFERENCIADA Y COMPRESIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN	25
6.2.	PROPUESTA	26
7	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
7.1.	BASE DE DATOS GEORREFERENCIADA Y COMPRESIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN	27
7.2.	PROPUESTA	34
8	CONCLUSIONES	42
9	BIBLIOGRAFÍA	44
10	ANEXO 1	51

Índice de tablas

Tabla 4-1. Normatividad de carácter obligatoria en la gestión de sitios contaminados.	20
Tabla 7-1. Georreferenciación de tiraderos de la Sierra de Santa Catarina.	31
Tabla 7-2. Atributos asignados a los tiraderos de la Sierra de Santa Catarina.	32
Tabla 7-3. Descripción de las acciones propuestas.....	40

Índice de figuras

Figura 3.1. Funciones ecosistémicas del suelo que permiten la vida en la Tierra. Imagen de FAO (2023).....	5
Figura 3.2 Idealización de los distintos horizontes de un suelo capaz de soportar vegetación. Imagen de Tarbuck et al. (2005).	6
Figura 3.3 Impactos negativos causados por sitios de disposición final. Adaptado de Kanwar et. al (2023).	9
Figura 3.4 El continuo proceso restaurativo para revertir la degradación de los ecosistemas y la fragmentación del paisaje. Adaptado de Gann et al. (2019).	11
Figura 3.5 Residuos empleados en la construcción de tecnosuelos. Adaptado de Fabbri et al. (2021).	15
Figura 5.1 Perfil longitudinal de la Sierra de Santa Catarina. Imagen de Lugo-Hubp et al. (1994).	21
Figura 5.2 Polígonos de Área Natural Protegida de la Sierra de Santa Catarina. Elaborado con datos del Instituto de Planeación Democrática y Prospectiva (2022).....	24
Figura 6.1 Metodología seguida para la identificación y georreferenciación de tiraderos clandestinos. Elaboración propia.	25
Figura 7.1 Comprensión de la evolución de la contaminación por tiraderos clandestinos	29
Figura 7.2 Mapa de los tiraderos de la Sierra de Santa Catarina. Elaboración propia.....	33
Figura 7.3 Diagrama de flujo para lo selección del tipo de rehabilitación en un Área Natural Protegida. Elaboración propia.....	36
Figura 7.4 Áreas y acciones contempladas para una rehabilitación ambiental para la Sierra de Santa Catarina. Elaboración propia.....	39
Figura 10.1 Fotografía área de los tiraderos 1 y 2 (acercamiento)	51
Figura 10.2 Fotografía área de los tiraderos 1 y 2	52
Figura 10.3 Fotografía área del tiradero 14	53
Figura 10.4 Fotografía área del tiradero 3	54
Figura 10.5 Fotografía área de los tiraderos 15 (clausurado); 16 y zona de restauración del tiradero 15	55
Figura 10.6 Fotografía aérea de la zona de restauración y clausura del tiradero 15	56
Figura 10.7 Fotografía área del tiradero 16	57
Figura 10.8 Fotografía área del tiradero 18	58
Figura 10.9 Fotografía área del tiradero 18 (acercamiento lado norte)	59
Figura 10.10 Fotografía área del tiradero 18 (acercamiento lado oeste)	60
Figura 10.11 Fotografía área de los tiraderos 19 y 20	61
Figura 10.12 Fotografía área del tiradero 19 (acercamiento)	62
Figura 10.13 Fotografía área del tiradero 20 (acercamiento)	63
Figura 10.14 Fotografía área de la conexión entre el tiradero 19 y 20 (acercamiento).....	64

Abreviaturas

ANP. *Áreas Naturales Protegidas*

CDMX. *Ciudad de México*

PAOT. *Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial de la CDMX*

RCD. *Residuos de la Construcción y la Demolición*

RME. *Residuos de Manejo Especial*

RP. *Residuos Peligrosos*

RS. *Relleno Sanitario*

RSU. *Residuos Sólidos Urbanos*

SDF. *Sitio de Disposición Final*

SEDEMA. *Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México*

SEMARNAT. *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*

SSC. *Sierra de Santa Catarina*

1 Introducción

El manejo inadecuado de residuos ha sido un tema de gran preocupación en todo el mundo, principalmente por sus implicaciones negativas en la salud pública y el medio ambiente (Hoornweg y Bhada-Tata, 2012). La deficiencia en las etapas de la recolección y la disposición final, son algunas de las principales causas que derivan en la proliferación de sitios de disposición final no controlados (también llamados tiraderos a cielo abierto) (Nanda y Berruti, 2021; SEMARNAT, 2020).

La gestión y el manejo de residuos sólidos en México presenta grandes deficiencias. Los municipios son los responsables del manejo de residuos sólidos urbanos (Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, 1917, Artículo 115); sin embargo, este esquema genera barreras para la adopción de estrategias sustentables (Tsydenova et al., 2018). En términos de recolección el país cuenta con tan solo el 83.87 % de cobertura a nivel nacional (SEMARNAT, 2020), habiendo estados con el 100 % de cobertura del servicio y aquellos con coberturas menores al 60 %.

Las estrategias para los sitios de disposición final (SDF) de los residuos se clasifican en: rellenos sanitarios, sitios controlados y sitios no controlados (SEMARNAT, 2002). Se cuenta con 2,202 sitios de disposición final en el país, no obstante, 47.8 % no cuentan con ninguna infraestructura básica para la protección del ambiente (SEMARNAT, 2020). Cabe señalar que los datos provenientes del Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos (DGBIR) contempla aquellos SDF que son usados por los gobiernos para disponer los residuos, a esto se le debe de sumar los que proliferan de manera clandestina por los usuarios. En el caso de la CDMX, para el año 2010, se reportaron 168 denuncias de SDF no autorizados, de los cuales 55% se encontraron en suelo de conservación (PAOT, 2010). Los suelos de conservación son un tipo de uso de suelo de la CDMX (SEDEMA, 2015), algunos de estos son considerados dentro del sistema de Áreas Naturales Protegidas (ANP) de la CDMX. Tal es el caso de la Sierra de Santa Catarina, la cual, dentro de sus principales afectaciones en los polígonos de ANP, se encuentran los tiraderos clandestinos (GODF, 2005). Las estrategias para la clausura y rehabilitación de SDF controlados y no controlados pueden ser: el retiro de los residuos para colocarlos en sitios autorizados (Agdag et al., 2022) y/o la adición de una cobertura final, con el objetivo de minimizar la infiltración de líquidos y el control del biogás de los residuos

presentes (Agdag et al., 2022; SEMARNAT, 2002). Cabe señalar, que para ambas estrategias se deben de tener en cuenta la topografía, la pendiente y el fácil acceso al sitio, y en ambos casos los impactos ambientales, especialmente la contaminación al suelo y mantos acuíferos siguen presentes, especialmente en la segunda forma. De igual manera, no se cuenta con ninguna guía o legislación para la rehabilitación de espacios contaminados por residuos sólidos, la NOM-083-SEMARNAT-2003 presenta algunas directrices, pero para la clausura de sitios que han funcionado como espacios de disposición final.

Debido a lo anterior, distintas alternativas de ingeniería deben de ser propuestas para el control de la contaminación que presentan estos SDF no autorizados, así como las estrategias para una correcta rehabilitación ambiental en el largo plazo, especialmente para aquellas zonas que no deberían de funcionar como SDF, como en el caso de las ANP de la Sierra de Santa Catarina.

2 Objetivos

2.1. Objetivo general

Proponer un plan de rehabilitación para sitios de disposición final no autorizados en la Sierra de Santa Catarina considerando técnicas de ingeniería ambiental.

2.2. Objetivos específicos

- Realizar una revisión bibliográfica del sitio para comprender la evolución de la contaminación del sitio consultando en medios electrónicos e impresos.
- Identificar los sitios de disposición final no autorizados en los polígonos de área natural protegida mediante imágenes satelitales y uso de drones en campo para establecer una base de datos georreferenciada.
- Realizar una revisión del estado del arte sobre las diferentes técnicas de ingeniería para la rehabilitación de sitios de disposición final en revistas científicas y libros digitales e impresos de los últimos diez años.

Capítulo 3

3 Antecedentes

3.1. Suelo

El suelo es un recurso fundamental de los ecosistemas. Tal es su importancia que la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (2022) lo considera como un recurso no renovable, por su tiempo de formación, el cual es de 1 cm de suelo fértil por cada 1000 años. El suelo se define como el producto final de la influencia de cinco factores formadores: el tiempo, clima, topografía y distintos organismos (procesos biológicos) (FAO, 2023). Dichos factores son determinantes en las propiedades y características de los suelos.

Además de ser un recurso no renovable, el suelo cumple los cuatro tipos de servicios ecosistémicos, acorde a FAO (2023), los cuales son: de abastecimiento, apoyo, regulación y culturales. Los distintos servicios que proporciona el suelo se ilustran en la figura 3.1, resaltando aquellos servicios de regulación, como la regulación de la calidad del agua, ciclado de nutrientes, regulación del clima y su importante retención de carbono, siendo estas dos últimas características fundamentales en su papel para la mitigación del cambio climático (Smith, 2012). Además, se le ha conferido otras funciones no ecosistémicas, como ser el lugar donde se entierran los residuos, estos sitios se conocen como sitios de disposición final (SDF) (SEMARNAT, 2002.).

Para que el suelo exista de tal forma como lo conocemos y cumpla las funciones ya expuestas, la roca madre, la cual, puede estar formada por un material consolidado, como roca, o materiales no consolidados, como: arenas, arcillas y grava debe ser influenciada por la interacción con los otros factores formadores de suelo: tiempo, clima, topografía y organismos. Este proceso se le conoce como intemperismo o meteorización de la roca madre y ocurre en la superficie terrestre de arriba hacia abajo (Tarbuck et al., 2005). El intemperismo puede ser físico o químico (Tarbuck et al., 2005), el primero es aquel que no afecta la composición elemental de la roca solamente la transforma a diversos tamaños o la fractura, por otra parte, el intemperismo químico cambia la composición elemental de la roca mediante



Figura 3.1. Funciones ecosistémicas del suelo que permiten la vida en la Tierra. Imagen de FAO (2023).

reacciones químicas, como: la disolución, oxidación e hidrólisis.

Al ser sistemas naturales dinámicos que interceptan con la atmósfera, la hidrósfera y la biósfera, cinco constituyentes son observados: aire, agua, fauna (micro, macro y meso) material inorgánico y orgánico (Needelman, 2013). Una vez que el suelo se ha formado típicamente se conforma en volumen por un 45% de material inorgánico, 25% de agua, 25% aire y tan sólo el 5% se compone de materia orgánica (Tarbuck et al., 2005), es de resaltar que estos porcentajes varían en función de la posición del suelo y la temporalidad. En este sentido, el suelo se compone de distintos horizontes, estos se observan en la figura 3.2, lo cuales representan una idealización del suelo natural. El horizonte superficial se conoce como horizonte O, este se compone de capas con material fresco con distintos niveles de descomposición (bajo, medio y alto) (Mantero-García et al., 2019), en este horizonte 35% del volumen corresponde a materia orgánica. El horizonte A se compone mayormente de materia orgánica ya humificada asociada con materia inorgánica. Los tres horizontes por debajo de estos son caracterizados por tener altos contenidos de materia mineral y bajos contenidos de materia orgánica, ergo, la actividad biológica disminuye.

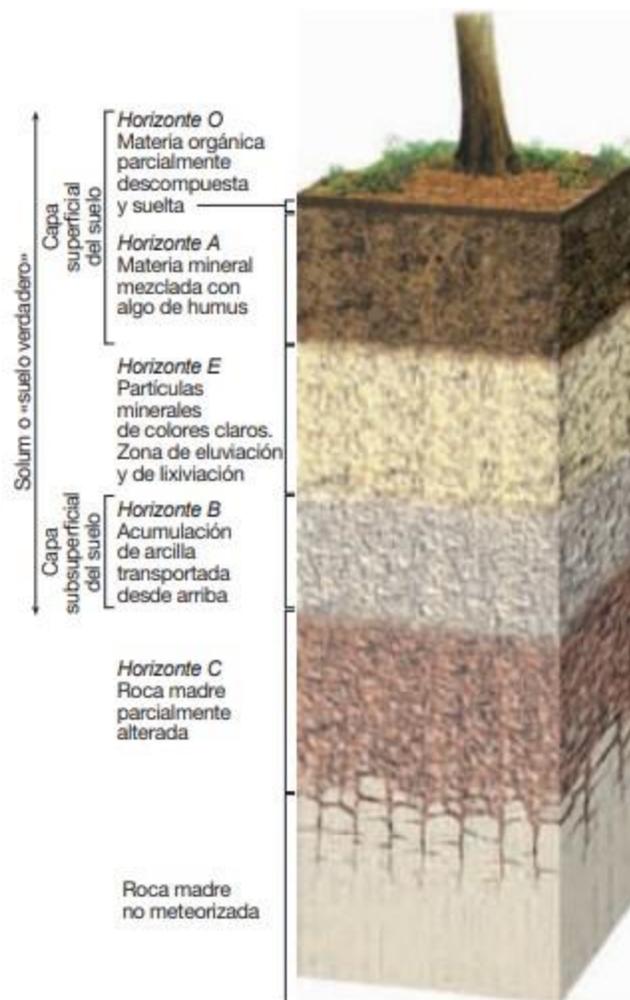


Figura 3.2 Idealización de los distintos horizontes de un suelo capaz de soportar vegetación. Imagen de Tarbuck et al. (2005).

La materia orgánica se vuelve un factor clave para los suelos, primordialmente por ser la principal fuente de carbono (C) de los microorganismos (Fabbri et al., 2021; Jacoby et al., 2017), los microorganismos, derivado de su actividad biológica, contribuyen al proceso continuo de la formación del suelo (Tarbuck et al., 2005). Algunos de los microorganismos del suelo, como bacterias y hongos presentes en la rizosfera, contribuyen a disminuir factores de estrés del tipo biótico o abiótico (Antoun y Prévost, 2006; Lugtenberg, Kamilova et al., 2009), contribuyendo al establecimiento de las especies vegetales y mejorando su crecimiento (Antoun & Prévost, 2006). Trivedi et al. (2018) identifica diversas formas en las que las comunidades vegetales afectan la actividad microbiana del suelo, estas son: exudación de C a través de sus raíces, modificación del microclima y disponibilidad de mantillo. Una comunidad vegetal

diversa impacta de la misma forma a las comunidades microbianas (Trivedi et al., 2018). Las interacciones raíz-suelo tiene efectos positivos recíprocos entre las plantas y la formación del suelo, modificando su estructura física y las actividades de la biota que ocurren en él (Ehrenfeld, 2013). Dentro de los efectos positivos de esta interacción se encuentran: la proporción de aireación al suelo; previniendo su compactación, aumento en la retención de agua y materia orgánica; aumentando la humedad, reducen la erosión, modifican el microclima, aumentan los nutrientes limitantes (Jain et al., 2022; Lal, 2020; Pinhey y Tebbs, 2022; Trivedi et al., 2018; Zhou et al., 2008). Debido a sus múltiples beneficios las plantas han sido estudiadas como método para la adaptación y mitigación del cambio climático (Alfaro et al., 2014; Parmesan y Hanley, 2015), además de la remediación de suelos (Padmavathiamma *et al.*, 2007) y la rehabilitación de ecosistemas (Farrel *et al.*, 2020).

3.2. Contaminación por sitios de disposición final

Actualmente, en México la NOM-083-SEMARNAT-2003 (de aquí en adelante la norma) rige a los SDF, esta norma obligatoria, establece las especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de SDF de residuos sólidos urbanos (RSU) y de manejo especial (RME). Acorde a esta legislación los SDF se dividen en tres categorías, a continuación, se presentan junto con su definición correspondiente:

- Rellenos Sanitarios (RS): cumplen con lo establecido en la norma
- Sitios Controlados: cumple con las especificaciones de un relleno sanitario en lo que se refiere a obras de infraestructura y operación, pero no cumple con las especificaciones de impermeabilización en la interfase suelo-residuos.
- Sitios No Controlados/Tiraderos clandestinos: no cumple con los requisitos establecidos en la norma.

La diferencia principal entre un SDF controlado y un RS es que en el primero no existe una barrera (natural o sintética) que proteja al suelo o la roca de los lixiviados generados por los residuos, así mismo, conforme la norma, este debe de ser captado y extraído. De manera similar, la legislación establece que el biogás (mezcla constituida principalmente por metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) generado debe de ser extraído, captado, conducido y controlado en los RS y sitios controlados. Los lixiviados y el biogás, así como otros compuestos gaseosos, son

las principales fuentes de contaminación ambiental de los SDF (SEMARNAT, 2018), estas áreas siguen siendo un desafío importante para el manejo de residuos (Gworek et al., 2016).

Acorde a la directiva de la Unión Europea No. 1999/31/EC los lixiviados se definen como: cualquier líquido que se percole a través de los residuos depositados y provienen o están contenidos en un SDF. La cantidad de lixiviados producida se aumenta en gran medida por el agua de lluvia (Lema et al., 1988), por ello, la norma comprende una cobertura final (natural o sintética); minimizando su infiltración en los residuos, no obstante, estos también se producen de manera natural por el proceso de descomposición de los residuos (SEMARNAT, 2018). Por otra parte, su composición, cantidad y características son variables, debido a que durante la percolación distintos compuestos orgánicos e inorgánicos presentes se disuelven (Lema et al., 1988), también dependerá de la naturaleza de los residuos, profundidad a la que se enterraron, contenido de humedad, oxígeno disponible, temperatura, tratamiento previo a los residuos, antigüedad del SDF y toxicidad inicial de los residuos (Adhikari et al., 2014; SEMARNAT, 2018). Así mismo, en los lixiviados pueden encontrarse sustancias peligrosas, como metales pesados o sustancias xenobióticas debido a la generación de Residuos Peligrosos (RP) en los hogares (pinturas, plaguicidas de jardín, productos farmacéuticos, productos químicos fotográficos, determinados detergentes, productos de cuidado personal, tubos fluorescentes, aceite usado, baterías, equipos eléctricos y electrónicos, maderas tratadas con metales pesados y productos con clorofluorocarbonos) (Slack *et al.*, 2005). Ya sea por su naturaleza orgánica o inorgánica, su composición, características y cantidad, los lixiviados suelen representar una potencial fuente de impactos ambientales para el suelo y los cuerpos de agua cercanos (superficiales y/o subterráneos), provocando problemas de toxicidad, eutrofización y acidificación (SEMARNAT, 2018; Vaverková, 2017), además de la toxicidad asociada al contacto directo o crónico con una zona contaminada, las sustancias químicas presentes pueden bioacumularse en los organismos y pasar a lo largo de la cadena alimenticia, llegando finalmente a los humanos (Budi et al., 2016).

Al igual que los lixiviados, las emisiones de CH₄ y CO₂ son el producto del proceso de descomposición de la materia orgánica presente en los residuos. Típicamente su composición es de (50-60)% de CH₄ y (40-50)% de CO₂ (Duan et al., 2021). El CH₄ tiene un potencial de calentamiento global 25-34 veces mayor que el CO₂ (IPCC, 2021), contribuyendo mayormente al cambio climático. Así mismo, las emisiones de gases provenientes de SDF se constituyen por

otros compuestos potencialmente contaminantes, como: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxidos de azufre (SO_x), cloruro de hidrógeno (HCl), sulfuro de hidrógeno (H₂S), materia particulada (PM), compuestos orgánicos peligrosos, así como volátiles, y compuestos agotadores de la capa de ozono (EPA, 1995). Aunque muchos de ellos se encuentran en trazas, estos también podrían estar causando riesgos a la salud, principalmente a poblaciones cercanas a los SDF (Duan et al., 2021).

Las diversas formas en que los SDF causan un impacto negativo, tanto en el medio ambiente, como en la salud humana, se presentan en la figura 3.3, debido a la gran cantidad de impactos, los aspectos contemplados en la norma se establecen con el objetivo de minimizarlos (proceso de prevenir, evitar o minimizar dichos impactos), al mismo tiempo que las ciudades se ven limpias en apariencia (Vasarhelyi, 2021). El enterrar los residuos es una técnica de manejo ampliamente usada, especialmente por su bajo requerimiento técnico y costo operacional (Nanda y Berruti, 2021), no obstante, la evidencia científica disponible aún no es contundente en si los impactos logran ser disminuidos con los RS, contrario a la creencia estos pueden seguir siendo una fuente potencial de impactos a la salud humana y al medio ambiente (Allen, 2001; Vaverková, 2019).



Figura 3.3 Impactos negativos causados por sitios de disposición final. Adaptado de Kanwar et. al (2023).

3.3. Rehabilitación de suelos contaminados por sitios de disposición final

El término *rehabilitación* posee dos vertientes. En el contexto de la ingeniería civil y sanitaria, la definición, en esencia se refiere al cumplimiento de la norma, la cual se define como:

Acción de recuperar o restituir la capacidad de un SDF para continuar con el confinamiento de residuos sólidos urbanos, siempre y cuando se cumpla con un mínimo de requisitos en cuanto a la capacidad volumétrica del sitio, forma de operación, mecanismos de control, protección al ambiente y a la salud pública. (Bastidas-Acuña y Licea-Nogues, 2002)

Por otra parte, en el contexto de ecológico de sistemas degradados es la establecida por la Sociedad para la Restauración Ecológica en su documento "Principios y estándares internacionales para la práctica de la restauración ecológica", en la que se define a la rehabilitación como:

Acciones de gestión que apuntan a restablecer de manera renovada y continua los servicios ecosistémicos de un sitio degradado a través del establecimiento de ecosistemas no nativos contribuyendo a la mejora de la integridad de los ecosistemas y la resiliencia socio-ecológica.(Gann et al., 2019)

En este sentido, la rehabilitación busca recuperar las funciones ecosistémicas en lugar del ecosistema nativo de referencia, lo que la diferencia de la restauración, sin embargo, en el largo plazo la primera se puede convertir en la segunda forma de manejo (Gann et al., 2019). Para los efectos de este trabajo, el término en el contexto ecológico resulta más oportuno. Tanto la restauración, como la rehabilitación se consideran actividades restaurativas, que, junto con la reducción de impactos sociales al ecosistema (extraer, producir, comercializar, consumir y disponer) y la remediación, conforman el proceso restaurativo, el cual es continuo e interconectado (ver figura 3.4). Las cuatro actividades son consideradas de tal forma debido a que reducen las causas y los efectos continuos de la degradación, mejoran la salud del ecosistema y la biodiversidad, aumentando los servicios ecosistémicos, promoviendo una transición hacia la sustentabilidad (Gann *et al.*, 2019).



Figura 3.4 El continuo proceso restaurativo para revertir la degradación de los ecosistemas y la fragmentación del paisaje. Adaptado de Gann et al. (2019).

Como se observa en la figura 3.4, al eliminar los impactos hacia el ecosistema, continuaría la remediación, la cual, agrupa distintas técnicas para disminuir los riesgos provocados por los contaminantes; llevándolos a concentraciones aceptables para la salud humana y el ambiente (Meuser, 2012). Las técnicas de remediación en suelo pueden llevarse a cabo *in situ* o *ex situ* (Hussain et al., 2022). El primer término se refiere a la eliminación directa del contaminante sin la necesidad de extraer el suelo, contrario a la remediación *ex situ*, por lo que la técnica *in situ* resulta en un menor costo económico (Liao et al., 2022). Las técnicas se clasifican en físicas, térmicas, químicas y biológicas, su selección depende de la concentración en la que se encuentra el contaminante, condiciones del sitio, presupuesto y sobre todo el contaminante objetivo (Kuppusamy et al., 2016; Ugrina y Jurić, 2023), existiendo una amplia gama de contaminantes en el suelo a los que la remediación se puede aplicar, tales como: contaminantes orgánicos hidrofóbicos, orgánicos persistentes, metales pesados, radioisótopos y emergentes (Mao et al., 2015). Debido al amplio espectro de contaminantes que se pueden encontrar en el suelo las técnicas de remediación físicas y químicas son mayormente escogidas como primer tratamiento, no obstante, esto deja con problemas de alteración ecológica, en mayor medida cuando estas técnicas se usan de manera *ex situ* (Dada et al., 2015). Por ello, las tecnologías de remediación biológica, especialmente *in situ*, han recibido una mayor atención debido a que son métodos

especialmente amigables con el ecosistema, sostenibles y al mismo tiempo mejoran las condiciones del suelo (Dada *et al.*, 2015; Ye *et al.*, 2017). Dichas tecnologías hacen uso de la capacidad de las plantas y/o microorganismos para la transformación y descomposición metabólica de contaminantes (orgánicos y metales) (Abioye, 2011), algunos tipos son: biorremediación, bioestimulación, biosorción, bioaumentación, biorremediación, fitoremediación y vermiremediación (Kuppusamy *et al.*, 2016).

En este sentido, distintas propuestas de remediación biológica *in situ* han sido aplicadas en SDF, especialmente para mitigar los impactos provenientes de los lixiviados y el biogás. En el primer caso, como se mencionó en la subsección 3.2, los lixiviados se generan en mayor medida por la precipitación, por lo que el uso de técnicas denominadas *fitocapas* han sido propuestas como alternativas a la cobertura final, estas se incluyen dentro de las técnicas de fitorremediación (Lamb *et al.*, 2014), las cuales, son técnicas que se apoyan del uso de planta para eliminar los contaminantes del medio ambiente (Cunningham, 1993), esto se logra mediante la inmovilización, absorción, reducción de la toxicidad, estabilización o degradación de los contaminantes (Kafle *et al.*, 2022). Las fitocapas se definen como el uso de plantas maduras que minimizan la filtración de agua hacia los residuos, al tiempo que estabilizan y mitigan la migración de contaminantes gaseosos (Lamb *et al.*, 2014). La reducción de lixiviados se debe a tres mecanismos que propician las fitocapas según lo descrito por Lamb *et al.* (2014):

- Intercepción de la lluvia por parte del dosel arbóreo.
- Almacenamiento de humedad en las capas del suelo.
- Evapotranspiración del agua almacenada por parte del proceso fotosintético de las plantas.

Las fitocapas consisten en el establecimiento de una cobertura con texturas franco-arcillosas que no esté compactada (Lamb *et al.*, 2014), contrario a las coberturas finales convencionales. Esta cobertura se acompaña de enmiendas orgánicas como composta, biosólidos, biocarbón u otros materiales orgánicos que aporten nutrientes a las especies vegetales y aumenten la actividad biológica (Kim & Owens, 2010; Kumar *et al.*, 2021; Lamb *et al.*, 2014). Resulta importante considerar aspectos como el grosor de cada capa y las especies arbóreas. En la investigación de Venkatraman & Ashwath, (2009) se encontró que capas gruesas conllevan a una menor infiltración, así mismo, los mismos autores recomiendan el uso de especies arbóreas acorde a la ubicación del SDF. En este sentido, Lamb *et al.*, (2014) reportan que el éxito de las

fitocapas será mayor cuando en el clima de la ubicación del SDF, la evapotranspiración supere a las precipitaciones.

Por otra parte, las fitocapas, al aumentar la actividad biológica también logran la mitigación de gases de efecto invernadero por medio de la oxidación biológica del CH₄ (Venkatraman & Ashwath, 2008), así mismo se logran eliminar malos olores y mejoran la estética del sitio (Lamb *et al.*, 2014; Venkatraman & Ashwath, 2008).

La oxidación del CH₄ generado en SDF es un fenómeno conocido desde hace décadas (Whalen *et al.*, 1990). En este sentido, las *biocapas* han sido propuestas como técnicas de remediación promueven la oxidación biológica del CH₄ (insertar nombre [EPA, por sus siglas en inglés], 2023). En ambas técnicas (fitocapas y biocapas) la oxidación se debe principalmente a la actividad biológica de microorganismos metanotrofos (Higgins *et al.*, 1981).

Las biocapas consisten en una capa de material poroso colocada en la parte superior del SDF, la cual, se recubre con composta madura (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos [EPA], 2023). Acorde a EPA (2023), esta tecnología pertenece a la categoría de biofiltros, el cual, es un tratamiento biológico que consiste en un material poroso colonizado por microorganismos que se encargan de la transformación del contaminante (Emelko *et al.*, 2006), por lo que se pueden diferenciar de las fitocapas al no presentar especies de plantas en la superficie. Sin embargo, es bien sabido que en la zona de actividad que rodea a las raíces de las plantas (rizósfera) promueve el crecimiento simbiótico de microorganismos (Lugtenberg & Kamilova, 2009), existen investigaciones en la que los microorganismos metanotrofos se benefician de esta interacción aumentando su presencia en dicha zona (Van Bodegom *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 2008), por lo que la estrategia de fitocapas resulta en una mejor alternativa en la rehabilitación de ecosistemas al regresar progresivamente las funciones ecosistémicas del suelo y aumentar la actividad biológica que derive en la biooxidación del CH₄, al mismo tiempo que se minimiza la generación de lixiviados.

Continuando con el proceso de restauración, el siguiente paso sería la rehabilitación. Conforme su definición, puede ser cualquier acción destinada a la recuperación de los servicios ecosistémicos, algunas de ellas se pueden referir a la adición de micorrizas no nativas o plantar una mezcla de especies de plantas nativas y no nativas para mejorar las funciones del suelo (Gann *et al.*, 2019). En el caso de uso de plantas en suelos contaminados por SDF se ha estudiado el uso de plantas hiperacumuladoras (plantas capaces de crecer en suelos con grandes

concentraciones de metales pesado acumulándolos en sus vacuolas) para remediar el suelo por metales pesados presentes en estos sitios (Kamal *et al.*, 2016; Popova, 2019; Vaverková & Adamcová, 2014), también se ha estudiado la plantación de especies tolerantes a altas cantidades de CH₄ (Attalage *et al.*, 2023). En ambos casos, si el objetivo fuera llegar a la restauración, las especies vegetales se eliminarían de forma gradual, en caso de que no fueran nativas del sitio, y serían sustituidas con especies que si lo fueran una vez restauradas las funciones ecosistémicas del suelo.

Cuando la cobertura del suelo es prácticamente inexistente, como en el caso de SDF, una estrategia que ha generado gran interés son los *tecnosuelos construidos*, especialmente en el caso de SDF con alto contenido de Residuos de la Construcción y la Demolición (RCD) (Barredo *et al.*, 2020). Los tecnosuelos están diseñados para favorecer el desarrollo de la vegetación en el largo plazo (Morel *et al.*, 2015) y son considerados un ejemplo de economía circular (Fabbri *et al.*, 2021). Se contruyen con el objetivo de imitar los componentes orgánicos e inorgánicos a un suelo natural (González-Méndez & Chávez-García, 2020) a través de la valorización de residuos (Rokia *et al.*, 2014). Distintos residuos han sido propuestos en su construcción, como se observa en la figura 3.5, algunos de los más estudiados son: residuos orgánicos compostados, biocarbón, lodos de depuradora, lodos de fábricas de papel, concreto, ladrillos, suelos de excavación y cenizas de la quema de carbón (Fabbri *et al.*, 2021; Rokia *et al.*, 2014). Los tecnosuelos han sido usados mayormente en la reclamación de suelos mineros y suelos industriales, la reclamación es un término similar al de restauración (recuperar los servicios ecosistémicos iniciales), pero es un término mayormente utilizado en el contexto de ecosistemas afectados por la actividad minera (Lima *et al.*, 2019) y en espacios abandonados en las ciudades (Rokia *et al.*, 2014). Debido a que los tecnosuelos se construyen para proveer de servicios ecosistémicos (Morel *et al.*, 2015), esta técnica puede ser adaptada a la rehabilitación de ecosistemas afectados por tiraderos de RCD, existen investigaciones en las que el componente inorgánico principal han sido estos residuos (Barredo *et al.*, 2020; Prado *et al.*, 2020; Rokia *et al.*, 2014), así como investigaciones en las que se ha usado a los tecnosuelos como estrategia para la restauración de sitios con altos contenidos de concreto (Rivera, 2022).

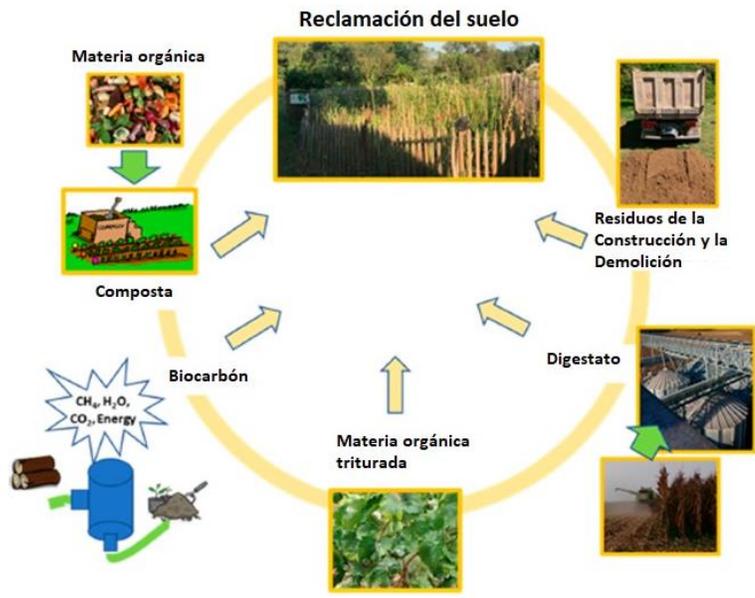


Figura 3.5 Residuos empleados en la construcción de tecnosuelos. Adaptado de Fabbri et al. (2021)

4 Normatividad

Cuando la contaminación por SDF *no se encuentra* dentro de ecosistemas denominados como Áreas Naturales Protegidas (ANP), la normatividad aplicable sería lo referente a la NOM-083-SEMARNAT-2003 que abarca las especificaciones mencionadas en la subsección 3.2, la cual emana de la Ley General de Gestión Integral de Residuos (LGPGIR). No obstante, en términos de rehabilitación de ecosistemas, esta norma no presenta una forma de rehabilitar o restaurar un SDF cuando termina el tiempo de vida útil del sitio, sin embargo, contiene aspectos que pueden servir de *directrices* para las estrategias de rehabilitación y restauración, como: la minimización de generación de lixiviados y controlar el flujo del biogás generado, cobertura final, así como su posterior uso, el cual, estará en función del uso de suelo permitido, con ciertas restricciones como la baja capacidad de carga, posibilidad de hundimientos diferenciales y presencia de biogás.

Las ANP se encuentran contempladas en la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), la cual las define como: ambientes originales que no han sido significativamente alterados por la actividad del ser humano o que requieren ser preservadas y restauradas (fracción II del Artículo 3 de la LGEEPA). Dicha ley, al ser de índole General, es de facultad concurrente con los estados; estableciendo directrices y distribuyendo competencias, para que los estados y la federación legislen al mismo tiempo en la materia, en este caso ANP.

En términos de la distribución de competencias, la LGEEPA, en la fracción X del Artículo 46, establece que las entidades federativas podrán establecer ANP. Dicho lo anterior, la legislación local de la Ciudad de México (CDMX), las contempla dentro de la Ley Ambiental de Protección a la Tierra en el Distrito Federal (LAPTFDF), con la misma definición de la LGEEPA agregando lo siguiente: áreas que, por sus características eco-geográficas, contenido de especies, bienes y servicios ambientales y culturales que proporcionan a la población, hacen imprescindible su preservación (Artículo 5 de LAPTFDF). En el caso de la CDMX, las categorías de las ANP y sus definiciones se encuentran establecidas en los Artículos 92 y 92 (bis; 1, 2, 3 y 4) de LAPTFDF, las cuales son:

- Zonas de Conservación Ecológicas: aquéllas que contienen muestras representativas de uno o más ecosistemas en buen estado de preservación y que están destinadas a proteger

los elementos naturales y procesos ecológicos que favorecen el equilibrio y bienestar social.

- Zonas de Protección Hidrológica y Ecológica: aquellas que se establecen para la protección, preservación y restauración de sistemas hídricos naturales, así como su fauna, flora, suelo y subsuelo asociados.
- Zonas Ecológicas y Culturales: aquellas con importantes valores ambientales y ecológicos, donde también se presentan elementos físicos, históricos o arqueológicos o se realizan usos y costumbres de importancia cultural .
- Refugios de vida silvestre: constituyen el hábitat natural de especies de fauna y flora que se encuentran en alguna categoría de protección especial o presentan una distribución restringida.
- Zonas de Protección Especial: aquellas que se localizan en suelo de conservación y que tienen la característica de presentar escasa vegetación natural, vegetación inducida o vegetación fuertemente modificada y que por su extensión o características no pueden estar dentro de las otras categorías de áreas naturales protegidas, aun cuando mantienen importantes valores ambientales.
- Reservas Ecológicas Comunitarias: aquellas establecidas por pueblos, comunidades y ejidos en terrenos de su propiedad destinadas a la preservación, protección y restauración de la biodiversidad y del equilibrio ecológico, sin que se modifique el régimen de propiedad.
- Las demás establecidas por las disposiciones legales aplicables.

La LGEEPA establece prohibiciones dentro de las ANP, como el arrojar, verter o descargar cualquier tipo de desechos orgánicos, residuos sólidos o líquidos o cualquier otro tipo de contaminante tales como insecticidas, fungicidas y plaguicidas, entre otros, al suelo o a cuerpos de agua (fracción XIV del Artículo 86 del Reglamento de la LGEEPA en Materia de Áreas Naturales Protegidas). Por lo que, de manera similar, la CDMX prohíbe las emisiones contaminantes al aire, agua, suelo y subsuelo, así como el depósito o disposición de residuos en las ANP (fracción IV del Artículo 93 bis 1 de la LAPTDF), así mismo queda prohibido el depósito de cascajo y de cualquier otro material proveniente de edificaciones (fracción IV del Artículo 88 bis 1 de la LAPTDF). No obstante, el Artículo 93 bis 1 de la LAPTDF establece las

acciones que se pueden llevar dentro del ANP, siendo: actividades de protección, preservación, restauración, forestación, reforestación y aprovechamiento sustentable y controlado de recursos naturales, investigación, educación ambiental, recreación y ecoturismo, por lo que si se considera dejar los residuos en las ANP puede haber un justificante de investigación científica. En caso de que la rehabilitación contemple lo establecido en la NOM-083-SEMARNAT-2003 o cualquier obra necesaria, los programas de manejo de las ANP permiten obras con orientación a la conservación del suelo y del agua, esto, con autorización de la Dirección General del Sistema de Áreas Naturales Protegidas y Áreas de Valor Ambiental, así mismo, se requiere de una manifestación de impacto ambiental de dichas obras (Artículo 48 de la LAPTDF).

Por otra parte, en términos del uso de especies de plantas para la rehabilitación en ANP existe una contraposición con la LGEEPA y la LAPTDF. Por una parte, la legislación de la CDMX establece que, para evitar el deterioro de la biodiversidad, no se permitirá el uso de especies que no sean nativas del ANP (fracción II del Artículo 85 de LAPTDF). Por otra parte, la LGEEPA en el inciso c) de la fracción II del Artículo 47 bis establece que en la subzonificación de *recuperación* podrán utilizarse para su rehabilitación, especies nativas de la región o en su caso, especies compatibles con el funcionamiento y la estructura de los ecosistemas originales cuando científicamente se compruebe que no se afecta la evolución y continuidad de los procesos naturales. Las clasificaciones de zonificación y subzonificación son instrumentos técnicos de planeación contemplados en la LGEEPA, la LAPTDF establece que en los decretos de las ANP de la CDMX se debe contar con una zonificación (fracción II del Artículo 94 de LAPTDF), no obstante, la ley estatal no define estos instrumentos, por lo que, como lo señala la LGEEPA, se ejercerá lo definido en su Artículo 47 bis referido a la zonificación y subzonificación de ANP. Dicho lo anterior, existe un marco normativo para la introducción de especies de plantas distintas a las del ecosistema, y de igual forma que con los residuos, debe de existir un sustento de carácter científico para implementar estas acciones de rehabilitación.

Por último, si una alternativa es dejar los residuos en un ANP, deben de tomarse en cuenta ciertas restricciones, especialmente la contaminación por sustancias peligrosas. Para ello, debe considerarse las normas oficiales para la caracterización de sitios contaminados como se indica en el Artículo 78 de la LGPGIR. El listado de normas oficiales (NOM) de carácter obligatorio y las Normas Mexicanas (NMX), que, especifican las técnicas aplicables y manejo de muestras para el análisis de suelos contaminados, se presentan en la tabla 4.1. Si se demostrará que existe

una contaminación del sitio por RP, el actuar en un ANP sería muy diferente a lo señalado anteriormente. La Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y las autoridades locales competentes, conforme al Artículo 75 de la LGPGIR, serán responsables de llevar a cabo acciones para identificar, inventariar, registrar y categorizar los sitios contaminados con residuos peligrosos, con objeto de determinar si procede su remediación, de conformidad con los criterios que para tal fin se establezcan en el Reglamento de la LGPGIR, esto último comprendido en su Título Sexto “Remediación de Sitios Contaminados”. Los sitios contaminados se clasifican en dos tipos: emergencias y pasivos ambientales, ambos deben de contar con un plan de remediación (Artículo 132 del reglamento de la LGPGIR). Las emergencias ambientales derivan de alguna circunstancia o evento, indeseado o inesperado, ocurre de manera repentina y trae como resultado la liberación no controlada, incendio o explosión de uno o varios materiales o residuos peligrosos que afecten la salud humana o el medio ambiente, de manera inmediata. Por otra parte, los pasivos ambientales son sitios contaminados por la liberación de materiales o residuos peligrosos, que no fueron remediados oportunamente para impedir la dispersión de contaminantes, pero que implican una obligación de remediación. El registro de los sitios se lleva a cabo en el Inventario Nacional de Sitios Contaminados elaborado por la SEMARNAT (Artículo 75 de la LGPGIR); así mismo, corresponde a la misma instancia desarrollar la publicación del Programa Nacional de Remediación de Sitios Contaminados (PNRSC), así como su ejecución y seguimiento (fracción I del Artículo 7 de la LGPGIR). Dentro del PNRSC, la SEMARNAT (2021) establece al depósito de residuos de manera irregular como una fuente de contaminación. En caso de que se demostrará que la ANP se encuentra contaminada por RP, la SEMARNAT puede participar en la remediación, ya que el sitio es propiedad de una entidad federativa (fracción XV del Artículo 29 del Reglamento Interior de la SEMARNAT) y las entidades federativas no siempre tienen la capacidad técnica o económica suficiente para llevar a cabo la remediación (SEMARNAT, 2021).

Tabla 4-1. Normatividad de carácter obligatoria en la gestión de sitios contaminados.

Normas Oficiales mexicanas que regulan la gestión de suelos contaminados	
	Temática
NOM-052- SEMARNAT-2005	Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.
NOM-053-SEMARNAT-1993	Que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.
NOM-133-SEMARNAT-2015	Protección ambiental - Bifenilos Policlorados (BPCs) - Especificaciones de manejo.
NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012	Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación.
NOM-147-SEMARNAT/SS-2004	Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.
Normas Mexicanas que aplican al análisis y muestreo de suelos contaminados	
	Temática
NMX-AA-134-SCFI-2006	Suelos – Hidrocarburos Fracción Pesada (FP) por extracción y gravimetría – método de prueba.
NMX-AA-145-SCFI-2008	Suelos - Hidrocarburos Fracción Media (FM) por cromatografía de gases con detector de ionización de llama – método de prueba.
NMX-AA-146-SCFI-2008	Suelos - Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP) por cromatografía de gases /espectrometría de masas (CG/EM) o cromatografía de líquidos de alta resolución con detectores de fluorescencia y ultravioleta visible.

Elaborado con datos del PNRSC de SEMARNAT (2021).

5 Caso de estudio: Sierra de Santa Catarina

La Sierra de Santa Catarina (SSC) pertenece al Cinturón Volcánico Mexicano, este cinturón sirve de unión entre la Sierra Madre Occidental y la Sierra Madre Oriental, recorriendo desde el Pacífico hasta el Golfo. La SSC se constituye por un conjunto de conos volcánicos de edades Cuaternarias (<20,000 años) con una extensión de 12 km y que forman una franja de 6 km de anchura con alturas relativas de 60 a 310 m, siendo el volcán Guadalupe el de mayor elevación (Lugo-Hubp *et al.*, 1994), el área de la SSC es de aproximadamente 2,166 ha (GODF, 2005). Los conos volcánicos que constituyen a la SSC se presentan en la figura 5.1, se observa que la secuencia de oeste-este las formaciones son el Yuhualixqui, Xaltepec, Tetecon, Mazatepec, Tecuatzi, Guadalupe y La Caldera. Todas las formaciones son conos de escoria, con excepción de La Caldera, el cual es un tipo maar con doble cráter, todas presentan pendientes de entre 30-40° (Torres, 2016). Las formaciones geológicas se encuentran al oriente de la Ciudad de México (CDMX) entre los límites de las alcaldías Iztapalapa y Tláhuac, la única formación que pertenece al Estado de México es La Caldera.

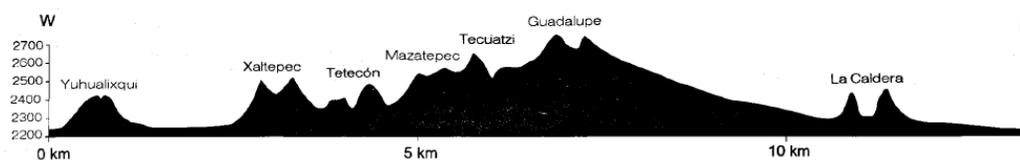


Figura 5.1 Perfil longitudinal de la Sierra de Santa Catarina. Imagen de Lugo-Hubp *et al.* (1994)

El clima de la SSC se identifica como semiseco con lluvias en verano según la clasificación de Köppen (GODF, 2005) o templado subhúmedo con lluvias en verano según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2001). En temporadas de lluvias se presentan ríos y canales intermitentes, se estima que en esta temporada la SSC logra infiltrar hasta 50% de la lluvia (GODF, 2005). Por otra parte, en época de sequía se presenta una gran actividad erosiva, resultado de la alta permeabilidad del sustrato, la pérdida de humedad y del intemperismo de los materiales (GODF, 2005).

Acorde al Programa de Manejo del ANP SSC, GODF (2005) identifica los tipos de suelo presentes en el área según la clasificación de la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo de la FAO. Los suelos del sitio son característicos de materiales parentales con intemperismo corto en escala geológica, del déficit hídrico de la zona y las altas pendientes, como los regosoles que son suelos delgados de origen reciente, desarrollados a partir de materiales no consolidados,

también se identifican litosoles, que son suelos con espesores menores a 10 cm sobre afloramientos rocosos, solonchak, suelos característicos de zonas áridas y semiáridas con mal drenaje y se acumulan sales solubles en ellos, por último, en ciertas zonas bajas donde las pendientes son menores, principalmente en la zonas bajas de Tláhuac, se encuentran suelos faozem, los cuales, son suelos bien desarrollados, ricos en materia orgánica y nutrientes en su capa superficial.

Todas las características propias de la SSC han definido la vegetación del sitio, el cual, se encuentra cubierto principalmente por matorral xerófilo y pastizal donde habitan cerca de 241 especies de plantas (GODF, 2005), destacando la presencia de especies nativas de la CDMX (90.5% de la especies son nativas), como el palo dulce (*Eysenhardtia polystachya*), sumaco (*Rhus standleyi*) y membrillo cimarrón (*Condalia mexicana*) (GODF, 2005). También resalta la presencia de especies vegetales, que, conforme la normatividad mexicana para la protección de especies (NOM-059-SEMARNAT-2010), se encuentra el cedro blanco (*Cupressus lusitanica*) que se encuentra bajo la categoría de *sujeta a protección especial*.

En cuanto a fauna, la SSC resulta un importante albergue de especies, se tiene registro de 2 anfibios, 14 de reptiles, 30 de aves (GODF, 2005) y 28 mamíferos (Márquez-Villalba *et al.*, 2023). Resulta destacable que cierta fauna de la SSC también se encuentra bajo alguna categoría de riesgo de la NOM-059-SEMARNAT-2010. En cuanto a reptiles la lagartija cornuda de montaña (*Phrynosoma orbiculare*); la culebra sorda mexicana (*Pituophis deppei*) y la culebra listonada del sur mexicano (*Thamnophis eques*) se encuentran en la categoría de *amenazadas*, el lagarto alicante del Popocatepetl (*Barisia imbricata*); lagartija escamosa de mezquite (*Sceloporus grammicus*); víbora de cascabel (*Crotalus molossus*); cascabel pigmea mexicana (*Sistrurus ravus*) y culebra parchada de Baird (*Salvadora bairdi*) se encuentran *sujetas a protección especial*. Respecto a mamíferos una actualización del listado de mamíferos hecha por Márquez-Villalba *et al.*, (2023) y los datos de GODF (2005), indican la presencia de la musaraña desértica nortea (*Notiosorex crawfordi*) y el murciélago trompudo (*Choeronycteris mexicana*), el murciélago magueyero menor (*Leptonycteris yerbabuena*), murciélago hocicudo (*Leptonycteris curasoae*) y la rata canguro de Phillip (*Dipodomys phillipsii*), las primeras cuatros son especies *amenazadas* y la última *sujeta a protección especial*. Entre las aves, destacan el halcón peregrino (*Falco peregrinus*) y el clarín jilguero (*Myadestes occidentalis*), ambos *sujetos a protección especial*; y el Chipe de Tolmiei (*Oporornis tolmiei*), que se registra

como *amenazada*. Además, con la urbanización, existen especies de mamíferos que se han adaptado a los ambientes urbanos como el cacomixtle (*Bassariscus astutus*) (Castellanos & List, 2005) su presencia se encuentra registrada en el sitio (Pérez-Hernández & Martínez-Coronel, 2023), no obstante, existen especies que han causado afectaciones al ecosistema debido a las perturbaciones antropogénicas, como la aguililla cola roja (*Buteo jamaicensis*) y la tuza (*Cratogeomys merriami*) (GODF, 2005).

Lo anteriormente mencionado convierte a la SSC un sitio de resguardo de especies nativas, vegetales y animales, así mismo, juega un papel importante en la provisión de servicios ecosistémicos, como el abastecimiento y regulación de la calidad del agua, regular la calidad de aire, ser un espacio destinado a la recreación de servicios culturales (GODF, 2005), así como ser un ecosistema con grandes intereses para la investigación científica (Márquez-Villalba *et al.*, 2023; Pérez-Hernández & Martínez-Coronel, 2023). La SSC desde el siglo XX sufrió una fuerte erosión por la minería (Lugo-Hubp *et al.*, 1994) y el crecimiento poblacional por la venta ilegal de tierras (GODF, 2005), poniendo en riesgo las funciones del ecosistema. Debido a lo anterior en 2000 y 2003 surgieron decretos que establecen 14 polígonos como ANP en la categoría de Zona de Conservación Ecológica (GODF, 2000; GODF, 2003) ocupando 748.55 ha del área total de la SSC, 60% en la alcaldía Iztapalapa (450 ha) y 40% en la alcaldía Tláhuac (298 ha) (GODF, 2005), los polígonos de ANP de la SSC se presentan en la figura 5.2.



Figura 5.2 Polígonos de Área Natural Protegida de la Sierra de Santa Catarina. Elaborado con datos del Instituto de Planeación Democrática y Prospectiva (2022)

6 Metodología

6.1. Base de datos georreferenciada y comprensión de la evolución de la contaminación

Mediante imágenes satelitales de la aplicación Google Earth se identificaron aquellos posibles tiraderos presentes en los polígonos de ANP. Los posibles tiraderos se cotejaron con la base de datos proporcionada por personal de la SEDEMA del ANP y por recorridos en campo de algunos de los sitios realizados en noviembre del 2023. La metodología para la obtención de datos se presenta en la figura 6.1. Los datos finales fueron georreferenciados en el software QGIS 3.20, además se descargaron archivos .shp de los polígonos de ANP y suelo de conservación del Portal de Datos Abiertos de la CDMX (ver sitio web: <https://datos.cdmx.gob.mx/>) para complementar la visualización del mapa de tiraderos.

En el caso de la comprensión de la evolución de la contaminación del sitio se usó el motor de búsqueda Google y para textos científicos Google Scholar. Distintos documentos se contemplaron como: artículos científicos, documentos emitidos por el Gobierno de la CDMX y notas periodísticas. Dada la escasez de información bibliográfica no se definió un intervalo para la búsqueda, las palabras clave usadas fueron: *Sierra de Santa Catarina, Área Natural Protegida, Iztapalapa, Tláhuac, tiraderos y minería*.

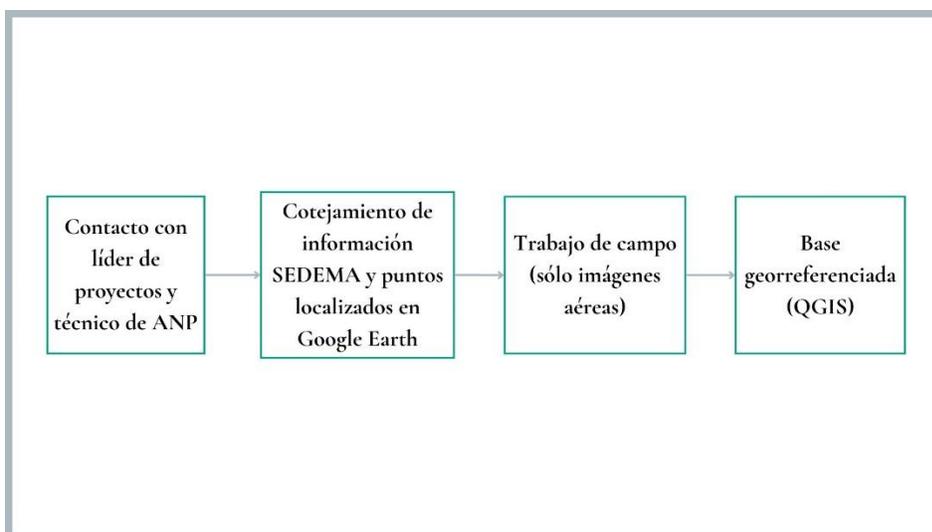


Figura 6.1 Metodología seguida para la identificación y georreferenciación de tiraderos clandestinos. Elaboración propia.

6.2. Propuesta

Las propuestas de rehabilitación ambiental fueron apegadas a los resultados obtenidos en la subsección anterior. Distintos motores de búsqueda fueron empleados para la búsqueda de estrategias para la rehabilitación del sitio, los sitios fueron: Google Scholar, Elsevier, Springer, Scielo y Research Gate. El intervalo de tiempo definido fue de 2013-2023, usando las siguientes palabras clave: *remediation, rehabilitation, restoration, landfill, leaching, methane, urban wastes, construction and demolition wastes*.

7 Resultados y discusión

7.1. Base de datos georreferenciada y comprensión de la evolución de la contaminación

En el Programa de Manejo del ANP SSC, GODF (2005) se describe como los asentamientos urbanos llegaron a la SSC; la actividad agrícola de la zona y la explotación de la SSC como banco de materiales de la construcción (arena, grava, tezontle, gravilla y balastro) fueron las actividades previas responsables de la apertura de caminos a avenidas principales como la Calzada Ermita Iztapalapa y el aclareo de la zona. Desde el siglo XX la SSC estuvo expuesta a diversos impactos ambientales debido a estas dos principales actividades. Los impactos de la agricultura fueron la pérdida de vegetación; repercutiendo en la pérdida de humedad del suelo y su infiltración, así como la pérdida de la fauna. La minería modificó el patrón de escurrimiento superficial por extracción de material litológico y disminución en la filtración del agua al subsuelo, lo que repercutió en la pérdida de la capa fértil del suelo y, por lo tanto, la cubierta vegetal (GODF, 2005).

Los caminos debido a las actividades descritas repercutieron en la venta ilegal de las tierras a bajo precio (GODF, 2005) permitiendo el establecimiento de asentamientos urbanos. A pesar de su decreto como ANP en los inicios de los años 2000, la mancha urbana de la CDMX no logró ser frenada, principalmente en la zona de Iztapalapa, donde las invasiones al ANP siguen siendo una problemática de la SSC, en este sentido, la Procuraduría de Ambiental y del Ordenamiento Territorial de la CDMX (PAOT) (2009), en su documento Estudio Sobre la Superficie Ocupada en Áreas Naturales Protegidas de la CDMX, se identifican a las colonias que ejercen presión sobre el ANP, los asentamientos son: La Estación, López Portillo, Ampliación Selene, Guadalupe Tlaltenco, Barrio Concepción, Huizico, Loma de la Estancia, Los Tenorios, Buenavista, Santa Ana Zapotitlán, Zapotitlán, San José Buenavista, Barrio San Miguel, las cuales, pertenecen a la alcaldía Iztapalapa y Tláhuac, las cuales, estarían ocupando una superficie de 33.12 hectáreas del total del ANP. Debido a lo anterior, resulta inseparable el medio ambiente del sistema social, por lo que Suárez (2022) identifica problemas socioambientales en la zona, tales como el desplazamiento de los sistemas agroforestales de autoconsumo y la pérdida de recursos hídricos debido a la minería, esta última actividad también repercutió en la salud de la población según detalla el mismo autor.

En la actualidad deben sumarse las afectaciones socioambientales por los tiraderos clandestinos de la SSC, debido a que esta actividad creció junto con los asentamientos urbanos. Desde la generación del Programa de Manejo en el año 2005 se identifica la presencia de residuos en la zona (GODF, 2005), no obstante, esta problemática no ha sido descrita de manera formal. En este sentido, la única información oficial proviene de un informe del Congreso de la Ciudad de México (2022), en el que se tiene un reporte de 21 tiraderos en la zona de la SSC, específicamente en los polígonos de ANP, en dicho documento se recomienda de manera urgente a la recuperación de los sitios. Dicha publicación reporta cifras correspondientes a una nota periodística del Sol de México realizada por Mendoza (2020); sin embargo, en ambos documentos, no se reporta la ubicación específica de los mismos, haciendo mención exclusivamente a tiraderos ubicados en la colonia San Pablo. En la búsqueda bibliográfica se encontró que desde el año 2018 se empezó a reportar esta problemática de la SSC. El reporte realizado por Ramírez (2018) identifica solamente el tiradero ubicado en las afueras del Parque Ecológico Corrales (más adelante identificado como T10), del cual, según el autor, los vecinos han reportado desde hace 30 años conforme la fecha de publicación del artículo. En este sentido, se estima que la problemática de los tiraderos se agravó en el último cuarto del siglo XX (NotimexTV, 2018). Conforme las observaciones en campo (ver figura 7.1), los tiraderos de mayor relevancia (T1 y T15), en su mayoría, se presentan en los espacios abiertos abandonados por la minería del siglo XX, pero también se encuentran en las pendientes naturales de la SSC (T19 y T20), ambos propiciados por el desmedido crecimiento poblacional, resultado del crecimiento de la CDMX y falta de presencia de las autoridades en la zona en la décadas finales del siglo XX, pero también existen tiraderos eventuales en zonas urbanas y de no tan grande relevancia comparado con los ya mencionados, siendo el caso de T10.

Por otra parte, resulta importante señalar que la base de datos proporcionada por el personal de la SEDEMA no es pública, dicha base contaba con coordenadas de 13 tiraderos ubicados en distintas zonas de la Sierra, principalmente ubicados en la colonia San Miguel Teotongo. Por otra parte, en los datos recopilados mediante Google Earth, se observó la presencia de grandes tiraderos en la colonia San Pablo. Dichos tiraderos no eran contemplados por la SEDEMA, debido a que las autoridades llevan el registro exclusivamente de tiraderos con presencia de RCD (comúnmente denominado cascajo). Quitando este criterio se logró identificar 9 tiraderos más dentro del polígono de ANP, teniendo un total de 22 tiraderos con presencia en distintas

colonias, principalmente en la alcaldía Iztapalapa.



Figura 7.1 Comprensión de la evolución de la contaminación por tiraderos clandestinos

Dicho lo anterior en la tabla 7.1 se presentan las coordenadas de las ubicaciones de los 22 tiraderos en coordenadas de latitud y longitud. En la tabla 7.2 se presentan los atributos asignados a cada tiradero, estos fueron: código de identificación asignado a cada sitio (ID), alcaldía en la que se encuentra, colonia, tipo de SDF (pudiendo ser tiradero de RCD, RSU o presencia de ambos residuos), presencia del tiradero en suelo natural o sellado (se considera aquellos suelos pavimentados o hechos de concreto) y tipo de protección del suelo (conservación o ANP). Los tiraderos reportados por SEDEMA corresponden de T1 a T13, los identificados conforme la metodología previamente descrita son los T14 a T22. Por último, el mapa de la base de datos de los tiraderos presentes en la SSC se presenta en la figura 7.2, se observa que todos los tiraderos se encuentran justo en el límite de las zonas de ANP con los asentamientos urbanos, predominando los tiraderos en el lado norte de la Sierra (alcaldía Iztapalapa). Las fotografías aéreas tomadas en campo se presentan en el Anexo 1.

Resulta importante señalar que en la mayoría de los tiraderos considerados por SEDEMA, si bien predominan los RCD, la combinación de residuos es múltiple y el criterio usado por la SEDEMA debe de ser descartado. También ciertos espacios contabilizados por el gobierno no

caen dentro de los polígonos de ANP (T6, T10 y T20), no obstante, al pertenecer al suelo de conservación resulta importante su consideración. En este sentido, resulta cuestionable los datos reportados por la CDMX, se menciona que 55 % de los tiraderos se encuentran en suelos de conservación (PAOT, 2010), sin embargo, como se observa en la figura 7.2 el crecimiento demográfico ha asfixiado a estos suelos, principalmente en Iztapalapa, los cuales, ya no están cumpliendo con su función ecológica de brindar servicios ambientales (Artículo 5 de LAPTFDF), por lo que esto debe de ser tomado en cuenta en el Programa General de Ordenamiento Ecológico del Distrito Federal; cambiando su uso de suelo a habitacionales y mejorar los datos de tiraderos reportados.

Tabla 7-1. Georreferenciación de tiraderos de la Sierra de Santa Catarina.

ID de Tiradero (T)	Latitud	Longitud
T1	19.332323	-99.011471
T2	19.332793	-99.011614
T3	19.333778	-99.009453
T4	19.336851	-98.988442
T5	19.335531	-98.988480
T6	19.335251	-98.986804
T7	19.339273	-98.993706
T8	19.338134	-98.993611
T9	19.338297	-98.994763
T10	19.335893	-98.992897
T11	19.325209	-98.972839
T12	19.321367	-98.969575
T13	19.330714	-98.982463
T14	19.333945	-99.010111
T15	19.331207	-99.005933
T16	19.33213	-99.002922
T17	19.332421	-99.002815
T18	19.333643	-99.002625
T19	19.335482	-99.002197
T20	19.335522	-99.001934
T21	19.332835	-99.000946
T22	19.330385	-98.995573

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7-2. Atributos asignados a los tiraderos de la Sierra de Santa Catarina.

ID	Alcaldía	Colonia	Tipo de SDF	En suelo	Protección del suelo
T1	Iztapalapa	Xalpa	RCD	Natural	ANP
T2	Iztapalapa	Xalpa	RCD y RSU	Natural	ANP
T3	Iztapalapa	Lomas de la estancia	RCD	Natural	ANP
T4	Iztapalapa	San Miguel Teotongo	RCD	Natural	ANP
T5	Iztapalapa	San Miguel Teotongo	RCD	Natural	ANP
T6	Iztapalapa	San Miguel Teotongo	RCD	Natural	Conservación
T7	Iztapalapa	San Miguel Teotongo	RCD	Natural	ANP
T8	Iztapalapa	San Miguel Teotongo	RCD	Natural	ANP
T9	Iztapalapa	San Miguel Teotongo	RCD	Natural y sellado	ANP
T10	Iztapalapa	San Miguel Teotongo	RCD y RSU	Natural y sellado	Conservación
T11	Tláhuac	Las cruces	RCD	Natural	ANP
T12	Tláhuac	Los 500 metros	RCD	Natural	ANP
T13	Iztapalapa	Ampliación E. Zapata	RCD	Natural	ANP
T14	Iztapalapa	Lomas de la estancia	RCD y RSU	Natural	ANP
T15	Iztapalapa	Lomas de la estancia	RCD y RSU	Natural	ANP
T16	Iztapalapa	San Pablo	RCD	Natural	ANP
T17	Iztapalapa	San Pablo	RCD y RSU	Natural	ANP
T18	Iztapalapa	San Pablo	RCD y RSU	Natural	ANP
T19	Iztapalapa	San Pablo	RSU	Natural y sellado	ANP
T20	Iztapalapa	San Pablo	RSU	Natural	Conservación
T21	Iztapalapa	Miravalle	RCD	Natural	ANP
T22	Iztapalapa	Ixtlahuacán	RCD	Natural	ANP

Elaboración propia.

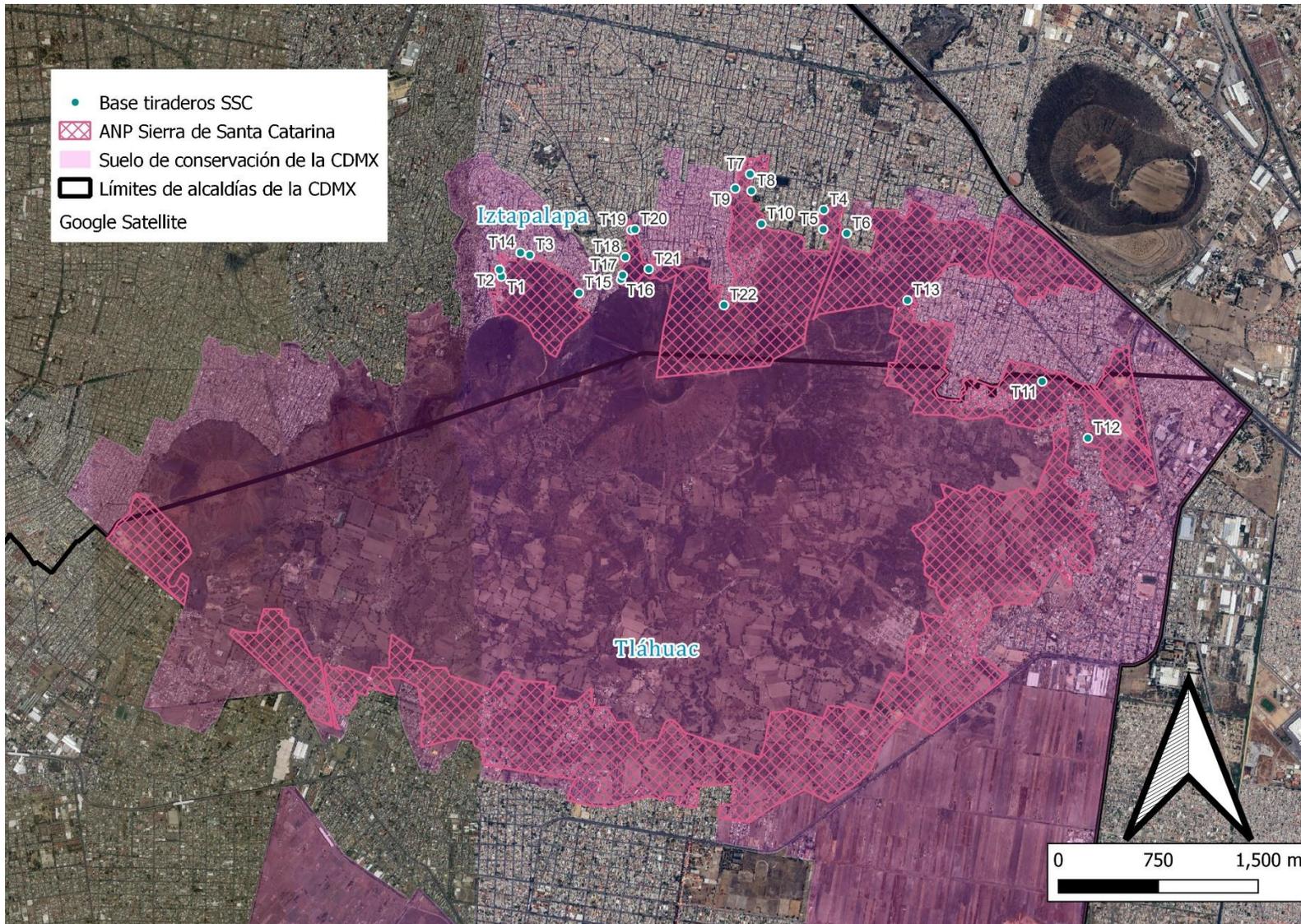


Figura 7.2 Mapa de los tiraderos de la Sierra de Santa Catarina. Elaboración propia

7.2.Propuesta

En la búsqueda bibliográfica se identificó un proyecto de rehabilitación de tiraderos en la Unión Europea, el proyecto SMARTENVI “Smart Decision Tools for Reducing Hazards to Our Environment and Water Resources by Rehabilitating Open Dumps” de la Universidad Técnica de GEBZE (ver sitio web del curso SMARTENVI: <https://gtuzem.gtu.edu.tr/UE2/course/view.php?id=22253&lang=ro>) identifica dos tipos de rehabilitación: *in situ* y *ex situ*. El primer tipo de rehabilitación se lleva a cabo en sitios que han sido abandonados o en sitios que siguen funcionando como tiraderos, en este caso, las obras que se realizaran contemplan dejar los residuos en el sitio. La rehabilitación del segundo tipo consiste en retirar y transportar los residuos a un RS, es recomendada cuando se presentan los siguientes criterios: las cantidades de residuos son pequeñas; si existen SDF autorizados cercanos al sitio; si el tiradero se encuentra en un área de protección ambiental o cuando el nivel freático se encuentra cercano a los residuos.

En ambas técnicas de rehabilitación la situación actual de los siguientes aspectos debe de ser evaluada: planes anteriores y actuales del sitio, estudios geológicos e hidrogeológicos, tipo y cantidad de residuos. Para el caso de la rehabilitación *in situ* son necesarias las obras de estabilización de taludes, construcción de terraplenes, sistema de drenaje del agua superficial, sistemas de drenaje de biogás y lixiviados, cobertura final, obras paisajísticas y de caminos. Debido a lo anterior el proyecto SMARTENVI recomienda un análisis de viabilidad económica entre el transporte de residuos, su separación (opcional) y su disposición adecuada contra las obras necesarias en la rehabilitación *in situ*.

En el caso de la SSC, los 22 tiraderos se encuentran, por lo general, en sitios con pendientes pronunciadas, además de encontrarse en colonias que tienen forma de plato roto (GODF, 2014). Al encontrarse en ANP se tiene que abogar por una rehabilitación *ex situ*, es decir, transportar los residuos a SDF autorizados. Para el caso de la CDMX, los RS con los que cuenta la ciudad, conforme el Inventario de Residuos Sólidos de SEDEMA (2022), además del precio de disposición por tonelada, son los siguientes: la Cañada y el Milagro, ambos en Ixtapaluca; Bicentenario en Cuautitlán y Naucalpan en el municipio del mismo nombre, todos los municipios pertenecientes al Estado de México con un costo de \$182.62, por último, se cuenta con la Perseverancia en Cuautla, Morelos con un costo de \$95. Por lo que contemplar, la rehabilitación *ex situ* conllevaría cuantificar el costo asociado a la disposición en alguno de

estos sitios, a la extracción de los residuos, además de evaluar el tipo de vehículos usados para el transporte, esto último debido a las calles angostas en los que los tiraderos se encuentran.

En el caso de contemplar la rehabilitación *in situ*, mediante el análisis del marco jurídico (ver sección 4) se puede concluir que los residuos pueden ser dejados en las ANP siempre y cuando haya un sustento del carácter científico, esto podría ser argumentado por el estudio de nuevas técnicas de rehabilitación de SDF. En la búsqueda bibliográfica se identificaron alternativas a las coberturas convencionales, denominadas fitocapas, así mismo, se identificó el estudio de técnicas para la rehabilitación de suelos afectados por RCD: los tecnosuelos (ambas técnicas presentadas en la subsección 3.3), por lo que estrategias de investigación deben de ser propuestas en caso de requerir una rehabilitación *in situ*.

Se determinó un diagrama de flujo para ayudar la toma de decisión sobre el tipo de estrategia seguida según la viabilidad de dejar los residuos, también se tomó en cuenta la contaminación por residuos peligrosos (ver figura 7.3). El inicio de toma de decisión para un SDF en un ANP consiste primero en determinar el grado de contaminación en el suelo, esto con el objetivo de minimizar las afectaciones a la población y al ecosistema en dado caso de contemplar una rehabilitación del tipo *in situ*, para este caso se recomienda seguir la Guía Técnica para Orientar la Elaboración de Estudios de Caracterización de Sitios Contaminados de SEMARNAT (2010). En caso de que los contaminantes rebasen los límites permisibles según el marco jurídico para RP (ver sección 4) estrictamente los residuos deben de ser retirados y ser sujetos a planes de manejo (Artículo 31 de la LGPGIR), además de contemplar una remediación del sitio (Artículo 132 del reglamento de la LGPGIR), ya sea física, química o biológica del sitio, según el contaminante y su concentración. Posterior a esto, si se busca una recuperación de servicios ecosistémicos se puede iniciar con la rehabilitación ambiental, contemplando primero una óptima composición del suelo para la regeneración progresiva del ecosistema, esto puede ser logrado con los tecnosuelos construidos.

Un tecnosuelo se define como un suelo que contienen más del 20% de *artefactos* (algo en el suelo reconociblemente hecho o extraído de la tierra por el hombre), por volumen y se encuentran dentro de los primeros 100 cm de la superficie terrestre (FAO, 2008), estos pueden ser construidos donde la existencia del suelo es prácticamente nula (Seré *et al.*, 2008) y ser diseñados específicamente para el soporte de vegetación, con ello una recuperación de los servicios ecosistémicos (Morel *et al.*, 2015), logrando una rehabilitación ambiental (Gann *et al.*,

2019). La construcción de tecnosuelos, como se indica en la figura 7.3, también es contemplada en aquellos sitios donde los RCD predominan, aprovechando su potencial como componente

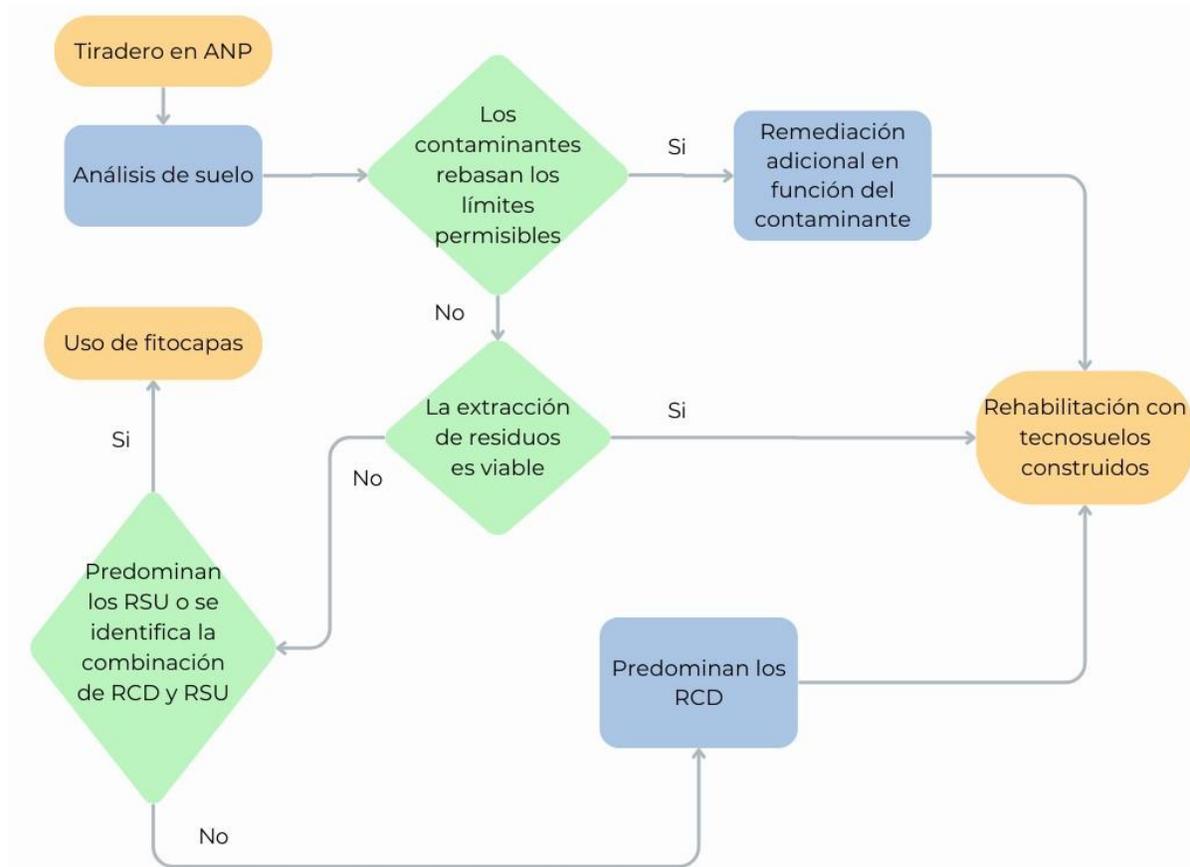


Figura 7.3 Diagrama de flujo para la selección del tipo de rehabilitación en un Área Natural Protegida. Elaboración propia.

inorgánico en el tecnosuelo en caso de que técnica y económicamente no sea posible su extracción.

Por otra parte, en caso de que los RSU sean los predominantes, la extracción de residuos no sea viable y no haya contaminación por RP, se propone el uso de fitocapas como cobertura final, lo que minimizaría la generación de lixiviados y mitigaría la generación de biogás (Lamb *et al.*, 2014), además la SSC cumple con una condición de éxito, conforme lo descrito por Lamb *et al.*, (2014) quienes describen que el éxito será mayor cuando en la ubicación del SDF, la evapotranspiración supere a las precipitaciones. Conforme al Programa de Manejo de la SSC, la zona se manifiesta en un déficit hídrico, debido a que la evaporación supera a la precipitación en la mayoría de los meses del año (GODF, 2005), por lo que los tiraderos de la SSC pueden ser sujetos a investigación en este campo de estudio.

Para el caso de ambas técnicas propuestas para la rehabilitación *in situ*, otras obras ingenieriles conocidas deben de ser contempladas, tales como: la estabilización de taludes, construcción de terraplenes, sistema de drenaje del agua superficial, de biogás y de lixiviados. En el caso de las fitocapas, si bien la literatura reporta que se logra una disminución en la generación de lixiviados, como es bien sabido, esto es un proceso inherente del proceso de descomposición de los residuos (SEMARNAT, 2018), por lo que una correcta rehabilitación *in situ* debe de ser acompañada de algún sistema de impermeabilización en la interfase residuos-suelo que cumpla la NOM-083-SEMARNAT-2003.

La propuesta contempla en su etapa inicial un análisis de suelo previo a cualquier actividad, como se indica en la figura 7.4, esto con el fin de disminuir el riesgo de dejar los residuos. Posterior a esto, cualquiera de las técnicas de rehabilitación, conlleva el realizar estudios geológicos, hidrogeológicos, topográficos y geotécnicos contemplados en la NOM-083-SEMARNAT-2003, con el fin de prevenir cualquier afectación negativa al medio ambiente. También, debe de ser realizado un análisis minucioso sobre los aspectos económicos y técnicos de las propuestas presentadas.

Finalmente, es importante plasmar en este trabajo, que la SSC no sólo se afronta a la problemática socioambiental de los tiraderos, existen más problemas identificados en los polígonos de ANP y en sus colindancias, como problemas en el ordenamiento territorial, descargas de aguas residuales directas a polígonos de ANP y fuera de estos, falta o nula información técnica del sitio, por último, las desigualdades sociales. Debido a lo anterior un esquema sustentable debe de ser propuesto, ya que el simple hecho de generar una rehabilitación ambiental del sitio no significa una erradicación total de la problemática socioambiental. En la figura 7.4 se presenta un esquema de manejo que abarca el sector social, económico y ambiental que podría ayudar al manejo de la problemática. Dicho esquema se basa en la identificación de áreas de oportunidad de mejora en la SSC: la rehabilitación ambiental, la gobernanza, el manejo comunitario, el ordenamiento territorial, la generación de espacios de calidad y la promoción de la salud, el bienestar y la disminución de riesgos. Como se observa en la figura 7.4, las seis áreas identificadas se interconectan mediante acciones, la descripción detallada de estas últimas se presenta en la tabla 7.3. Resulta importante de señalar que no hay un área estratégica más importante que otra, la realización de una acción abarca dos o más de ellas, por lo que lograr la rehabilitación o restauración ambiental, según convenga, se basa en que todas las áreas tienen

la misma prioridad y no deben de ser descartadas en planes futuros en pro de la mejora del medio ambiente y el contexto social de la SSC. Como se observa en la figura 7.4, existen solo tres acciones que se interconectan, debido a lo explicado en torno al diagrama de flujo para la toma de decisiones (ver figura 7.3).

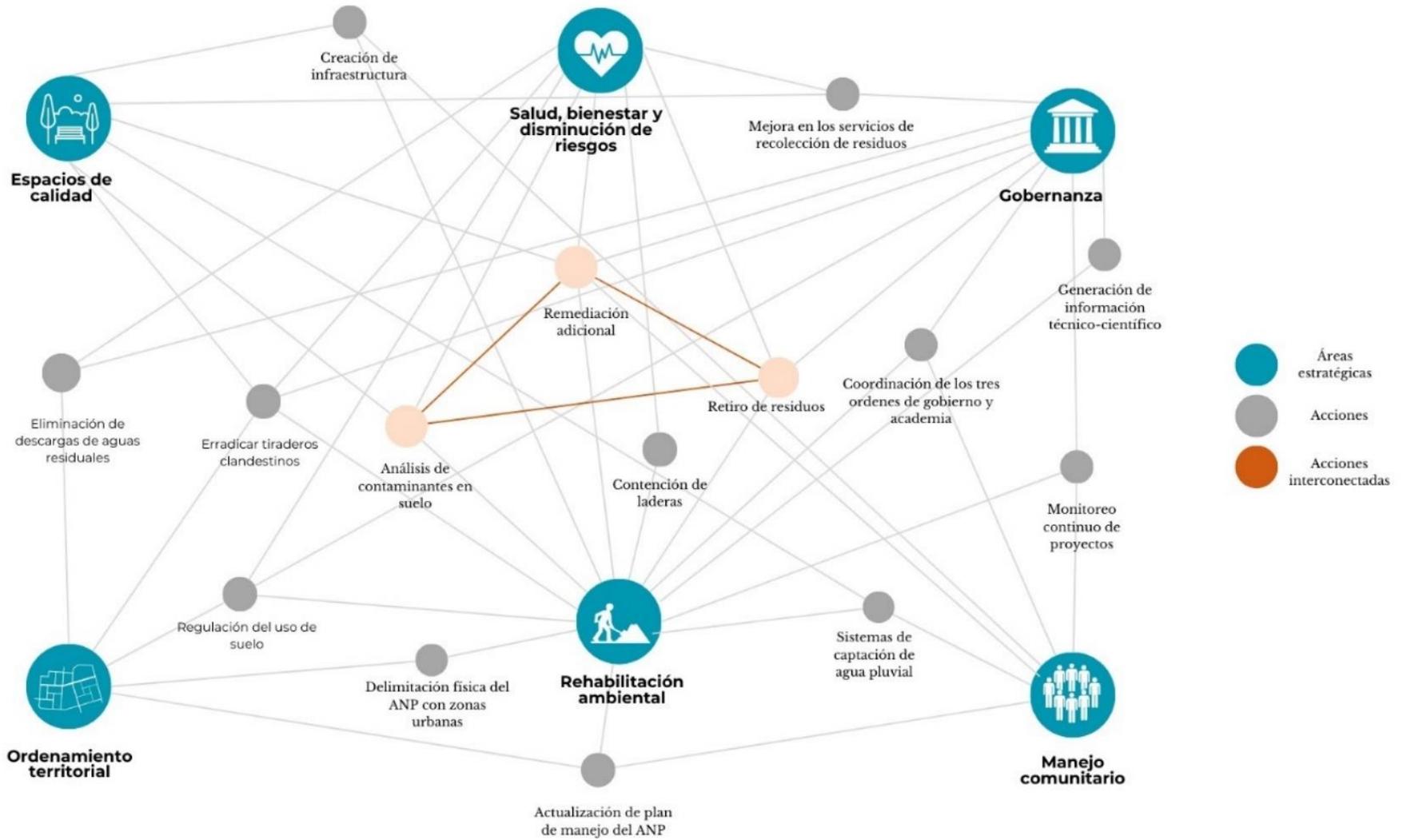


Figura 7.4 Áreas y acciones contempladas para una rehabilitación ambiental para la Sierra de Santa Catarina. Elaboración propia

Tabla 7-3. Descripción de las acciones propuestas

Acciones	Descripción
Eliminación de descargas de aguas residuales	Se identificaron descargas directas de agua pluvial y agua negra en los polígonos de ANP: en la mayoría de los casos existe la infraestructura para eliminarlas, no obstante, ciertos asentamientos al encontrarse en zona de ANP no son conectados a la red sanitaria.
Erradicar tiraderos clandestinos	Eliminar los 22 tiraderos actuales mediante la rehabilitación o restauración del sitio conllevaría un continuo monitoreo del sitio para la prevención de la formación de otros sitios.
Regulación del uso de suelo	Las afectaciones por asentamientos urbanos al suelo de conservación y al ANP son claras, por lo que los usos de suelo deben de ser actualizados a suelos habitacionales. En caso de considerar el desalojo y demolición de las construcciones, el gobierno local y de la CDMX debe de generar estrategias para la reubicación de los habitantes.
Delimitación física del ANP con zonas urbanas	Se identificó la falta de control de accesos a los polígonos de la SSC. Delimitar la zona con barreras físicas, como enrejados, debe de ser prioritario para cualquier acción de restauración y conservación del sitio, sobre todo para impedir el acceso e impedir la disposición ilegal de residuos.
Actualización de plan de manejo del ANP	El Programa de Manejo de la SSC es del año 2005, en dicho programa se generaron acciones en el corto, mediano y largo plazo que no han sido conseguidas, así mismo, no contempla la invasión del ANP, ni genera estrategias para el caso de los tiraderos. En el mismo sentido, se debe de contemplar los cambios de uso de suelo que se han originado.
Sistemas de captación de agua pluvial	Con relación a las descargas pluviales, este tipo de agua puede aprovechar como riego para proyectos de restauración y así evitar el costo asociado al mantenimiento.

Acciones	Descripción
Contención de laderas	Ciertas casas colindantes con los polígonos se encuentran en pendientes, muchas de ellas expuestas a posibles derrumbes, por lo que generar infraestructura civil debe de ser contemplado.
Creación de infraestructura	La generación de infraestructura debe contemplar la creación de sitios de esparcimiento, barreras físicas (cercados) para la protección del ANP, sistemas de riego, diseño de espacios verdes y demás que mejoren el medio social y ambiental.
Mejora en los servicios de recolección de residuos	Los tiraderos proliferan por una mala gestión y manejo de residuos, por lo que se debe analizar aspectos como el número de camiones asignados en el macroruteo de la zona, frecuencia de recolección, al igual proponer cambios en el tipo de recolección, así como un aumento en el personal de barrido.
Coordinación de los tres órdenes de gobierno y academia	Las problemáticas abarcan a las alcaldías por el tema de residuos y descargas de agua, las de protección al ANP a la CDMX por conducto de la SEDEMA, así mismo el ordenamiento territorial debe de ser concurrente entre las alcaldías y la CDMX conforme la Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano.
Generación de información técnico-científico	La generación de conocimiento resulta fundamental para el desarrollo de estrategias integrales. Estudios futuros son necesarios para la correcta rehabilitación de la SSC. Se identifican los siguientes aspectos como posibles temas de investigación: contaminación del suelo, caracterización y cantidad de los residuos en los tiraderos, así como estudios geológicos e hidrogeológicos.
Monitoreo continuo de proyectos	Los proyectos realizados en la SSC deben de ser monitoreados continuamente, para lograr la erradicación completa de la problemática socioambiental, esto puede ser optimizado por medio de esquemas de manejo comunitario, es decir, involucrar a la sociedad con su entorno.

Elaboración propia.

8 Conclusiones

La Sierra de Santa Catarina brinda múltiples servicios ecosistémicos a los habitantes de la CDMX. No obstante, desde el siglo XX estuvo expuesta a actividades mineras, modificando los ecosistemas drásticamente. Actualmente, se encuentra presionada por el mal manejo de residuos de la CDMX junto con el crecimiento urbano derivado de una mala planeación del ordenamiento territorial y su cumplimiento. Mediante las imágenes satelitales se observó que los asentamientos urbanos de la Alcaldía Iztapalapa se encuentran en suelos de conservación y en zonas de ANP, contraponiendo lo estipulado en la Ley Ambiental para la Protección de la Tierra de la CDMX. Así mismo, fueron identificados veintidós tiraderos dentro de los polígonos de ANP, veinte de ellos se encuentran en la alcaldía Iztapalapa y dos en Tláhuac, los residuos que los componen se aprecian como RSU y RME, que de igual forma su presencia contrapone la legislación para la protección de las ANP de la CDMX. Estos datos contraponen lo dicho en el Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de Residuos, en donde se indica que el 100% de los RSU son recolectados, encontrando que en la SSC existen fugas de residuos de este tipo.

Las propuestas para la recuperación de servicios ecosistémicos se basan en dos técnicas usadas para la rehabilitación ambiental *in situ*: las fitocapas y los tecnosuelos construidos. La aplicación de las propuestas dependerá del tipo de residuo que predomine en cada tiradero. Si se identifica un mayor contenido de RSU, incluso cuando este combinado con RME, se debe de abogar por el uso de la primera técnica, en caso contrario, es decir, cuando los RME predominen, la segunda técnica debe de ser empleada. Ambas técnicas deben de considerar obras civiles convencionales como: la estabilización de taludes, la construcción de terraplenes, sistemas de drenaje del agua superficial, de biogás y de lixiviados.

Lo anterior resulta de contemplar una rehabilitación que consiste en dejar los residuos en el ANP, en este caso, las acciones deben de estar sustentadas estrictamente por análisis de suelos en los que se demuestre que el sitio no se rebasan los límites permisibles de sustancias y residuos peligrosos, ayudándose la Guía Técnica para Orientar la Elaboración de Estudios de Caracterización de Sitios Contaminados de SEMARNAT (2010), si la contaminación fuera positiva, adicionalmente deben de ser consideradas acciones de remediación, además de tratar a los residuos del sitio como peligrosos, la propuesta, en caso de que lo anterior ocurriera, sería

la posterior construcción de tecnosuelos. De igual forma, se considera esta técnica cuando la rehabilitación sea del tipo *ex situ*, es decir, sacar los residuos, valorizarlos (opcional) y llevarlos SDF autorizados. En este sentido, se debe de realizar un análisis económico y técnico entre la rehabilitación *in situ* y *ex situ*.

Las propuestas técnicas se identificaron como acciones pertinentes a un área estratégica: la rehabilitación ambiental, sin embargo, dada la complejidad de la problemática socioambiental, ya que además se identifican descargas de agua negra, desigualdades sociales y económicas con relación al resto de la CDMX. La salud de los habitantes de la Sierra de Santa Catarina se encuentra en riesgo dada las afectaciones al medio ambiente, por ello se contemplaron otras áreas de estrategia para una correcta rehabilitación ambiental, que son: la gobernanza, el manejo comunitario, el ordenamiento territorial, la generación de espacios de calidad, por último, la promoción de la salud, el bienestar y la disminución de riesgos. Todas ellas interconectadas por múltiples acciones con el fin de mejorar la calidad de vida de los habitantes y del medio ambiente.

El Congreso de la CDMX cuenta con una petición del año 2022 para el saneamiento de los tiraderos, sin embargo, hasta el término de la redacción de este trabajo no se identificaron acciones concretas, más que la clausura del tiradero T15 (ver figura 10.5) como parte de un proyecto de restauración por parte de la UNAM campus Morelia. Esperando que las propuestas de este trabajo sean de utilidad para abatir la problemática socioambiental de la Sierra de Santa Catarina y la generación de nuevos proyectos.

9 Bibliografía

- Abioye, O. P. (2011). Biological remediation of hydrocarbon and heavy metals contaminated soil. *Soil contamination*, 7, 127-142.
- Adhikari, B., Dahal, K. R., & Khanal, S. N. (2014). A review of factors affecting the composition of municipal solid waste landfill leachate. *International journal of engineering science and innovative technology*, 3 (5), 273-281.
- Agdag, O., et al. (2022). Rehabilitation Methods for Open Dumps and Its Global Applications: SMARTEnv Eu Project. *EurAsia Waste Management Symposium*.
- Alfaro, R. I., Fady, B., Vendramin, G. G., Dawson, I. K., Fleming, R. A., Sáenz-Romero, C., Lindig-Cisneros, R. A., Murdock, T., Vinceti, B., Navarro, C. M., et al. (2014). The role of forest genetic resources in responding to biotic and abiotic factors in the context of anthropogenic climate change. *Forest Ecology and Management*, 333, 76-87.
- Allen, A. (2001). Containment landfills: the myth of sustainability. *Engineering geology*, 60 (1-4), 3-19.
- Antoun, H., & Prévost, D. (2006). Ecology of plant growth promoting rhizobacteria. *PGPR: Biocontrol and biofertilization*, 1-38.
- Attalage, D. S., Hettiaratchi, J. P. A., Chu, A., Pokhrel, D., & Jayasinghe, P. A. (2023). Impact of Landfill Gas Exposure on Vegetation in Engineered Landfill Biocover Systems Implemented to Minimize Fugitive Methane Emissions from Landfills. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(5), 4448.
- Barredo, O., Vilela, J., Garbisu, C., Besga, G., Alkorta, I., & Epelde, L. (2020). Technosols made from urban and industrial wastes are a good option for the reclamation of abandoned city plots. *Geoderma*, 377, 114563.
- Bastidas-Acuña, A., & Licea-Nogues, J. (2002). Rehabilitación y Clausura de Tiraderos a Cielo Abierto.
- Budi, S., Suliasih, B. A., Othman, M. S., Heng, L. Y., & Surif, S. (2016). Toxicity identification evaluation of landfill leachate using fish, prawn and seed plant. *Waste Management*, 55, 231-237.
- Congreso de la Ciudad de México. (1 de marzo de 2022). *Acuerdo resolutivo para erradicar los tiraderos clandestinos en la zona de la Sierra de Santa Catarina*. Congreso CDMX.

<https://www.congresocdmx.gob.mx/archivo326836cac8201bdfd3fcaea0291be101cf6467e2.pdf>

- Cunningham, S. D., & Berti, W. R. (1993). Remediation of contaminated soils with green plants: an overview. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*, 29, 207-212.
- Dada, E. O., Njoku, K. I., Osuntoki, A. A., & Akinola, M. O. (2015). A review of current techniques of physico-chemical and biological remediation of heavy metals polluted soil. *Ethiopian Journal of Environmental Studies and Management*, 8(5), 606-615.
- Duan, Z., Scheutz, C., & Kjeldsen, P. (2021). Trace gas emissions from municipal solid waste landfills: A review. *Waste Management*, 119, 39-62.
- Ehrenfeld, J. G. (2013). Plant–soil interactions. *Encyclopedia of Biodiversity*, 109-128.
- Emelko, M. B., Huck, P. M., Coffey, B. M., & Smith, E. F. (2006). Effects of media, backwash, and temperature on full-scale biological filtration. *Journal-American Water Works Association*, 98(12), 61-73.
- EPA. (1995). Municipal Solid Waste Landfills. Consultado el 1 de octubre de 2023, desde <https://www3.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch02/final/c02s04.pdf>
- EPA. (2023). Apply biofilters or biocovers. Consultado el 22 de octubre de 2023, desde EPA <https://www.epa.gov/lmop/apply-biofilters-or-biocovers>
- Fabbri, D., Pizzol, R., Calza, P., Malandrino, M., Gaggero, E., Padoan, E., & Ajmone-Marsan, F. (2021). Constructed technosols: A strategy toward a circular economy. *Applied Sciences*, 11(8), 3432.
- FAO. (2023). Portal de Suelos de la FAO. Consultado el 1 de julio de 2023, desde <https://www.fao.org/soils-portal/es/>
- Farrell, H. L., Léger, A., Breed, M. F., & Gornish, E. S. (2020). Restoration, soil organisms, and soil processes: emerging approaches. *Restoration Ecology*, 28, S307-S310.
- Gann, G. D., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C. R., Jonson, J., Hallett, J. G., Eisenberg, C., Guariguata, M. R., Liu, J., et al. (2019). International principles and standards for the practice of ecological restoration. *Restoration Ecology*, 27(S1), S1-S46.
- GODF. (2000). DECRETO QUE MODIFICA EL ÁREA NATURAL PROTEGIDA “SIERRA DE SANTA CATARINA”, ZONA SUJETA A CONSERVACIÓN ECOLÓGICA, UBICADA EN LAS DELEGACIONES TLÁHUAC E IZTAPALAPA, DISTRITO FEDERAL.

- GODF. (2003). DECRETO POR EL QUE SE DECLARA Y ESTABLECE COMO ÁREA NATURAL PROTEGIDA“SIERRA DE SANTA CATARINA”, ZONA DE CONSERVACIÓN ECOLÓGICA.
- GODF. (2005). PROGRAMA DE MANEJO DEL ÁREA NATURAL PROTEGIDA CON CARÁCTER DE ZONA DE CONSERVACIÓN ECOLÓGICA “SIERRA DE SANTA CATARINA.
- GODF. (2014). DECRETO QUE CONTIENE EL PROGRAMA PARCIAL DE DESARROLLO URBANO “SIERRA DE SANTA CATARINA” EN LA DELEGACIÓN IZTAPALAPA.
- González-Méndez, B. & Chávez-García, E. (2020). Re-thinking the Technosol design for greenery systems: Challenges for the provision of ecosystem services in semiarid and arid cities. *Journal of Arid Environments*, 179, 104191.
- Gworek, B., Dmochowski, W., Koda, E., Marecka, M., Baczewska, A. H., Brągoszewska, P., Siczka, A., & Osiński, P. (2016). Impact of the municipal solid waste Łubna Landfill on environmental pollution by heavy metals. *Water*, 8(10), 470.
- Hernández, R. B. P., & Martínez-Coronel, M. (2023). Dieta del cacomixtle *Bassariscus astutus* en la Sierra de Santa Catarina, Ciudad de México. *Revista Mexicana de Mastozoología (Nueva Época)*, 13(1), 43-56.
- Higgins, I. J., Best, D. J., Hammond, R. C., & Scott, D. (1981). Methane-oxidizing microorganisms. *Microbiological reviews*, 45(4), 556-590.
- Hoornweg, D., & Bhada-Tata, P. (2012). What a waste: a global review of solid waste management.
- Hussain, A., Rehman, F., Rafeeq, H., Waqas, M., Asghar, A., Afsheen, N., Rahdar, A., Bilal, M., & Iqbal, H. M. (2022). In-situ, Ex-situ, and nano-remediation strategies to treat polluted soil, water, and air—A review. *Chemosphere*, 289, 133252
- IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>
- Jacoby, R., Peukert, M., Succurro, A., Koprivova, A., & Kopriva, S. (2017). The role of soil microorganisms in plant mineral nutrition—current knowledge and future directions. *Frontiers in plant science*, 8, 1617.
- Jain, D., Saheewala, H., Sanadhaya, S., Joshi, A., Bhojija, A. A., Verma, A. K., & Mohanty, S. R. (2022). Potassium solubilizing microorganisms as soil health engineers: An insight into molecular mechanism. *Rhizosphere engineering* (pp. 199-214). Elsevier

- Kafle, A., Timilsina, A., Gautam, A., Adhikari, K., Bhattarai, A., & Aryal, N. (2022). Phytoremediation: Mechanisms, plant selection and enhancement by natural and synthetic agents. *Environmental Advances*, 8, 100203.
- Kanwar, P., Meena, U., Thakur, I. S., & Srivastava, S. (2023). Heavy metal phytoremediation by the novel prospect of microbes, nanotechnology, and genetic engineering for recovery and rehabilitation of landfill site. *Bioresource Technology Reports*, 101518.
- Kamal, A. K. I., Islam, M. R., Hassan, M., Ahmed, F., Rahman, M. A. T., & Moniruzzaman, M. (2016). Bioaccumulation of trace metals in selected plants within Amin Bazar landfill site, Dhaka, Bangladesh. *Environmental Processes*, 3, 179-194.
- Kim, K. R., & Owens, G. (2010). Potential for enhanced phytoremediation of landfills using biosolids—a review. *Journal of environmental management*, 91(4), 791-797.
- Kuppusamy, S., Palanisami, T., Megharaj, M., Venkateswarlu, K., & Naidu, R. (2016). In-situ remediation approaches for the management of contaminated sites: a comprehensive overview. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology Volume 236*, 1-115.
- Lal, R. (2020). Soil organic matter and water retention. *Agronomy Journal*, 112(5), 3265-3277.
- Lamb, D. T., Venkatraman, K., Bolan, N., Ashwath, N., Choppala, G., & Naidu, R. (2014). Phytocapping: an alternative technology for the sustainable management of landfill sites. *Critical reviews in environmental science and technology*, 44(6), 561-637.
- Lema, J., Mendez, R., & Blazquez, R. (1988). Characteristics of landfill leachates and alternatives for their treatment: a review. *Water, air, and soil pollution*, 40, 223-250.
- Liao, X., Li, Y., Miranda-Avilés, R., Zha, X., Anguiano, J. H. H., Sánchez, C. D. M., Puy-Alquiza, M. J., González, V. P., & Garzon, L. F. R. (2022). In situ remediation and ex situ treatment practices of arsenic-contaminated soil: An overview on recent advances. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 8, 100157.
- Lima, A. T., Mitchell, K., O'Connell, D. W., Verhoeven, J., & Van Cappellen, P. (2016). The legacy of surface mining: Remediation, restoration, reclamation and rehabilitation. *Environmental Science & Policy*, 66, 227-233.
- Lugtenberg, B., & Kamilova, F. (2009). Plant-growth-promoting rhizobacteria. *Annual review of microbiology*, 63, 541-556.

- Mantero-Garcia, H. D., Gómez-Guerrero, A., Gavi-Reyes, F., Zamora-Morales, B. P., & Ramirez-Ayala, C. (2019). ¿Es sustentable el aprovechamiento de tierra de hoja en bosques de encino? *Madera y bosques*, 25(3).
- Mao, X., Jiang, R., Xiao, W., & Yu, J. (2015). Use of surfactants for the remediation of contaminated soils: a review. *Journal of hazardous materials*, 285, 419-435.
- Mendoza, N. (31 de agosto de 2020). Tiraderos clandestinos violan área natural protegida en Iztapalapa. *El Sol de México*. <https://www.elsoldemexico.com.mx/metropoli/cdmx/tiraderos-clandestinos-violan-area-protegida-en-iztapalapa-medio-ambiente-limpieza-sedema-5694079.html>
- Meuser, H. (2012). *Soil remediation and rehabilitation: treatment of contaminated and disturbed land* (Vol. 23). Springer Science & Business Media.
- Morel, J. L., Charzyński, P., Shaw, R. K., & Zhang, G. (2015). The seventh SUITMA conference held in Toruń, Poland, September 2013. *Journal of Soils and Sediments*, 15, 1657-1658.
- Nanda, S., & Berruti, F. (2021). Municipal solid waste management and landfilling technologies: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19, 1433-1456.
- Needelman, A. (2013). What Are Soils? Consultado el 10 de julio de 2023, desde <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/what-are-soils-67647639/>
- NotimexTV. (6 de agosto de 2018). *En peligro Sierra de Santa Catarina, Pulmón de la CDMX* [Archivo de video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=-WHMggRksSw>
- PAOT. (2010). Estudio de zonas impactadas por tiraderos clandestinos de residuos de la construcción en el Distrito Federal.
- PAOT (2009). Estudio Sobre la Superficie Ocupada en Áreas Naturales Protegidas de la CDMX.
- Pinhey, S., & Tebbs, M. (2022). *Plants for Soil Regeneration: An Illustrated Guide*. CABI.
- Padmavathiamma, P. K., & Li, L. Y. (2007). Phytoremediation technology: hyper-accumulation metals in plants. *Water, Air, and Soil Pollution*, 184, 105-126. S. Rokia, G. Séré, C. Schwartz, M. Deeb, F.
- Popova, E. (2019). Accumulation of heavy metals in soil and plants adjacent to municipal solid waste disposal facility. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1145, No. 1, p. 012021). IOP Publishing.
- Prado, B., Mora, L., Abbruzzini, T., Flores, S., Cram, S., Ortega, P., ... & Siebe, C. (2020). Feasibility of urban waste for constructing Technosols for plant growth. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 37(3), 237-249.

- Ramírez, I. (3 de mayo de 2018). Parque de Iztapalapa es un cochinerero. *El Gráfico*.
<https://www.elgrafico.mx/al-dia/03-05-2018/parque-de-iztapalapa-es-un-cochinerero>
- Rokia, S., Séré, G., Schwartz, C., Deeb, M., Fournier, F., Nehls, T., ... & Vidal-Beaudet, L. (2014). Modelling agronomic properties of Technosols constructed with urban wastes. *Waste Management*, 34(11), 2155-2162.
- SEDEMA. (2015). Suelo urbano y suelo de conservación. Consultado el 10 de febrero de 2023, desde <http://data.sedema.cdmx.gob.mx/biodiversidadcdmx/suelos.html>
- SEMARNAT. (2002). Norma oficial mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.
- SEMARNAT. (2018). Informe del medio ambiente.
- SEMARNAT. (2020). Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos.
- Slack, R. J., Gronow, J. R., & Voulvoulis, N. (2005). Household hazardous waste in municipal landfills: contaminants in leachate. *Science of the total environment*, 337(1-3), 119-137.
- Smith, P. (2012). Soils and climate change. *Current opinion in environmental sustainability*, 4(5), 539-544.
- Suárez, H. R. R. (2022). La Sierra de Santa Catarina: extractivismo, urbanización, gentrificación y construcción social de alternativas en el oriente de la CDMX. *Diversidad*, 23, 81-91.
- Tarback, E. J., Lutgens, F. K., Tasa, D., & Cientficias, A. T. (2005). *Ciencias de la Tierra* (Vol. 1). Pearson Educación Madrid.
- Trivedi, P., Wallenstein, M., Delgado-Baquerizo, M., & Singh, B. (2018). Microbial modulators and mechanisms of soil carbon storage. En B. Singh (Ed.), *Soil Carbon Storage*. Academic Press.
- Tsydenova, N., Vázquez Morillas, A., & Cruz Salas, A. A. (2018). Sustainability assessment of waste management system for Mexico city (Mexico)—based on analytic hierarchy process. *Recycling*, 3(3), 45.
- Ugrina, M., & Jurić, A. (2023). Current Trends and Future Perspectives in the Remediation of Polluted Water, Soil and Air—A Review. *Processes*, 11(12), 3270.

- Van Bodegom, P., Stams, F., Mollema, L., Boeke, S., & Leffelaar, P. (2001). Methane oxidation and the competition for oxygen in the rice rhizosphere. *Applied and Environmental Microbiology*, 67(8), 3586-3597.
- Vasarhelyi, K. (2021). The Hidden Damage of Landfills. Consultado el 1 de julio de 2023, desde <https://www.colorado.edu/ecenter/2021/04/15/hidden-damage-landfills>
- Vaverková, M., & Adamcová, D. (2014). Heavy metals uptake by select plant species in the landfill area of Štěpánovice, Czech Republic. *Pol. J. Environ. Stud*, 23(6), 2265-2269.
- Vaverková, M. D. (2017). Environmental impact of landfill on soils—the example of the Czech Republic. *Polish journal of soil science*, 50(1).
- Vaverková, M. D. (2019). Landfill impacts on the environment. *Geosciences*, 9(10), 431.
- Venkatraman, K., & Ashwath, N. (2009). Phytocapping: importance of tree selection and soil thickness. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*, 9, 421-430.
- Villalba, G. L. M., Martínez-Coronel, M., Hernández, R. B. P., Rivera-Tellez, D., & Galeana-Barrera, L. E. (2023). Actualización de la lista de mamíferos silvestres de la Sierra de Santa Catarina, Ciudad de México. *Revista Mexicana de Mastozoología (Nueva Época)*, 13(1), 12-23.
- Wang, Y., Wu, W., Ding, Y., Liu, W., Perera, A., Chen, Y., & Devare, M. (2008). Methane oxidation activity and bacterial community composition in a simulated landfill cover soil is influenced by the growth of *Chenopodium album* L. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(9), 2452-2459.
- Ye, S., Zeng, G., Wu, H., Zhang, C., Dai, J., Liang, J., Yu, J., Ren, X., Yi, H., Cheng, M., et al. (2017). Biological technologies for the remediation of co-contaminated soil. *Critical reviews in biotechnology*, 37(8), 1062-1076.
- Zhou, P., Luukkanen, O., Tokola, T., & Nieminen, J. (2008). Effect of vegetation cover on soil erosion in a mountainous watershed. *Catena*, 75(3), 319-325.

10Anexo 1

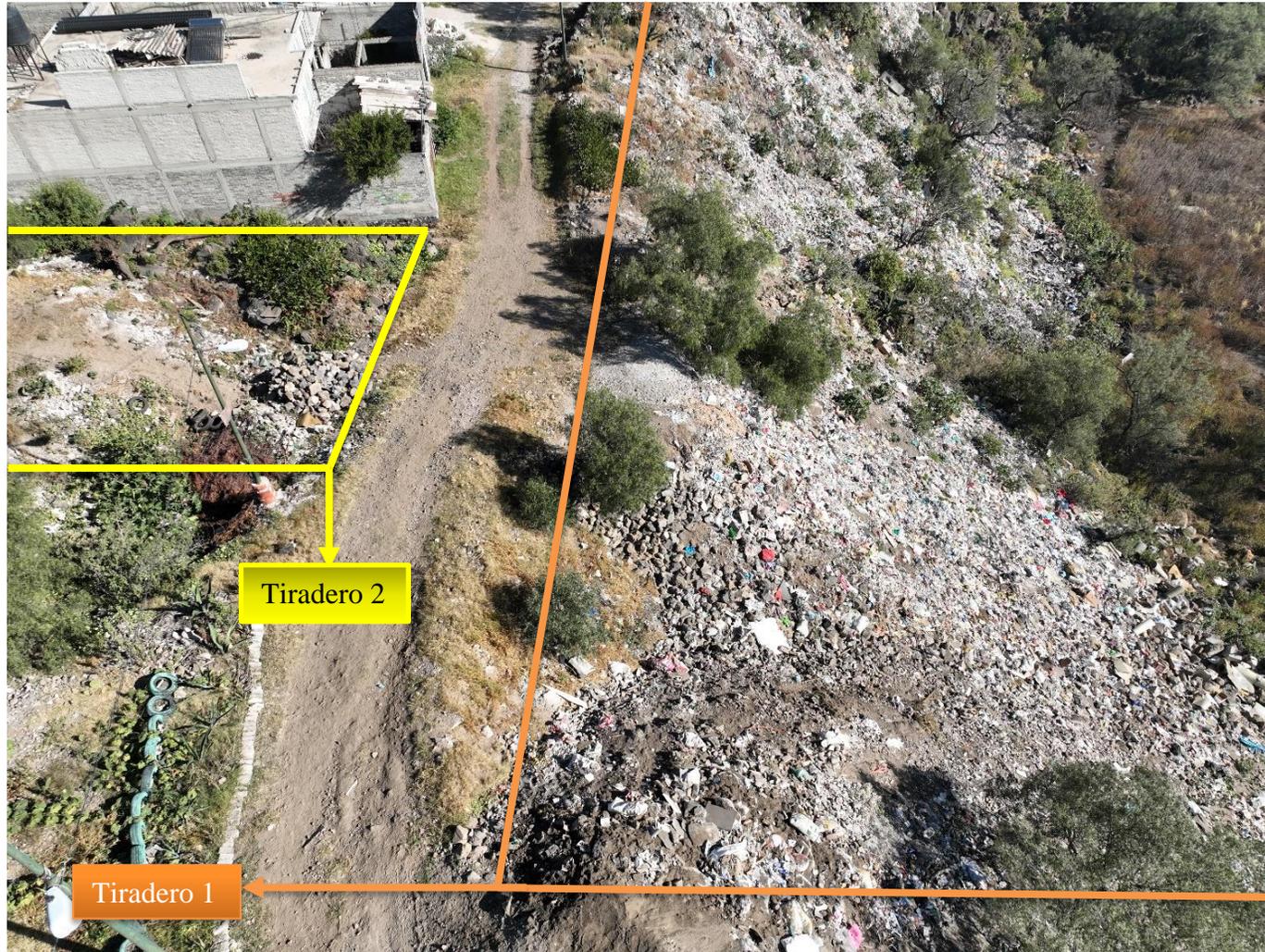


Figura 10.1 Fotografía área de los tiraderos 1 y 2 (acercamiento)



Figura 10.2 Fotografía área de los tiraderos 1 y 2



Figura 10.3 Fotografía área del tiradero 14



Figura 10.4 Fotografía área del tiradero 3

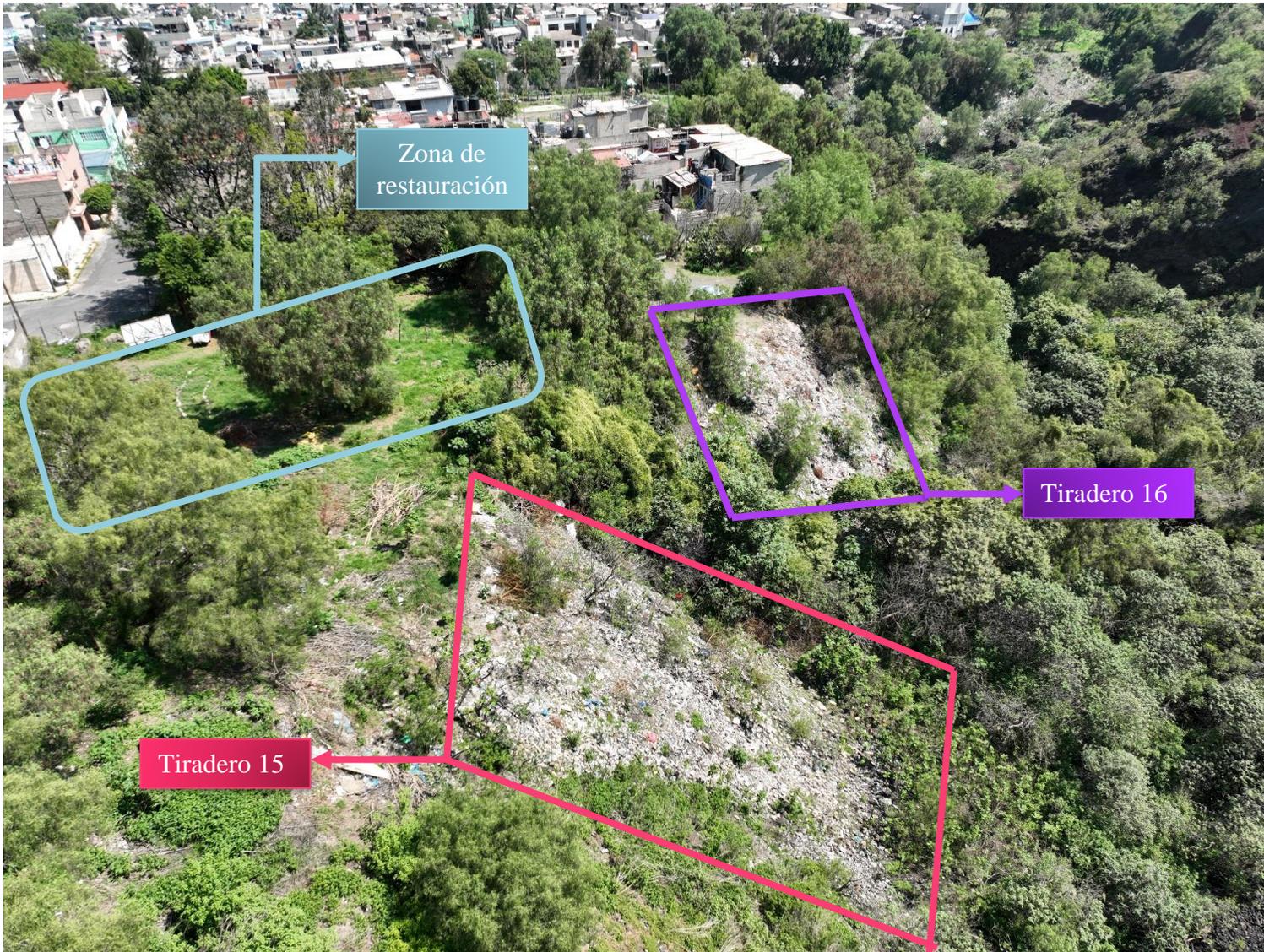


Figura 10.5 Fotografía área de los tiraderos 15 (clausurado); 16 y zona de restauración del tiradero 15



Figura 10.6 Fotografía aérea de la zona de restauración y clausura del tiradero 15



Figura 10.7 Fotografía área del tiradero 16



Figura 10.8 Fotografía área del tiradero 18



Figura 10.9 Fotografía área del tiradero 18 (acercamiento lado norte)



Figura 10.10 Fotografía área del tiradero 18 (acercamiento lado oeste)



Figura 10.11 Fotografía área de los tiraderos 19 y 20



Figura 10.12 Fotografía área del tiradero 19 (acercamiento)



Figura 10.13 Fotografía área del tiradero 20 (acercamiento)



Figura 10.14 Fotografía área de la conexión entre el tiradero 19 y 20 (acercamiento)