



Constantino Gutiérrez Palacios  
Coordinador

Manual técnico

Localización de sitios  
para la disposición final  
de residuos de la construcción  
y demolición





## Manual técnico

# Localización de sitios para la disposición final de residuos de la construcción y demolición

1

2

3

## PARTICIPANTES

### Docentes, investigadores y becarios de la UNAM

- M. en C. Constantino Gutiérrez Palacios,  
especialista en residuos y responsable del proyecto
- M. en I. Adolfo Reyes Pizano, especialista en topografía
- M. en I. Martín Carlos Vidal García, especialista en geología
- M. en I. Juan Antonio Araiza, especialista ambiental
- M. en I. Zulma Inés Otálora Barreto, especialista ambiental
- M. en I. Roberto Ascencio Villagómez, especialista en fotogrametría
- Ing. Eduardo Hernández Malva, becario
- Ing. Juan Pablo Moreno Ordaz, becario
- Ing. Juan Ramón Noguez Trejo, becario

4

### Profesionales externos

- Ing. Dámaso Fernández Peña, especialista en hidráulica
- Ing. Óscar Raúl Couttolenc Echeverría, especialista en geotecnia

*Manual técnico.*

*Localización de sitios para la disposición final  
de residuos de la construcción y demolición*

GUTIÉRREZ PALACIOS, Constantino (Coordinador)

México, Universidad Nacional Autónoma de México,

Facultad de Ingeniería, 2024, 172 p.

*Manual técnico.*

*Localización de sitios para la disposición final  
de residuos de la construcción y demolición*

Primera edición electrónica  
de un ejemplar (11 MB) Formato PDF  
Publicado en línea en abril de 2024

D.R. © 2024, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
Avenida Universidad 3000, Col. Universidad Nacional Autónoma de México,  
Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México

FACULTAD DE INGENIERÍA  
<http://www.ingenieria.unam.mx/>

Esta edición y sus características son propiedad de la Universidad Nacional Autónoma de México. Prohibida la reproducción o transmisión total o parcial por cualquier medio sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.

Impreso y hecho en México.

UNIDAD DE APOYO EDITORIAL  
Cuidado de la edición: Amelia Guadalupe Fiel Rivera  
Diseño editorial: Nismet Díaz Ferro  
Fotografía de portada: Constantino Gutiérrez Palacios

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	1
<b>1. Generalidades</b> .....	3
1.1 Residuos de construcción y demolición: características y clasificación. ....	3
1.2 Manejo de residuos de construcción y demolición en México .....	7
1.3 Generación de residuos de construcción y demolición .....	12
1.4 Almacenamiento y transporte de residuos de construcción y demolición .....	15
1.5 Normatividad .....	18
<b>2. Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio</b> .....	25
2.1 Evaluación multicriterio y sus componentes .....	26
<b>3. Metodología para la selección de áreas y sitios factibles</b> .....	31
3.1 Estrategia general de trabajo .....	31
3.2 Identificación de variables e indicadores .....	32
3.3 Proceso de análisis para ubicar áreas factibles. ....	32
3.4 Ponderación de variables y proceso de análisis jerárquico para la selección de sitios factibles .....	39
<b>4. Estudios específicos para la selección de sitios</b> .....	60
4.1 Estudios ambientales .....	60
4.1.1 Recopilación de información. ....	61
4.1.2 Variables ambientales .....	62

1

2

3

4

BIBLIOGRAFÍA

III

4.2	Estudios hidrológicos . . . . .	69
4.2.1	Recopilación de información . . . . .	70
4.2.2	Reconocimiento de campo . . . . .	71
4.2.3	Localización y descripción del sistema hidrológico . . . . .	75
4.2.4	Características fisiográficas de cuencas de aportación . . . . .	76
4.2.5	Modelo de tormenta . . . . .	84
4.2.6	Determinación de avenidas de diseño o revisión . . . . .	89
4.3	Estudios de mecánica de suelos . . . . .	97
4.3.1	Objetivos generales . . . . .	97
4.3.2	Antecedentes . . . . .	98
4.3.3	Exploración de campo . . . . .	99
4.3.4	Ensayes de laboratorio . . . . .	106
4.3.5	Capacidad de carga . . . . .	107
4.3.6	Asentamientos . . . . .	113
4.3.7	Estabilidad de taludes . . . . .	116
4.3.8	Interpretación y evaluación de resultados . . . . .	117
4.4	Estudios de topografía . . . . .	119
4.4.1	Objetivos . . . . .	119
4.4.2	Estudios requeridos para definir una zona adecuada . . . . .	120
4.4.3	Procedimiento para el vuelo con VANT . . . . .	129
4.5	Estudios de geología . . . . .	131
4.5.1	Reconocimiento preliminar y recopilación de información geológica . . . . .	132
4.5.2	Exploración e investigación geológica a detalle . . . . .	138
4.5.3	Evaluación geológica por la presencia de fallas y fracturamiento en un sitio para RC&D y de su entorno . . . . .	154
4.6	Estudios socioeconómicos . . . . .	156
4.6.1	Recopilación de información . . . . .	156
4.6.2	Variables socioeconómicas . . . . .	157
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .</b>	<b>163</b>

1

2

3

4

BIBLIOGRAFÍA

IV

# INTRODUCCIÓN

1

La industria de la construcción es un sector relevante de la economía mundial, debido a que las obras que se construyen a lo largo de un país son motor de la producción y empleo. En México, se estima que este sector genera alrededor de 5.6 millones de puestos de trabajo e impacta en 63 de las 73 ramas productivas; además, en 2011, aportó el 6.7% al producto interno bruto (Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción [CMIC], 2013).

2

Al igual que sucede con cualquier actividad económica que utiliza insumos o materias primas, se generan residuos, específicamente los residuos de la construcción y demolición (RC&D), conformados por escombros de demolición, materiales térreos producto de excavación, concretos y otros.

3

En febrero de 2013, con la entrada en vigor de la NOM-161-SEMARNAT-2011 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2013), se contempla como una obligación para los constructores que generen más de 80 m<sup>3</sup> de RC&D en cada una de sus obras, la formulación y el desarrollo del respectivo plan de manejo. Sin embargo, pocas son las entidades del país que han realizado esta acción, y mucho menos que en la actualidad cuenten con infraestructura o incluso diagnósticos relacionados con este tipo de residuos.

4

Por lo tanto, se pretende que este Manual sea un instrumento guía para los profesionales, dependencias o áreas encargadas del manejo de los RC&D, que proporcione específicamente pautas clave tanto para la selección de áreas y sitios factibles como para el emplazamiento de infraestructura para la disposición final de estos residuos. Se incluyen también las principales disposiciones contenidas en la legislación o normatividad mexicana para el control de los RC&D, a fin de aportar más información a la escasa documentación técnica existente que apoya la toma de decisiones.

El objetivo principal de esta publicación es proporcionar los aspectos clave para la toma de decisiones, en lo relacionado con la selección de sitios para emplazar infraestructura de depósito de RC&D, para que su operación sea económicamente factible y con mínima afectación ambiental. Asimismo, se consideran los siguientes objetivos particulares:

- ❖ Presentar de forma clara la descripción de las acciones involucradas en el proceso selección de áreas y sitios de emplazamiento de infraestructura de depósito de RC&D.
- ❖ Describir las variables o criterios que participan en los procesos de selección de áreas y sitios factibles para el emplazamiento de infraestructura de depósito de RC&D.
- ❖ Explicar en qué consisten los estudios básicos o mínimos para la selección de sitios factibles para emplazamiento de infraestructura de depósito de RC&D.

1

2

3

4

## 1.

## GENERALIDADES

1

## 1.1 Residuos de construcción y demolición: características y clasificación

Los residuos de la construcción y demolición (RC&D) se definen como aquella parte de la corriente de residuos sólidos que se generan durante las actividades de demolición, ampliación, remodelación, modificación o construcción, tanto pública como privada, y coloquialmente se les denomina cascajo o escombro (Gaceta Oficial del Distrito Federal [GODF], 2015).

De acuerdo con la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (2010), los componentes de los RC&D varían “...considerando que, dentro de esta actividad, se aplican diversos métodos constructivos, amén de existir una gama muy amplia de actividades tales como: demolición, desmantelamiento, excavaciones, ampliaciones, remodelaciones y construcciones nuevas; así como de los métodos constructivos que ejecute cada una de estas actividades”.

No obstante, Gutiérrez (2012) clasifica a los RC&D en los materiales de mayor generación dentro de las obras de construcción del país (**tabla 1**).

2

3

4

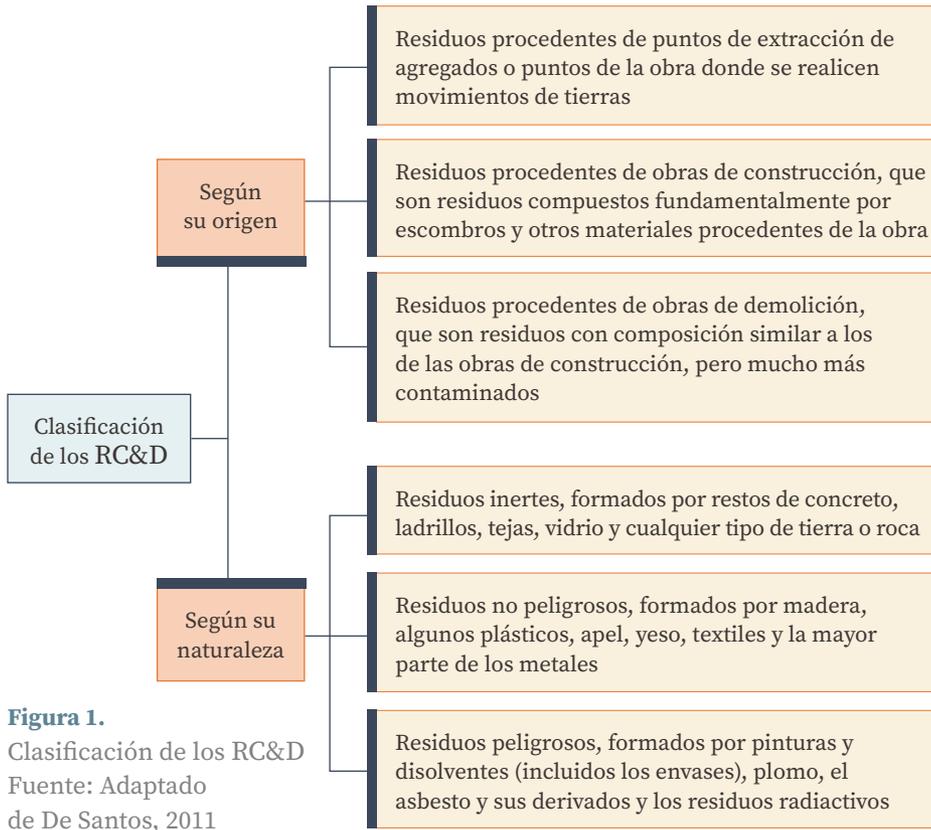
**Tabla 1.** Composición promedio de los RC&D

Residuo de la construcción y demolición	Composición promedio (% del total de RC&D)
Material de excavación	43.16
Concreto	24.38
Block tabique	23.33
Tabla roca yeso	4.05
Madera	1.52
Cerámica	0.85
Plástico	0.72
Piedra	0.62
Papel	0.49
Varilla	0.48
Asfalto	0.25
Lámina	0.09
Otros	0.06

Fuente: Adaptado de Gutiérrez, 2012

Adicionalmente, la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (2013) considera que los residuos originados en las actividades de despalme no forman parte de los RC&D, a pesar de que “...se consideran incidentalmente relacionados con los que se generan como producto de la actividad de la construcción, ya que estos se generarán en los trabajos preliminares para el acondicionamiento de terrenos o predios...”.

Sin embargo, diversos autores clasifican a los RC&D en un número menor de grupos y, en algunos casos, consideran que los residuos peligrosos generados dentro de las actividades de construcción y demolición forman parte de este tipo de residuos. Por ejemplo, De Santos (2011) los clasifica según su origen y su naturaleza (**figura 1**).



**Figura 1.**

Clasificación de los RC&D

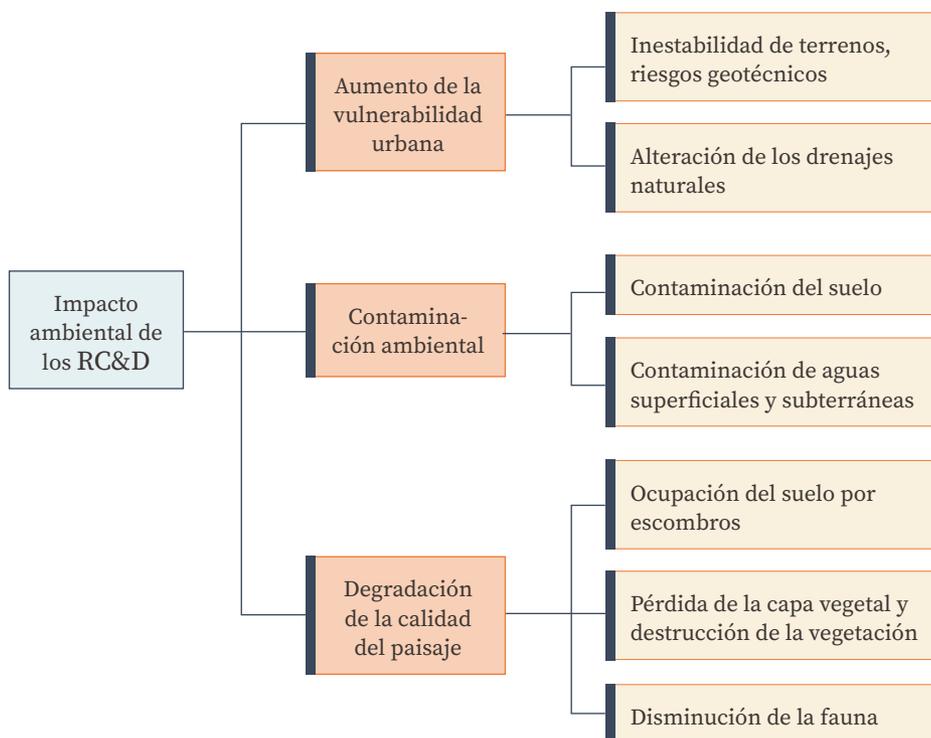
Fuente: Adaptado de De Santos, 2011

Además, Llatas (2000) expone las causas de la generación de los residuos procedentes de obras de construcción:

- ❖ **En la recepción de materiales:** se producen cuando es necesario deshacerse de productos cuya calidad no es la especificada, cuando han sufrido daños durante su transporte o porque se han suministrado cantidades mayores a las necesarias. En resumen, por errores de gestión y control de calidad.
- ❖ **En el almacenaje:** durante y como consecuencia del almacenaje en obra de los materiales suministrados, se producen residuos por una defectuosa organización o gestión de la empresa constructora.

- ❖ **En la ejecución:** la generación de residuos depende de factores organizativos de la empresa constructora, de la calidad de especificación del proyecto, de las tecnologías aplicadas y de las cualidades de los trabajadores.

Por lo anterior, Acosta (2002) recomienda evaluar los posibles impactos ambientales de las distintas actividades envueltas durante todo el ciclo de vida de la edificación u obra construida. Específicamente sobre los RC&D; el mismo autor señala que el problema de los residuos de la construcción tiene consecuencias importantes, en particular, el impacto ambiental de lo que se arroja al ambiente, en términos de pérdida de recursos naturales, contaminación y desechos tóxicos. (figura 2).



**Figura 2.** Impacto ambiental de los RC&D

Fuente: Adaptado de Acosta, 2002

## 1.2 Manejo de residuos de construcción y demolición en México

La industria de la construcción es una de las actividades económicas más relevantes del país. En 2015, aportó el 7.3% del producto interno bruto (PIB), siendo la cuarta con la mayor contribución. En la **tabla 2**, se muestra el porcentaje del PIB por sector de actividad económica a nivel nacional.

**Tabla 2.** Distribución porcentual del PIB por actividad económica en el año 2015

Concepto	Porcentaje (%)
Producto interno bruto, a precios de mercado	100
Impuestos a los productos, netos	2.7
Valor agregado bruto	97.3
Industrias manufactureras	16.8
Comercio	15.7
Servicios inmobiliarios y de alquiler y de bienes muebles e intangibles	11.9
Construcción	7.3
Minería	6.8
Transportes, correos y almacenamiento	5.9
Servicios financieros y de seguros	4.6
Actividades legislativas, gubernamentales, de impartición de justicia y de organismos internacionales y extraterritoriales	3.6
Información en medios masivos	3.5

Concepto	Porcentaje (%)
Servicios educativos	3.5
Servicios de apoyo a los negocios y manejo de desechos y servicios de remediación	3.1
Agricultura, cría y explotación de animales, aprovechamiento forestal, pesca y caza	3.0
Generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, suministro de agua y de gas por ductos al consumidor final	2.3
Servicios profesionales, científicos y técnicos	2.2
Servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas	2.1
Otros servicios, excepto actividades gubernamentales	2.0
Servicios de salud y de asistencia social	1.8
Corporativos	0.6
Servicios de esparcimiento culturales y deportivos, y otros servicios recreativos	0.4

Nota: cifras preliminares a partir del 30 de septiembre de 2016

Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2016

El sector de la construcción es parte fundamental de la economía nacional; sin embargo, los proyectos de infraestructura también son los principales generadores de impactos negativos sobre el ambiente, entre los más relevantes se encuentran los listados en la **tabla 3**.

**Tabla 3.** Impactos ambientales generados por la ejecución de proyectos de infraestructura

Clasificación	Impactos
Impacto público	Cambio en las condiciones de higiene del sitio
	Efectos a la salud pública
Impacto a recursos naturales	Consumo de energía del sitio
	Transporte de recursos
	Consumo de recursos naturales
Impacto a ecosistemas	Destrucción o disminución de hábitats
	Contaminación luminosa
	Contaminación auditiva
	Generación de polvo
	Contaminación del suelo
	Sustancias suspendidas en el agua, como plomo y arsénico
	Contaminación del aire
	Afectación a flora y fauna
	Emisión de compuestos orgánicos volátiles y clorofluorocarbonos (CFC)
	Erosión de suelos
	Contaminación del agua
	Generación de residuos
	Contaminación química
Alteración del paisaje	
Emisión de gases de efecto invernadero (GEI)	

Fuente: Adaptado de Zolfagharian, 2012

En 1988, se publicó la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) que regula las actividades que, como los proyectos de infraestructura, potencialmente podrían dañar el ambiente. De este modo, se vuelven obligatorias las evaluaciones de impacto ambiental para autorizar la ejecución de obras de construcción. Martínez (1999) expone algunos beneficios de una evaluación ambiental efectiva, como los siguientes:

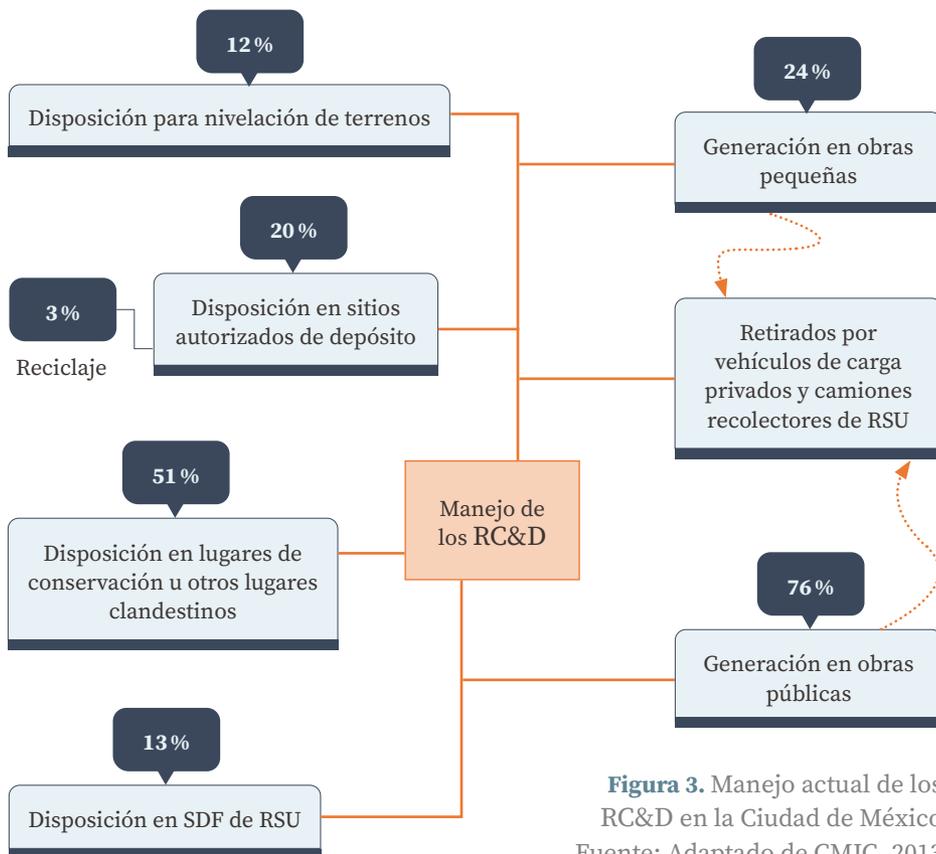
- ❖ Proporciona un grado apropiado de protección a los recursos naturales, la calidad del ambiente y la salud pública.
- ❖ Unifica la información relevante sobre la acción propuesta, el estado del ambiente afectado y los tipos de impactos ambientales potenciales que pueden resultar de la ejecución de las alternativas propuestas a la acción.
- ❖ Promueve la selección de las alternativas más apropiadas, prevención de contaminación y el uso de mejores prácticas de manejo y tecnología para reducir la magnitud de los impactos ambientales que resultan de las acciones que se ejecutan.

Sin embargo, en materia de RC&D no existe suficiente regulación a nivel nacional para su correcta gestión. Hasta el momento, solo se han podido identificar cuatro entidades federativas que cuentan con sitios de disposición final autorizados: Guanajuato, Baja California, Ciudad de México y Estado de México; estos dos últimos cuentan con sistemas de recolección y transporte, al igual que de catorce sitios de disposición final especializados para este tipo de residuos, ubicados dentro del territorio mexiquense (CMIC, 2013).

En el contexto nacional, Ciudad de México es la entidad que mayormente resalta cuando se aborda la temática de los RC&D, ya que además de ser una zona densamente poblada, constantemente se desarrollan obras

de construcción tanto de carácter público como privado. En la actualidad, no se dispone de datos reales y comparables en el país sobre la generación de los RC&D, por lo que las pocas cifras que son publicadas se generan a partir de estimaciones, comparaciones o métodos indirectos.

Derivado de los programas de registro de transportistas que colectan los RC&D de la Ciudad de México, elaborados tanto por la Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA) como por la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (2013), se ha podido construir un esquema de manejo de residuos (**figura 3**), en el cual se destaca que el 76 % de estos materiales proviene de obra pública y el restante de obras pequeñas o privadas.



**Figura 3.** Manejo actual de los RC&D en la Ciudad de México  
Fuente: Adaptado de CMIC, 2013

## 1.3 Generación de residuos de construcción y demolición

La emisión de estas normas se debe a la gran generación de RC&D dentro de la zona metropolitana del Valle de México, específicamente en la Ciudad de México. Esta entidad es una de las mayores generadoras de estos residuos, mientras los sitios de disposición final autorizados están ubicados en el Estado de México. En la **tabla 4**, se muestran las entidades federativas con mayor generación de RC&D en 2011.

**Tabla 4.** Entidades federativas con mayor generación de RC&D en México

Entidades Federativas	Generación de RC&D (ton)
Nuevo León	850 215.29
Distrito Federal	499 406.60
Chihuahua	485 416.54
Guanajuato	426 537.41
Jalisco	423 079.19

Fuente: Adaptado de CMIC, 2013

Para 2017, la Agencia de Gestión Urbana reportó una generación de 24 344.8 ton/año, desglosada en seis alcaldías (**tabla 5**).

**Tabla 5.** Reporte de generación de RC&D

Alcaldía	RC&D [ton/año]
Venustiano Carranza	9, 828. 8
Xochimilco	4768.8

Alcaldía	RC&D [ton/año]
Benito Juárez	4377.6
Dirección General de Imagen, Alumbrado Público y Gestión de RSU	13936
Iztacalco	1646.4
Gustavo A. Madero	964.8
Coyoacán	822.4
Total	24 344.8

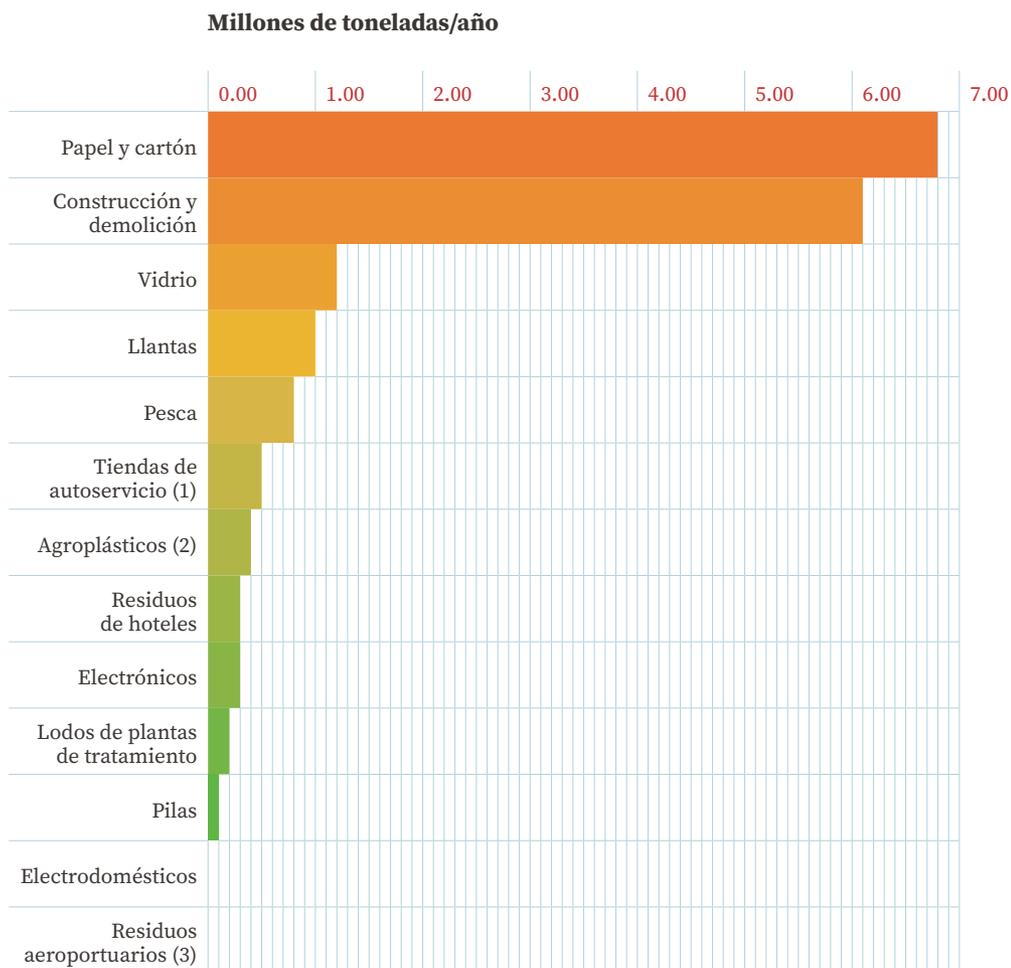
Fuente: Agencia de Gestión Urbana, 2017

De acuerdo con lo manifestado en los planes de manejo (PM) ante la Dirección de Evaluación de Impacto Ambiental, en 2017 se produjo un total de 2 435 709 m<sup>3</sup> de RC&D. Adicionalmente, en la tabla 7, se reporta información de la generación de RC&D por las actividades de excavación.

Además, los RC&D forman un gran porcentaje del total de residuos generados. En peso promedio, según la SEMARNAT (2012), los RC&D representan el 17.5 % de los residuos sólidos urbanos (RSU). Para el sexenio 2006–2012, dentro del grupo de residuos de manejo especial (RME), este tipo de residuos fue el tercero con mayor generación en el país, con un promedio de 6.11 millones de toneladas al año, por debajo de las excretas de ganado (66.71 millones de toneladas al año) y de papel y cartón (6.82 millones de toneladas al año). En la **figura 4**, se muestra la generación anual promedio de RME en México durante el período 2006–2012.

**Figura 4.** Generación anual promedio de RME en México, período 2006-2012

Fuente: Adaptado de SEMARNAT, 2012



**Notas:**

- (1) Los residuos de las tiendas de autoservicio solo incluyen a Walmart.
- (2) Los agroplásticos son los desechos como malla sombra, mallas antigranizo y bolsas para cultivo hidropónico, entre otros, provenientes de actividades agrícolas.
- (3) Los residuos aeroportuarios solo incluyen los producidos en el Aeropuerto de la Ciudad de México.

1

2

3

4

La gestión de los RC&D en nuestro país es deficiente y presenta problemas de planeación; por lo que, en materia de legislación, la mayor parte de las entidades federativas se encuentran rezagadas en cuanto a la formulación e implementación de leyes y reglamentos enfocados a la gestión integral de los RC&D, e incluso algunas presentan incongruencias a la hora de definir a los RSU y RME. No obstante, algunas entidades cuentan con formatos para la elaboración de planes de manejo de RME o RC&D. En la **tabla 6**, se muestran las entidades que cumplen con lo anterior y las observaciones de dichos formatos.

**Tabla 6.** Estados con formatos de elaboración de planes de manejo (RME o RC&D)

Estado	Observaciones
Ciudad de México	Se utiliza para la evaluación de impacto ambiental, pero contempla los RC&D
Guerrero, Tamaulipas, Oaxaca, Puebla, Morelos, Estado de México, Quintana Roo	El formato es para RME, pero cuenta con un apartado para RC&D

Fuente: Adaptado de CMIC, 2013

## 1.4 Almacenamiento y transporte de residuos de construcción y demolición

De acuerdo con la NACDMX-007-RNAT-2019, los RC&D deben separarse y pueden almacenarse temporalmente dentro de las instalaciones de la obra para su posterior transporte a un centro de acopio o un centro de reciclaje. La norma ambiental establece que el almacenamiento de residuos de construcción generados en el Distrito Federal, dentro de la fuente generadora o predio del proyecto arquitectónico únicamente, debe ser temporal.

Se debe minimizar la dispersión de polvos y emisión de partículas mediante el uso de agua tratada y con base en la norma ambiental para el Distrito Federal NADF-018-AMBT-2009 (González, 2016). Conforme al volumen de generación de RC&D, el almacenamiento deberá efectuarse según lo indicado en la **tabla 7**.

**Tabla 7:** Almacenamiento según volumen

Cantidad	Tipo de almacenamiento
Hasta 7 m <sup>3</sup>	Centros de acopio públicos o privados
Más de 7 m <sup>3</sup>	En el predio o centros de acopio públicos o privados.

Fuente: NACDMX-018-AMBT-2009

El almacenamiento correcto dentro de obra es muy importante, debido al gran volumen que ocupan los RC&D.

Se debe facilitar la entrada y salida de camiones a los lugares de almacenamiento; para esto es necesario tener planos de la ubicación de los puntos, donde los camiones puedan cargar correctamente los RC&D y retirarlos sin problemas; también colocar señalizaciones para orientar a los conductores de los vehículos recolectores. En dicho emplazamiento, se deben ubicar contenedores de gestor del mayor tamaño posible para cada obra.

Diversos criterios para considerar a la hora de definir el emplazamiento son los siguientes:

5. En el acopio en obra, así como para el traslado de los residuos, se deberán establecer mecanismos que reduzcan significativamente la dispersión de finos y, en general, de los RC&D.

6. El almacenamiento temporal de los RC&D tiene que realizarse en contenedores que deben ubicarse cerca de la entrada/salida de obra. De esta forma, se facilitará la labor del transportista a la hora de dejar/entregar los contenedores de residuo y minimizará el impacto que tiene la circulación de camiones en el recinto de obra. Las dimensiones de los contenedores varían desde 2 m<sup>3</sup> hasta 30 m<sup>3</sup> (figura 5).

La sección de los contenedores está ligada a la generación. El área destinada para el acopio también influye en la selección de los contenedores y con ello el tipo de transporte para su disposición en los diferentes centros de tratamiento. Los servicios de transporte deben estar autorizados por la entidad gubernamental o local correspondiente.



**Figura 5:** Propuesta de contenedores

7. El almacenamiento debe localizarse considerando qué opciones logísticas para el transporte de RC&D tendrá la obra.
8. Mantener un control documental de cada traslado, como lo indica la NACDMX-007-AMBT-2019 (tabla 8), a fin de contar con elementos para comprobar que la disposición de residuos se efectuó de forma correcta, como el volumen generado y transportado.

**Tabla 8:** Documentación requerida para acopio y transporte

Volumen de generación	Prestador de servicios (de transporte)	Centro de acopio	Centros de reciclaje y sitio de disposición final autorizados
Hasta 3 m <sup>3</sup>	Manifiesto entrega-recepción.	Responsiva de recepción de los residuos.	Manifiesto entrega-recepción.
Más de 3 y hasta 7 m <sup>3</sup>	Manifiesto entrega-recepción.	Responsiva de recepción de los residuos.	
Más de 7 m <sup>3</sup>	Manifiesto entrega-recepción.	Manifiesto entrega-recepción.	

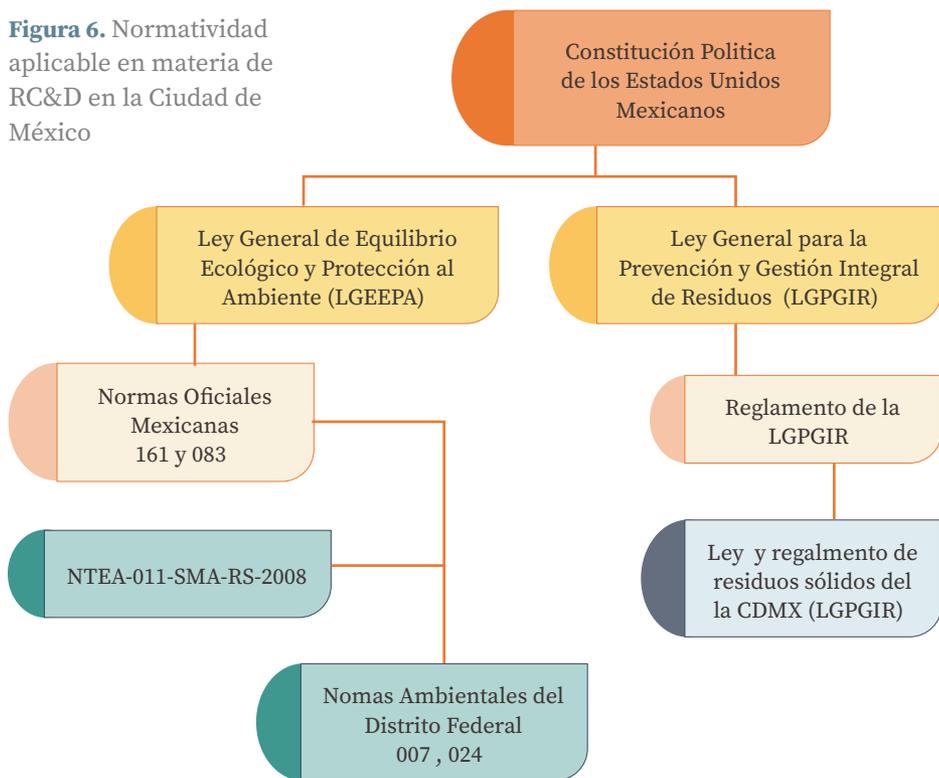
## Disposición final

Por último, la disposición final de los RC&D debe manejarse de manera responsable y determinarse un sitio que posea la infraestructura adecuada para evitar afectaciones ambientales.

## 1.5 Normatividad

La principal normatividad existente en materia de RC&D en la Ciudad de México se resume en la **figura 6**.

**Figura 6.** Normatividad aplicable en materia de RC&D en la Ciudad de México



La Ciudad de México emplea un proceso de gestión adecuado de RC&D que tiene un sistema de recolección y transporte que deposita estos residuos en sitios autorizados del Estado de México. A continuación, se presenta un breve análisis de las normas que se aplican.

**Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.** Establece, en algunos de sus artículos, la importancia de la protección del medio ambiente y el derecho que tiene toda persona a un ambiente sano: el artículo 4 se refiere a la protección del conjunto de elementos naturales y artificiales, a la gestión de los RC&D, planes de manejo de los residuos, así como las autoridades responsables de la operación y cumplimiento de estos; el artículo 9 explica que cada gobierno tiene la responsabili-

dad de establecer de manera independiente los planes de manejo (PM) de residuos de manejo especial (RME); el artículo 25 menciona la importancia de la materia de protección al ambiente, así como la existencia de un medio ecológico, sustentable y de preservación, lo cual sirve para fundamentar las leyes y reglamentos, y el artículo 73 establece la importancia de la creación de leyes que permitan mantener el equilibrio ecológico.

**Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA).** Esta ley regula las actividades que tienen potencial de dañar el ambiente e indica que es obligatoria la realización de evaluaciones de impacto ambiental al realizar obras de construcción, con el fin de autorizar la ejecución de determinado proyecto. Las actividades que señala como más importantes son la recolección, transporte y disposición de los RC&D. Indica que el manejo de los residuos deberá ser autorizado por el Gobierno Estatal, el cual pondrá a disposición toda la información sobre la ubicación de los tiros (sitios) autorizados.

Asimismo, la ley establece la importancia de la recuperación de los RME, ya sea como materia prima para procesos de manufactura o aprovechamiento energético. Describe las consecuencias de no valorar o aprovechar los RME. El artículo 28 se refiere a la importancia de separar a los RC&D en un listado adicional.

**Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR).** Resalta que, a pesar de que los RC&D se encuentren sujetos a un listado propio, sigue el principio de responsabilidad compartida entre autoridades, secretarías y gobiernos.

**Ley y reglamento de residuos sólidos de la Ciudad de México.** Es importante considerar esta ley y su reglamento porque clasifican los residuos

de la construcción y demolición como un residuo de manejo especial dentro de la Ciudad de México. Además, mencionan que un residuo de la construcción puede generarse en cualquier eventualidad, como es algún evento o contingencia, definen a los RC&D y facilitan su clasificación.

**NOM-161-SEMARNAT-2011.** Establece los criterios para clasificar los residuos de manejo especial (RME) y determinar cuáles están sujetos a un PM, el listado de estos, el procedimiento para la inclusión o exclusión a cada listado, así como los elementos y procedimientos para la formulación del PM. Dentro del listado de RME, se encuentran los RC&D que se generen en una obra en una cantidad mayor a 80 m<sup>3</sup>. Menciona que los RC&D se encuentran sujetos a tener un PM.

**NOM-083-SEMARNAT-2003.** Esta norma, que entró en vigor el 20 de diciembre del 2004, es obligatoria tanto para entidades públicas como privadas responsables de la disposición de residuos sólidos urbanos y de manejo especial en México. Establece las especificaciones de protección ambiental no solo en la etapa de selección del sitio, sino también en las etapas de diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final (SDF) de residuos sólidos urbanos (RSU) y de manejo especial (RME).

Además, se explica que los sitios destinados a la ubicación de infraestructura, diseño, construcción, clausura, monitoreo y obras complementarias se realicen cumpliendo con los lineamientos técnicos que tendrían que aplicarse, si fuese el caso, para el cumplimiento de la norma y que garanticen la protección del ambiente, la preservación del equilibrio ecológico y de los recursos naturales, minimizando los efectos contaminantes provocados por la inadecuada disposición de los residuos sólidos urbanos, así como los de manejo especial.

1

2

3

4

Las principales restricciones de selección de sitios se describen en la **tabla 9**.

**Tabla 9.** Restricciones indicadas en la NOM

Restricción	Requerimientos para su cumplimiento
Ubicar a una distancia menor de 13 km del centro de las pistas de un aeródromo de servicio al público o aeropuerto.	Elegir la distancia elegida se determinará mediante un estudio de riesgo aviario.
No ubicar sitios dentro de áreas naturales protegidas	Solo se considerarán sitios excepción de los sitios que estén contemplados en el plan de manejo.
Localidades mayores a 2500 habitantes	El límite del sitio de disposición final debe estar a una distancia mínima de 500 m contados a partir del límite de la traza urbana existente o contemplada en el plan de desarrollo urbano.
No ubicarse en las zonas siguientes: marismas, manglares, esteros, pantanos, humedales, estuarios, planicies aluviales, fluviales, recarga de acuíferos, arqueológicas; ni sobre cavernas, fracturas o fallas geológicas.	
Localizar sitio de disposición final fuera de zonas de inundación con períodos de retorno de 100 años.	Se debe demostrar que no existirá obstrucción del flujo en el área de inundación o posibilidad de deslaves o erosión que afecten la estabilidad física de las obras que integren el sitio de disposición final.
Distancia mínima de cuerpos de agua superficiales con caudal continuo, lagos y lagunas.	Deben situarse a 500 m como mínimo.

Restricción	Requerimientos para su cumplimiento
La ubicación entre el límite del sitio de disposición final y cualquier pozo de extracción de agua para uso doméstico, industrial, riego y ganadero, tanto en operación como abandonados.	La distancia debe ser de 100 m adicionales a la proyección horizontal de la mayor circunferencia del cono de abatimiento. Cuando no se pueda determinar el cono de abatimiento, la distancia al pozo no será menor de 500 m.

## NACDMX-007-RNAT-2019 y NTEA-011-SeMAGEM-RS-2022

La **NACDMX-007-RNAT** establece la clasificación y especificaciones de manejo para en el Distrito Federal (actual Ciudad de México). Esta norma prohíbe descargar, depositar o disponer RC&D en lugares distintos a los centros de acopio o de reciclaje o sitios de disposición final autorizados. Muestra la categoría y requerimientos ambientales de los generadores, prestadores de servicio de transporte, centros de reciclaje y sitios de disposición final autorizados para el manejo de RC&D.

La **NTEA-011-SeMAGEM-RS-2022** establece la clasificación y el manejo ambiental de los residuos de la construcción que los generadores deben cumplir para controlar su manejo y disposición final adecuada. La norma es de observancia obligatoria en el Estado de México y está dirigida a dependencias, entidades públicas, organismos autónomos, personas físicas o jurídicas colectivas, propietarios de obra, directores responsables de obra, contratistas o encargados de inmuebles en construcción o demolición que sean generadores de residuos de la construcción, así como para prestadores de servicio que intervienen en la generación, recolección, transporte, aprovechamiento y disposición final de los residuos de la construcción.

En la **tabla 10** se comparan las especificaciones y los procedimientos para el manejo de los RC&D de las normas mencionadas.

**Tabla 10.** Exigencias para el manejo de RC&D en las normas NACDMX-007-RNAT-2019 y NTEA-011-SeMAGEM-RS-2022

Norma	Especificaciones y procedimientos
NACDMX-007-RNAT-2019	Separación en la fuente generadora de residuos Almacenamiento temporal Recolección y transporte Tratamiento Aprovechamiento Disposición final
NTEA-011-SeMAGEM-RS-2022	Separación en la fuente Almacenamiento Recolección y transporte Aprovechamiento Disposición final Instrumentos de control

Fuente: Elaboración propia con datos de Gaceta Oficial del Distrito Federal (GODF), 2015, y Gaceta del Gobierno del Estado de México (GDGEM), 2009

## 2.

SISTEMAS DE INFORMACIÓN  
GEOGRÁFICA Y EVALUACIÓN  
MULTICRITERIO

1

Los sistemas de información geográfica (SIG) pertenecen al rubro de las nuevas tecnologías que surgen con la invención de la computadora y el desarrollo de la informática. Son considerados una de las tecnologías de la información geográfica junto a la teledetección y los sistemas de posicionamiento satelital (Zurita, 2011).

2

Los SIG constituyen un importante elemento de apoyo en las tareas de generación de mapas, planificación ambiental y ordenación del territorio (Bosque, 1997; Malczewski, 2004). Estas herramientas son fundamentales porque, además de permitir manipular variables ambientales, incorporan procedimientos con información no espacial, como por ejemplo la opinión de expertos en la materia (Olivas *et al.*, 2007).

3

Su origen se remonta a los años 60, teniendo como bases fundamentales las técnicas cartográficas y algunas operaciones de análisis, como por ejemplo la superposición de mapas ideada por McHarg (1969) o lo realizado por John Snow en el siglo XIX para localizar focos de contaminación (*hot spots*).

4

Es importante mencionar que en la actualidad esta herramienta no cuenta con una definición precisa, lo que ha causado confusión entre las personas interesadas en la temática, ya que se han definido de diversas

formas, dependiendo del punto de vista que asuma el autor en el área científica o la época contemporánea de la tecnología de ese momento.

De acuerdo con Malczewski (2004), la evolución de los SIG puede dividirse en tres períodos:

- i) **Inicios de la investigación SIG**, etapa ubicada entre los años de 1950-1970, conocida como “etapa de innovación”, en la que las aplicaciones más usuales eran la producción cartográfica (digitalización de elementos).
- ii) **Desarrollo de los SIG de uso general**, que abarca desde mediados de los 70 y hasta principios de los 80, en donde se continúa con la producción de cartografía automatizada, aunque haciendo énfasis en descripción de los atributos (bases de datos).
- iii) **Etapas de proliferación**, que va desde 1982 a 1990, caracterizada por la aparición de diversas empresas y universidades dedicadas a la generación de software SIG, como ESRI con su Arcview, Erdas e Intergraph con sus softwares correspondientes, además de IDRISI de la Universidad de Clark.

Para algunos otros autores como Gómez y Barredo (2005), ya corre un cuarto o quinto período en el que los avances más considerables estarán enfocados a la utilización y estandarización de los softwares SIG de código abierto, introducción de técnicas y programas compatibles con los SIG, aplicaciones SIG en web y en telefonía móvil, entre otros.

## 2.1 Evaluación multicriterio y sus componentes

Una de las técnicas espaciales mayormente empleadas en el ambiente de los SIG son las de evaluación multicriterio (EMC), las cuales son un

conjunto de operaciones que pueden usarse en los procesos de toma de decisiones, considerando varios criterios o condicionantes a la vez (Gómez y Barredo, 2005).

La base teórica de las técnicas EMC surgió en los años 70, en un contexto económico y político en el que se consideraba indispensable el concepto de “eficiencia” planteado por Vilfredo Pareto. Sin embargo, en el campo de los SIG no fue sino hasta mediados de los 80, con el impulso que la informática representó, que se asentaron algunas bases en el campo de la decisión territorial, gracias a lo aportado en Eastman *et al.* (1993), Barredo (1996) y Malczewski (1999).

En la actualidad, existen una gran variedad de técnicas EMC, inclusive algunas de ellas no adaptadas todavía al contexto espacial de los SIG. De acuerdo con Jankowski (1995), las técnicas EMC pueden ser clasificadas en dos clases: “compensatorias” y “no compensatorias”. Las técnicas EMC compensatorias son las más empleadas en los procesos de toma de decisión y tienen como requerimiento fundamental que el tomador de decisión especifique los pesos de los criterios, ya sea con valores cardinales o mediante funciones de prioridad.

Otro sistema de clasificación de las técnicas EMC, de acuerdo con Malczewski y Rinner (2015), puede ser con base en el tipo de procedimiento y *layer* (capa) a utilizar. En función de este argumento, existirían técnicas sustentadas en datos ráster como también otras en datos vectoriales.

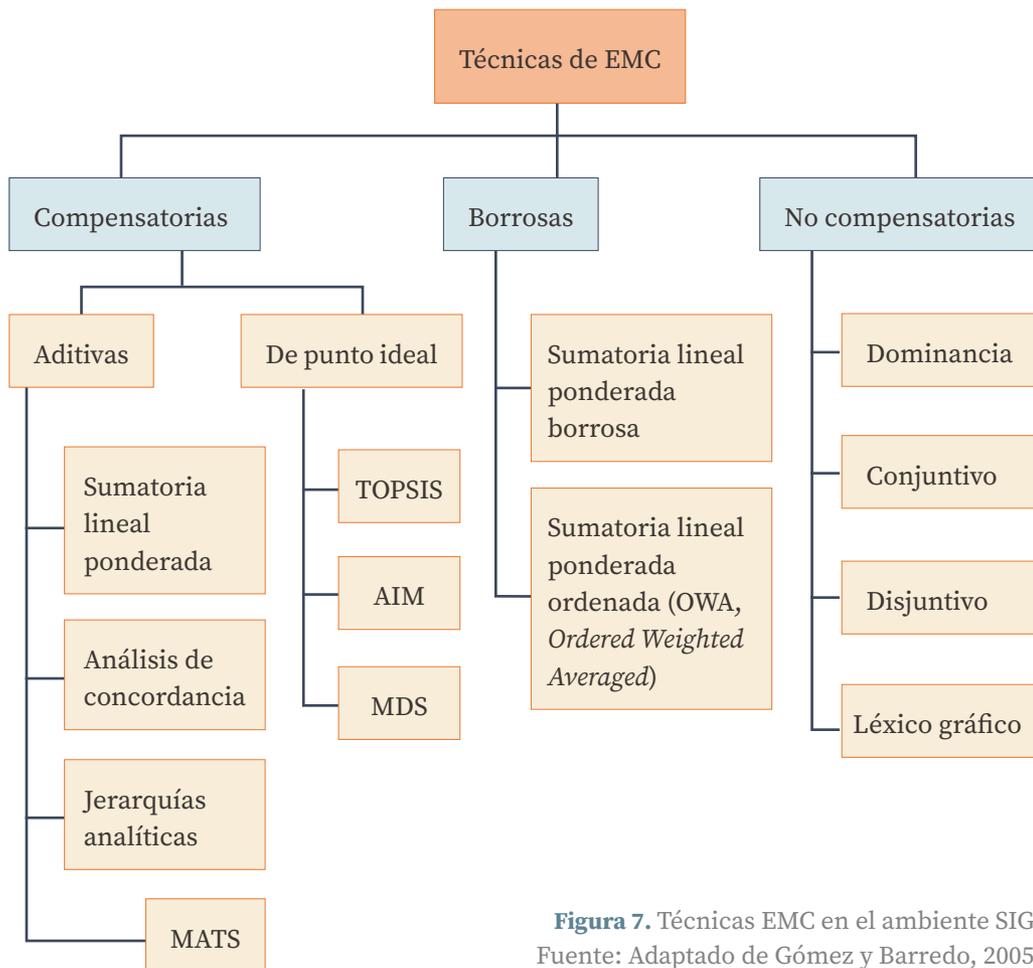
Por otro lado, en la actualidad, ha sido cotidiano el empleo de otro tipo de técnicas basadas en la filosofía de la lógica borrosa, haciendo uso de funciones de pertenencia. La **figura 7** presenta un sistema de clasificación de las técnicas EMC.

1

2

3

4



**Figura 7.** Técnicas EMC en el ambiente SIG  
Fuente: Adaptado de Gómez y Barredo, 2005

Para implementar algunas de las técnicas EMC, es importante entender sus componentes o partes que las conforman. En este sentido, en la **tabla 11**, se describen brevemente a cada uno de estos componentes.

La metodología multicriterio es una herramienta útil para la toma de decisiones y selección de alternativas, su uso es aplicable generalmente cuando la resolución de un problema requiere o incluye varios puntos de vista que deberán tomarse en cuenta.

**Tabla 11.** Componentes de la EMC

Componente	Descripción
Foco o meta	Se refiere al objetivo que se desea alcanzar para dar solución a un problema.
Crterios	<p>Son los distintos aspectos de la realidad que inciden de alguna manera en las ventajas o inconvenientes de las alternativas disponibles como soluciones al problema. Usualmente, se dividen en criterios y subcriterios, o también llamados criterios generales y criterios específicos.</p> <p>Tipos de criterios:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li><b>Factores:</b> aspectos de la realidad que aumentan o disminuyen la valoración de una alternativa como solución al problema. Los factores pueden ser cuantitativos u ordinales.</li> <li><b>Restricciones/limitantes:</b> aspectos de la realidad que determinan que alternativas son válidas o aceptables y cuales no lo son como solución al problema. Las restricciones son binarias.</li> </ol>
Alternativas	Son las diferentes soluciones o cursos de acción que se pueden tomar, dotadas todas ellas de ventajas e inconvenientes diferentes.

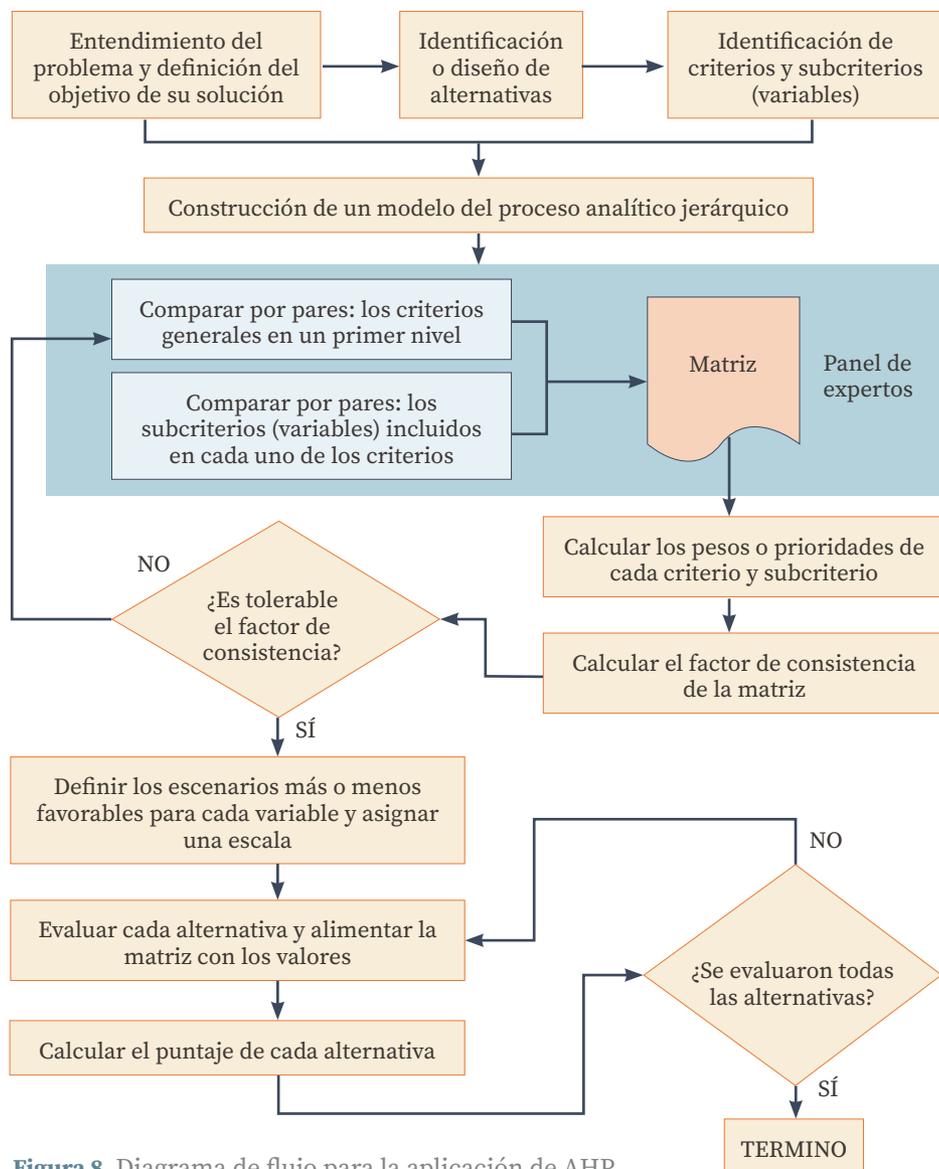
Fuente: Gómez y Bosque, 2007

En la aplicación de esta metodología, existen ciertos procedimientos que facilitan el problema que se desea resolver. Uno de los más usuales es el creado por Thomas L. Saaty en 1980, el cual es denominado como *proceso de análisis jerárquico* o AHP. Dicho procedimiento consiste en lo siguiente:

- ❖ dividir una situación compleja y poco estructurada en sus partes que la componen;
- ❖ arreglar estas partes, o variables, en un orden jerárquico;
- ❖ asignar valores numéricos a juicios subjetivos sobre la importancia relativa de cada variable, y

- ❖ sintetizar los juicios para determinar cuáles variables tienen la mayor prioridad y deben actuar bajo la influencia del resultado de la situación.

En la **figura 8**, se muestra la metodología AHP.



**Figura 8.** Diagrama de flujo para la aplicación de AHP

## 3.

## METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE ÁREAS Y SITIOS FACTIBLES

1

### 3.1 Estrategia general de trabajo

Es recomendable contar con un grupo de panel de expertos en el que participen un cierto número de especialistas en diversas áreas de estudio. De esta forma, a partir de grupos de trabajo, se pueden definir las variables que tienen mayor importancia y, al mismo tiempo, identificar los valores o umbrales en las variables.

Diversas referencias bibliográficas, como el *Manual de operación de rellenos sanitarios*, publicado por la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) en 1996, indican que el proceso de selección de áreas y sitios para el emplazamiento de infraestructura de disposición RSU o RME consta de tres etapas:

- I) definir áreas,
- II) seleccionar sitios y
- III) evaluar sitios.

Previamente al desarrollo de este flujo de trabajo, es necesario elegir aquellas variables que tienen un papel importante en el proceso de selección. En la **figura 9**, se ilustra el flujo de trabajo; y después, en los apartados siguientes, se describe de manera breve cada una de estas etapas.

2

3

4



**Figura 9.** Flujo de trabajo para la selección de áreas y sitios factibles

### 3.2 Identificación de variables e indicadores

La “elección de las variables a emplear” es una actividad previa al flujo de trabajo, mostrado en la **figura 10**, la cual es fundamental, debido a que las variables tienen participación en las tres etapas mencionadas con anterioridad.

Para una buena elección de variables, es necesario conjuntar un equipo de trabajo con especialistas en diversas áreas, quienes definirán las variables.

### 3.3 Proceso de análisis para ubicar áreas factibles

La primera etapa, denominada “definición del área factible”, consiste en delimitar las áreas para la búsqueda de los sitios en los cuales pueda emplazarse la infraestructura de depósito de los RC&D.

Usualmente, en el desarrollo de esta etapa, se ejecuta un análisis cartográfico de gabinete, empleando alguna técnica de EMC o el álgebra booleana, en el que se integran numerosas variables o criterios que participan en el proceso de selección (**figura 10**).

$$\begin{array}{|c|c|} \hline 1 & 2 \\ \hline 4 & 1 \\ \hline \end{array} * 0.4 + \begin{array}{|c|c|} \hline 1 & 2 \\ \hline 3 & 3 \\ \hline \end{array} * 0.6 = \begin{array}{|c|c|} \hline 0.8 & 1.6 \\ \hline 2.8 & 0.8 \\ \hline \end{array}$$

La técnica de análisis multicriterio consiste en realizar una sumatoria lineal ponderada, es decir, multiplicar cada una de las capas o variables seleccionadas y previamente clasificadas por un ponderador, y posteriormente, realizar una sumatoria. Como resultado de este análisis, se obtendrá una capa o cartografía con valores que fluctúan en un determinado rango: los valores más bajos corresponderán a aquella porción de terreno o superficie menos apta, mientras que los valores altos serán los de mayor aptitud.

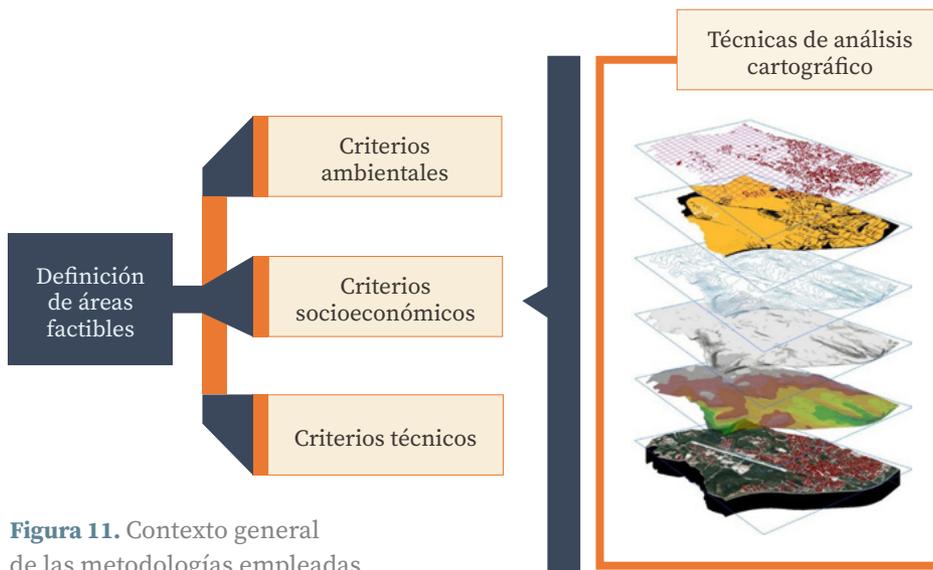
$$\begin{array}{|c|c|} \hline 1 & 1 \\ \hline 0 & 0 \\ \hline \end{array} * \begin{array}{|c|c|} \hline 0 & 1 \\ \hline 1 & 1 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|} \hline 0 & 1 \\ \hline 0 & 0 \\ \hline \end{array}$$

Capa 1                      Capa 2                      Capa resultado

La técnica de álgebra booleana consiste en multiplicar un conjunto de capas, previamente clasificadas en 0 (ceros) y 1 (unos), en el que los valores de 0 corresponden a áreas no factibles, mientras que los valores de 1 son las áreas factibles.

**Figura 10.** Metodologías empleadas para definir áreas factibles

Cabe hacer mención que los criterios o variables empleados pueden agruparse en tres criterios denominados “ambiental, socioeconómico y técnico” (figura 11).



**Figura 11.** Contexto general de las metodologías empleadas

Por otro lado, al ejecutar cualquiera de las técnicas cartográficas, siempre será idóneo usar el mayor número de variables; sin embargo, este proceso requerirá de un mayor tiempo de procesamiento, ya que cada variable o criterio corresponde a una capa (cartografía) por elaborar o adquirir, y posteriormente, emplear. Al respecto, en este Manual se sugiere emplear de tres a cinco variables mínimas, en forma de capas o cartografía, por ejemplo, la delimitación de áreas naturales protegidas o el uso de suelo, pues son aquellas que por sí solas pueden hacer inviable el proyecto.

Para el caso particular de este tipo de emplazamientos, dentro de los criterios para la ubicación de áreas factibles, se sugiere considerar mínimo los siguientes:

- ❖ Zonas pobladas y urbanizadas
- ❖ Zonas inundables o con cuerpos de agua superficial
- ❖ Pertenencia a un área natural protegida, de reserva o de valor arqueológico
- ❖ Zonas de jurisdicción federal o estatal
- ❖ Topografía del terreno

Para cada una de estas variables, se debe generar una cartografía que contenga información oficial, y de no contarse con esta, la recopilada en campo con el fin de aplicar la metodología sobre los SIG.

Con respecto a los *criterios ambientales*, estos usualmente están relacionados con la normatividad y legislación existente en algunos países. En este sentido, dichos criterios constituyen el primer paso o grupo de restricciones de observancia obligatoria para poder lograr el emplazamiento de infraestructura de depósito de RC&D.

Algunas de las variables consideradas a la hora de ubicar un sitio de disposición final de RC&D son las que conforman el criterio ambiental y se presentan en la **tabla 12**.

**Tabla 12.** Descripción de variables que constituyen el criterio ambiental

VARIABLES	DESCRIPCIÓN
Áreas de importancia natural	Usualmente no es permitido edificar algún tipo de infraestructura en estos lugares, ya que representan sitios de alta importancia con gran cantidad de especies animales y vegetales.
Capa vegetal existente	Siempre será preferible emplazar infraestructura de RC&D en lugares con una baja densidad vegetal como minas o canteras, en lugar de bosques o zonas altamente pobladas vegetalmente.

Variables	Descripción
Permeabilidad del suelo	Variable que está relacionada con los tipos de suelo de la zona de estudio y que puede limitar el movimiento de los lixiviados en los sitios de depósito.
Afectación de agua superficial	Será necesario ubicar la infraestructura de depósito de RC&D lo más lejana posible a cuerpos y corrientes de agua en la zona de estudio a fin de evitar daños ambientales.
Afectación a fauna	Se buscará que la infraestructura por emplazar sea ubicada en lugares con baja presencia de fauna, especialmente las endémicas.
Contaminación de aire y ruido en las cercanías	Debido a la gran cantidad de polvos y ruido provenientes del movimiento de los materiales térricos dentro de los RC&D, será preferible que esta infraestructura esté lo más lejos posible de zonas poblacionales.

Por otra parte, los *criterios técnicos* representan un paso necesario y consecutivo a los criterios ambientales, dado que están directamente relacionados con el funcionamiento y operación de la infraestructura, y no sobre la afectación al ambiente. Algunas de las variables que constituyen el criterio técnico se presentan en la **tabla 13**.

**Tabla 13.** Descripción de variables que constituyen el criterio técnico

Variables	Descripción
Área del predio	Variable de importancia que está relacionada a la vida útil que puede tener la infraestructura. Se buscarán lugares con extensiones de terreno para favorecer una mayor vida útil de la infraestructura.
Zonas de producción de RC&D	Siempre será importante localizar el sitio de depósito lo más cercano posible a las zonas de producción de RC&D, debido a las implicaciones económicas.

Variables	Descripción
Características de vialidades de acceso	Las condiciones de tránsito de las vías de acceso al sitio de disposición afectan el costo global del sistema de disposición, porque pueden retardar los viajes y dañar los vehículos; por lo tanto, el sitio debe estar bien comunicado por vías pavimentadas, o bien con un camino de acceso corto no pavimentado, pero transitable en toda época del año.
Topografía del terreno	Un sitio de depósito de residuos puede diseñarse y operarse en cualquier tipo de topografía; sin embargo, siempre será preferible aquel lugar en el que se pueda lograr un mayor volumen aprovechable por hectárea.
Presencia de infraestructura hidráulica	A fin de evitar daños en la infraestructura hidráulica, como tuberías o canales, será idóneo evitar el emplazamiento de la infraestructura de depósito de RC&D en las cercanías.
Capacidad de carga del suelo	Los RC&D pueden provocar asentamientos a causa del peso volumétrico que tienen, por lo cual se buscarán aquellos terrenos o áreas con suelos duros y roca.
Cuencas de captación alrededor del sitio	Esta variable se relaciona con la aportación de corrientes de agua al área de depósito de RC&D durante época de lluvias, la cual podría causar deslizamientos; por lo tanto, será necesario buscar áreas fuera de las cuencas de captación.
Presencia de infraestructura urbana	Similar a la variable de infraestructura hidráulica. Las áreas de depósito de RC&D deben ubicarse lo más lejos posible de la infraestructura existente, como cableado de corriente eléctrica y telefonía.
Flujo vehicular	Para evitar tiempos de operación excesivos dentro del sitio de depósito de RC&D, es necesario considerar el tipo de vialidad y su flujo, evitando aquellas áreas donde el acceso se realice a través de vías muy transitadas.

VARIABLES	DESCRIPCIÓN
Encharcamientos y/o inundaciones	Para evitar fallas en la fase de operación del sitio de disposición de RC&D, se deben evitar a toda costa aquellas zonas que sean susceptibles de inundaciones o encharcamientos, sobre todo en época de lluvias.
Fallas y fracturas	Con el fin de evitar deslizamiento de material térreo, la infraestructura de depósito de RC&D deberá de ubicarse fuera de las fallas o fracturas encontradas en las áreas de estudio.

Los *criterios socioeconómicos*, por último, se relacionan con la afectación al ser humano y con los costos que ocasiona el emplazamiento de la infraestructura. Algunas de las variables, que constituyen el criterio socioeconómico, se presentan en la **tabla 14**.

**Tabla 14.** Descripción de variables que constituyen el criterio socioeconómico

VARIABLES	DESCRIPCIÓN
Factibilidad de adquisición	Deberán buscarse aquellos sitios o áreas que no pertenezcan a un régimen privado, es decir, que sean propiedad del mismo municipio. Por otra parte, en caso de pertenecer al régimen privado, debe buscarse que el propietario tenga buena actitud para negociar la venta del terreno.
Aceptación comunal	Será imprescindible lograr la aceptación para el emplazamiento de la infraestructura por parte de la comunidad, ya que, en muchas ocasiones, este tipo de proyectos no se realizan por la oposición de grupos sociales.
Uso de suelo	Para emplazar la infraestructura de depósito de RC&D, deberá buscarse aquellos usos de suelo que sean compatibles con las actividades que se realizarán.

Variables	Descripción
Cercanías a zonas poblacionales	Generalmente, el emplazamiento de sitios de depósito es mal visto por los habitantes cuando se ubica en las cercanías de zonas poblacionales, aun cuando esta infraestructura tenga todas las medidas de control necesarias para evitar daño alguno. Con lo anterior, se podría afirmar que mientras más lejos de las zonas poblacionales, mejor ubicada estará la infraestructura.
Costo del terreno	El costo del terreno juega un papel importante, ya que si no es considerado, difícilmente podrá emplazarse la infraestructura. En ocasiones, es prudente mantener en secreto el objetivo al que irá destinado el sitio o área, dado que es usual que los dueños eleven el costo por hectárea.
Presencia de grupos u organizaciones en cercanías	Muy relacionada a la variable de aceptación comunal. En este sentido, deberá analizarse el entorno de la zona donde se pretenda emplazar la infraestructura, debido a la posible oposición de grupos sociales.

### 3.4 Ponderación de variables y proceso de análisis jerárquico para la selección de sitios factibles

Una de las técnicas de EMC de mayor estudio a nivel mundial es la denominada “proceso de análisis jerárquico”, mejor conocida como AHP, por sus siglas en inglés. Saaty (1980), creador de la técnica, indica que el AHP consiste en dividir un problema o situación compleja en sus partes o variables que la componen, a partir de un arreglo en orden jerárquico, para después asignarles valores numéricos a juicios subjetivos sobre la importancia relativa de cada parte o variable, con el fin de sintetizarlos para determinar cuáles tienen la mayor prioridad. Cabe recalcar

que, al dividir la situación o problema en partes o variables, la persona que evalúa puede centrarse en conjuntos más pequeños de decisiones.

Por lo general, el esquema jerárquico consta usualmente de tres niveles básicos: meta final, criterios de decisión (usualmente acompañados de subcriterios) y alternativas de solución (Malczewski y Rinner, 2015).

Es importante mencionar que en la actualidad las técnicas de EMC, en específico el AHP, puede emplearse como una función de sustentabilidad al integrar criterios sociales, económicos y ambientales. Esto se puede analizar, por ejemplo, en trabajos como el de Banai (1989). La función general se representa en la siguiente expresión:

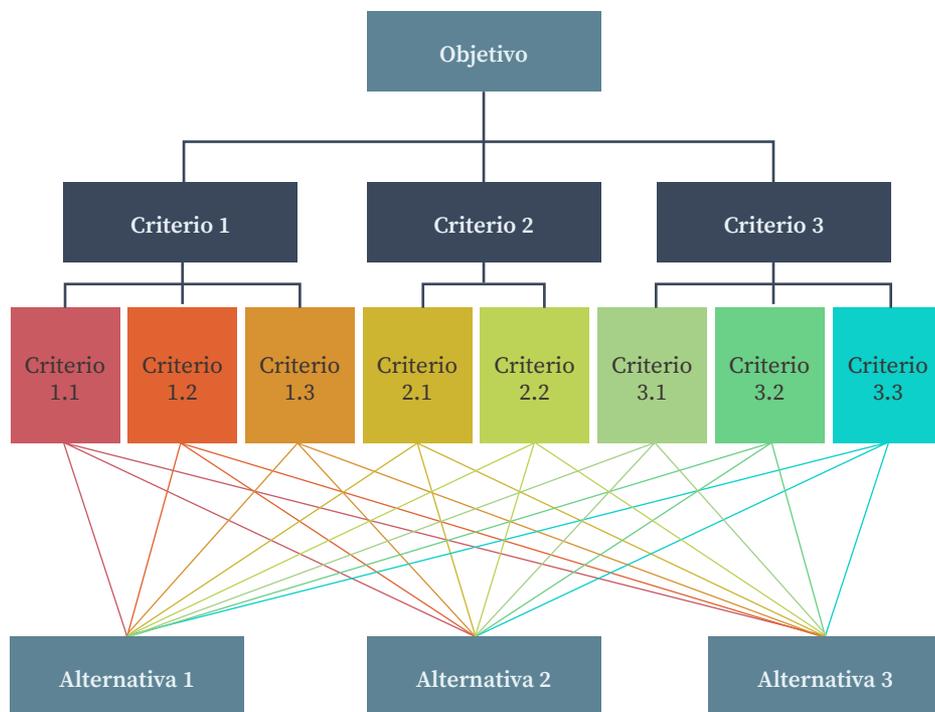
$$V(A_i) \sum_{k=1}^n w_l w_{k(l)} v(a_{ik})$$

Donde  $v(a_{ik})$  es la función de valor,  $w_l$  es el peso asociado con el  $l$ -ésimo objetivo ( $l=1, 2 \dots, p$ ), y  $w_{k(l)}$  es el peso asignado al  $k$ -ésimo atributo asociado con el  $l$ -ésimo objetivo.

A partir de la base teórica de los capítulos anteriores, se puede realizar el proceso de estructuración del análisis jerárquico para el emplazamiento de un SDF de RC&D. Consiste en un método matemático para evaluar alternativas cuando se tienen en consideración varios criterios. El AHP utiliza comparaciones entre par de elementos para construir matrices a partir de estas comparaciones y al usar elementos de álgebra matricial, y de esta manera, poder establecer prioridades entre los elementos de un nivel con respecto a un elemento de un nivel inmediatamente superior.

A continuación, se presenta un ejemplo para ilustrar de manera sencilla el desarrollo de la técnica AHP, en particular, para seleccionar un sitio de disposición final de RC&D.

Al respecto, se deben establecer los criterios para la toma de decisiones. Cabe resaltar que pueden considerarse un gran número de criterios. En la **figura 12**, se muestra cómo se pueden agrupar dichos criterios. Para el ejemplo, se consideran solo tres criterios generales.



Nivel 1 es el objetivo principal del análisis.

Nivel 2 es el multicriterio, donde se puede añadir otros niveles de subcriterio.

Último nivel es el de las alternativas de elección.

**Figura 12.** Desarrollo de la técnica AHP

Fuente: Carrión, 2015

Las *alternativas* son las diferentes soluciones o cursos de acción. Para el proyecto en cuestión, este aspecto está representado por todos los sitios que se seleccionaron como posible lugar de emplazamiento del SDF de RC&D.

Se tendrán “n” posibles de sitios, ya sean propuestos por autoridades locales, estatales y municipales o por un grupo de especialistas que participen en el proyecto, los cuales se identificarán a partir de cartografía y de las diversas visitas a campo. Como ejemplo se consideran solo tres posibles sitios, codificados como indica la **tabla 15**.

**Tabla 15.** Posibles sitios

No.	Nombre predio
P1	Sitio 1
P2	Sitio 2
P3	Sitio 3
Pn	Sitio n

Los tres criterios generales seleccionados para este ejemplo se muestran en la **tabla 16**.

**Tabla 16.** Criterios generales

Criterios generales	Clave
1. Criterio ambiental	CG. 1
2. Criterio socioeconómico	CG. 2
3. Criterio técnico	CG. 3

Con base en los criterios generales, se definen de manera congruente los criterios específicos. En este ejemplo, se tomarán los criterios específicos de las **tablas 17, 18 y 19**. Por razones prácticas, se eligieron los primeros seis criterios específicos. En caso de que existan “n” criterios específicos, todos y cada uno de ellos deben ser considerados. En la **tabla 17**, se muestran los criterios generales y específicos con una clave que los identifica.

**Tabla 17.** Criterios generales y específicos de evaluación

Criterios generales y específicos					
CG.1	Criterio ambiental	CG.2	Criterio socioeconómico	CG.3	Criterio técnico
i.1	Áreas de importancia natural	j.1	Factibilidad de adquisición	k.1	Área del predio
i.2	Afectación de la capa vegetal existente	j.2	Aceptación comunal	k.2	Cercanías a zonas de producción de RC&D
i.3	Permeabilidad del suelo y afectación de agua subterránea	j.3	Uso de suelo	k.3	Distancia, tipo, ancho y longitud de vialidades de acceso
i.4	Afectación de la calidad de agua superficial	j.4	Cercanías o colindancias a zonas poblacionales	k.4	Topografía del terreno
i.5	Afectación a fauna presente en el sitio	j.5	Costos del terreno	k.5	Presencia de infraestructura hidráulica (canales, acueductos, tanques o cajas de almacenamiento, pozos de visita, plantas de tratamiento, etc.)
i.6	Afectación a la calidad de vida por contaminación de aire y ruido en las cercanías	j.6	Presencia de grupos u organizaciones en las cercanías del emplazamiento de la obra	k.6	Capacidad de carga del suelo

Fuente: Elaboración propia

Un aspecto de suma importancia a tomar en cuenta en el análisis multicriterio, específicamente cuando se emplea el AHP, es el del establecimiento de prioridades entre los elementos de la jerarquía.

Para realizar estas comparaciones de tal forma que sea de una manera ordenada, se aplica la matriz de *comparaciones por pares*. Es una matriz que agrupa a criterios del mismo nivel para que se puedan comparar unos con respecto a otros y así determinar la importancia relativa a cada uno de estos criterios.

De esta manera, los elementos de la jerarquía que pueden compararse son:

- ❖ Los criterios generales
- ❖ Los criterios específicos dentro de cada criterio general
- ❖ Las alternativas (cuando sea posible, según el número de ellas)

A continuación, se presenta la comparación por pares para los criterios generales y específicos. Para esto, se deben asignar valores a los criterios para poder realizar la ponderación de variables; los valores se muestran en la **tabla 18**.

**Tabla 18.** Escalas de valores de Saaty (1980)

Intensidad	Definición	Explicación
1	De igual importancia	Dos actividades contribuyen de igual forma al objetivo.
3	Moderada importancia	La experiencia y el juicio favorecen levemente a una actividad sobre la otra.
5	Importancia fuerte	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente una actividad sobre la otra.
7	Muy fuerte o demostrada	Una actividad es mucho más favorecida que la otra; su predominancia se demostró en la práctica.

Intensidad	Definición	Explicación
9	Extrema	La evidencia que favorece una actividad sobre la otra es absoluta y totalmente clara.
2,4,6,8	Valores intermedios	Cuando se necesita un compromiso de las partes entre los valores adyacentes.
Recíprocos	$a_{ij} = 1 / a_{ji}$	Hipótesis del método.

Los valores 2, 4, y 6 se utilizan cuando no se puede definir con claridad la preferencia entre los factores. Estos son valores intermedios de preferencia.

Una vez definidos los criterios y asignados los valores, se realiza la comparación por pares. A fin de comparar los criterios generales, se tendrá una matriz como la que se presenta en la **tabla 19**. Los valores de 1 reflejan la comparación del factor contra sí mismo. Los valores por encima de la diagonal son elegidos, dependiendo la preferencia o importancia que exista entre los criterios. Estos valores son escogidos de acuerdo con los valores presentados en la escala de comparación de Saaty (1980).

En cambio, los valores que se encuentran debajo de la diagonal corresponden a los inversos, es decir, que la comparación se realiza en los dos sentidos. La obtención de los pesos se efectúa posteriormente al tener los resultados de la comparación por pares.

**Tabla 19.** Comparación por pares

Criterios generales	Comparación por pares		
	Socioeconómico	Técnico	Ambiental
Socioeconómico	1.00	4.00	6.00
Técnico	0.25	1.00	2.00
Ambiental	0.17	0.50	1.00

En la **tabla 20**, se muestra el resultado de la comparación por pares, donde se pueden apreciar los pesos de cada criterio.

**Tabla 20.** Asignación de pesos a criterios generales

Criterios generales	Cálculo de pesos			Suma	Pesos	% Pesos
	Socioeconómico	Técnico	Ambiental			
Socioeconómico	1.00	4.00	6.00	11.00	0.6911	69.11
Técnico	0.25	1.00	2.00	3.25	0.2042	20.42
Ambiental	0.17	0.50	1.00	1.67	0.1047	10.47
<b>Total</b>	<b>1.42</b>	<b>5.50</b>	<b>9.00</b>	<b>15.9</b>	<b>1.0000</b>	<b>100</b>

Según los resultados, el principal criterio general “socioeconómico” es aquel de mayor importancia. Los criterios socioeconómicos pueden tener un carácter restrictivo en muchos casos, por ejemplo, la adquisición del terreno, la aceptación comunal, cercanías a zonas poblacionales; por lo tanto, dichos criterios sí pueden llegar a ser limitativos para construir o no un SDF.

El criterio “técnico” por su parte, se puede considerar como un parámetro que le sigue en importancia al criterio socioeconómico, aunque la única limitante que se puede presentar sería la de los medios económicos para solventarlo, en caso de que se requieran nuevas obras de ingeniería para sustituir las fallas que puedan presentarse en algún área o sitio.

Ahora bien, el criterio general “ambiental” es el de mediana importancia de acuerdo con la base teórica. Esto da pie a afirmar que los criterios específicos derivados de este criterio general, la mayoría de ellos no son normados (mencionados en la NOM-083SEMARNAT-2003). Si bien en su mayor parte estos criterios no son restrictivos, deberán cumplirse, aunque no se tiene una afectación o riesgo en este criterio que pueda afectar al medio ambiente.

Asimismo, como se realizó la asignación de valores para los criterios generales elegidos de la **tabla 21**, escalas de comparación de Saaty (1980), según la preferencia o importancia que exista entre ellos, toca el turno de seleccionar los valores para cada uno de los criterios específicos a través de dichas escalas de comparación y obtener los pesos correspondientes para cada criterio. En las **tablas 17, 18 y 19**, se muestra la comparación por pares para cada criterio.

**Tabla 21.** Asignación de pesos al criterio ambiental

Criterio ambiental	Clave	Criterios específicos	i.1	i.2	i.3	i.4	i.5	i.6	Suma	Peso	%
	i.1	Áreas de importancia natural	1.00	2.00	3.00	3.00	4.00	5.00	18.00	0.34	33.99
	i.2	Afectación de la capa vegetal existente	0.50	1.00	2.00	2.00	3.00	3.00	11.50	0.22	21.72
	i.3	Permeabilidad del suelo y afectación de agua subterránea	0.33	0.50	1.00	2.00	2.00	3.00	8.83	0.17	16.68
	i.4	Afectación de la calidad de agua superficial	0.33	0.50	0.50	1.00	2.00	3.00	7.33	0.14	13.85
	i.5	Afectación a fauna presente en el sitio	0.25	0.33	0.50	0.50	1.00	2.00	4.58	0.09	8.66
	i.6	Afectación a la calidad de vida por contaminación de aire y ruido en las cercanías	0.20	0.33	0.33	0.33	0.50	1.00	2.70	0.05	5.10
	Total		2.62	4.67	7.33	8.83	12.50	17.00	52.95	1.00	100.00

**Tabla 22.** Asignación de pesos al criterio socioeconómico

Criterio socioeconómico	Clave	Criterios específicos	j.1	j.2	j.3	j.4	j.5	j.6	Suma	Peso	%
	j.1	Factibilidad de adquisición	1.00	3.00	4.00	4.00	5.00	5.00	22.00	0.40	39.83
	j.2	Aceptación comunal	0.33	1.00	2.00	2.00	3.00	3.00	11.33	0.21	20.52
	j.3	Uso de suelo	0.25	0.50	1.00	1.00	2.00	3.00	7.75	0.14	14.03
	j.4	Cercanías o colindancias a zonas poblacionales	0.25	0.50	1.00	1.00	2.00	2.00	6.75	0.12	12.22
	j.5	Costo del terreno	0.20	0.33	0.50	0.50	1.00	2.00	4.53	0.08	8.21
	j.6	Presencia de grupos u organizaciones en las cercanías del emplazamiento de la obra	0.20	0.33	0.33	0.50	0.50	1.00	2.87	0.05	5.19
	Total		2.23	5.67	8.83	9.00	13.50	16.00	55.23	1.00	100

**Tabla 23.** Asignación de pesos al criterio técnico

Criterio técnico	Clave	Criterios específicos	k.1	k.2	k.3	k.4	k.5	k.6	Suma	Peso	%
	k.1	Área del predio	1.00	2.00	2.00	3.00	3.00	4.00	15.00	0.32	31.52
	k.2	Cercanías a zonas de producción de RC&D	0.50	1.00	1.00	2.00	2.00	3.00	9.50	0.20	19.96
	k.3	Distancia, tipo, ancho y longitud de vialidades de acceso	0.50	1.00	1.00	2.00	2.00	3.00	9.50	0.20	19.96
	k.4	Topografía del terreno	0.33	0.50	0.50	1.00	1.00	2.00	5.33	0.11	11.21
	k.5	Presencia de infraestructura hidráulica (canales, acueductos, tanques o cajas de almacenamiento, pozos de visita, plantas de tratamiento, etc.)	0.33	0.50	0.50	1.00	1.00	2.00	5.33	0.11	11.21
	k.6	Capacidad de carga del suelo	0.25	0.33	0.33	0.50	0.50	1.00	2.92	0.06	6.13
	Total		2.9	5.3	5.3	9.5	9.5	15.0	47.6	1.0	100.0

Para concluir este análisis, debe validarse que los juicios no tengan errores entre ellos, es decir, que sean consistentes. Esto se revisa a través del cálculo de la proporción de consistencia.

**Proporción de inconsistencia (CC).** Se define como el cociente entre el índice de consistencia (CI) y el índice aleatorio (RI):

$$CC = CI/RI$$

El valor de esta proporción de consistencia no debe superar el 10%, para que sea evidencia de un juicio informado. Si ocurriera el caso de que la proporción de consistencia es mayor a 10%, entonces hay que volver a revisar los juicios ingresados en la matriz de comparaciones a pares y solucionar la inconsistencia (buscando consensos entre el o los otros agentes).

**Índice de consistencia (CI):** es una medida de la desviación de la consistencia de la matriz de comparaciones a pares. La forma de obtenerlo es a través del máximo valor propio de la matriz de comparaciones. En casos donde pueda existir inconsistencia en los juicios, el valor propio tiende a ser mayor que el rango de la matriz. Este coeficiente de consistencia se determina utilizando el siguiente algoritmo:

$$CI = \frac{\lambda_{\text{máx}} - n}{n - 1}$$

Donde:

$\lambda_{\text{máx}}$  = es el máximo valor propio de la matriz de comparaciones a pares.

$n$  = es el número de criterios.

**Índice aleatorio (RI):** es el índice de consistencia de una matriz recíproca aleatoria, con recíprocos forzados, del mismo rango de escala de 1 hasta 9. Los valores de RI están incluidos por Saaty (1980) en la matriz de la tabla 24 (aunque puede calcularse) y sirven para hacer los cálculos de la proporción de consistencia.

**Tabla 24.** Valores de RI calculados por Saaty (1980)

<i>N</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Random consistency index (R.I)	0	0	0.52	0.89	1.11	1.26	1.35	1.40	1.45	1.49

En este ejemplo, los coeficientes de consistencia fueron valores aceptables en las matrices mostradas en las **tablas 16, 17, 18 y 19**. Todos los valores fueron menores de 0.10, es decir, los juicios son consistentes.

Por otra parte, siguiendo con el proceso de análisis jerárquico, los subcriterios, es decir, los criterios inmersos dentro de los criterios específicos fueron elaborados por un panel de expertos que tomó en cuenta las restricciones y parámetros técnicos ya mencionados anteriormente. La asignación del valor o normalización correspondiente a cada subcriterio, a manera de ejemplo, se realizó en una escala de 0 a 3, en la cual “0” (cero) será asignado para la condición menos favorable y “3” (tres) para la condición más favorable. Es importante resaltar que las asignaciones de los valores deberán ser propuestas de acuerdo con el conocimiento y experiencia de los especialistas, como fue el caso de los valores seleccionados por un panel de expertos (**tablas 22, 23 y 24**).

**Tabla 25.** Asignación de valores a los subcriterios ambientales

Criterio general	No.	Criterio específico	Umbral/condición/situación	Normalización	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3
Criterio ambiental	i.1	Afectación de la capa vegetal existente	No existe capa vegetal. El sitio se encuentra en un terreno árido o la capa vegetal ha sido removida por uso anterior.	3	2	1	2
			Existe una capa vegetal de menor importancia (pastizales). No hay especies endémicas en el sitio.	2			
			Existen plantas endémicas de la región en el sitio, así como presencia de cobertura vegetal densa.	1			
	i.2	Áreas de importancia natural	El sitio se encuentra fuera de una zona de importancia natural.	3	3	0	3
			El sitio se encuentra dentro de una zona de importancia natural.	0			
	i.3	Permeabilidad del suelo y afectación de agua subterránea	Permeabilidad lenta, suelos totalmente arcillosos, capas freáticas muy profundas (>20 m).	3	2	2	3
			Permeabilidad moderada, suelos con afloramientos rocosos, capas freáticas intermedias.	2			
			Permeabilidad rápida, suelos totalmente arenosos, capas freáticas muy cercanas a la superficie (1-4 m).	1			

Criterio general	No.	Criterio específico	Umbral/condición/situación	Normalización	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3
Criterio ambiental	i.4	Afectación a la calidad de vida por contaminación de aire y ruido en las cercanías	En las cercanías del predio, se realizan otras actividades que producen ruido constante, lo cual no es relevante o no existe una localidad en las cercanías que pudiera verse afectada.	3	3	0	3
			En las cercanías del predio, no existen otras actividades que generen ruido constante; presencia de localidades en las cercanías que pueden verse afectadas.	0			
	i.5	Afectación de fauna presente en el sitio	No existe fauna presente en predio o la que se encuentra presente no es de importancia endémica ni ambiental.	3	3	2	3
			En el predio, existe fauna de importancia media que no es endémica ni de importancia ambiental.	2			
			En el predio, existe fauna de importancia ambiental o endémica.	1			
	i.6	Afectación de la calidad de agua superficial	En las cercanías del predio, no existen aguas superficiales que pudieran verse afectadas por la actividad.	3	3	3	2
			El efecto adverso será medianamente significativo sobre el cuerpo receptor.	2			
			Puede haber una afectación severa en las aguas superficiales de las cercanías por escurrimiento o arrastre de materiales o desvío de cauce.	1			

**Tabla 26.** Asignación de valores a los subcriterios socioeconómicos

Criterio general	No.	Criterio específico	Umbral/condición/situación	Normalización	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3
Criterio socioeconómico	j.1	Uso de suelo	Tierras de uso común, sin uso actual.	3	3	3	2
			Tierras parceladas, cultivos.	2			
			Tierras para asentamientos humanos.	1			
	j.2	Cercanías o colindancias a zonas poblacionales	Poblaciones a más de 1000 m de distancia.	3	1	1	2
			Poblaciones entre 500-000 m de distancia.	2			
			Poblaciones a menos de 500 m de distancia.	1			
	j.3	Factibilidad de adquisición (propiedad)	El sitio pertenece al municipio o a otra institución estatal, por lo que es fácil la adquisición.	3	2	1	1
			El sitio pertenece a un solo propietario privado o varios, pero con actitud positiva.	2			
			Existe o puede haber hostilidad al proyecto de parte de los propietarios. No se puede determinar o contactar a todos los propietarios. Hay licitaciones concernientes a los títulos de propiedad. Se exigen precios exorbitantes o condiciones similarmente desfavorables.	1			
	j.4	Costo del terreno	El terreno es factible de adquirirse y tiene un costo barato.	3	3	0	3
			No es factible de adquirirse el terreno o es difícilmente adquirible. Su costo es caro y no factible.	0			

Criterio general	No.	Criterio específico	Umbral/condición/situación	Normalización	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3
Criterio socioeconómico	j.5	Aceptación comunal	Aceptación alta. Se han construido en las cercanías otras obras de infraestructura que no han generado el descontento en la comunidad.	3	3	1	1
			Aceptación media. Población dividida entre aceptar o no el emplazamiento de la obra, debido a que en la zona de emplazamiento no se ha presentado la edificación de otro tipo de infraestructura o similares.	2			
			Aceptación baja. Se ha presentado el descontento de la población con la realización de obras en la zona de emplazamiento del proyecto.	1			
	j.6	Oferta de empleo derivado de la ejecución del proyecto	Más de 50 % de los trabajadores de la infraestructura a emplazar pertenecen a la zona de influencia o comunidades cercanas.	3	3	1	2
			Entre el 20 % y el 50 % de los trabajadores de la infraestructura a emplazar pertenecen a la zona de influencia o comunidades cercanas.	2			
			Menos del 20 % de los trabajadores de la infraestructura a emplazar pertenecen a la zona de influencia o comunidades cercanas.	1			

**Tabla 27.** Asignación de valores a los subcriterios técnicos

Criterio general	No.	Criterio específico	Umbral/condición/situación	Normalización	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3
Criterio técnico	k.1	Área del predio	El predio tiene más de 50 Ha.	3	3	1	3
			El predio tiene un área de 25 a 50 Ha.	2			
			El predio tiene menos de 25 Ha.	1			
	k.2	Cercanías a zonas de producción de RC&D	El centro de gravedad de las zonas de producción de RC&D se encuentra a menos de 10 km respecto del área de emplazamiento de la obra.	3	2	3	1
			El centro de gravedad de las zonas de producción de RC&D se encuentra entre 10 y 20 km respecto del área de emplazamiento de la obra.	2			
			El centro de gravedad de las zonas de producción de RC&D se encuentra a más de 20 km respecto del área de emplazamiento de la obra.	1			
	k.3	Distancia, tipo, ancho y longitud de vialidades de acceso	Vía de acceso pavimentada existente hasta el sitio propuesto. Tiene más de 8 m de ancho. No se necesita construcción adicional.	3	2	3	2
			Vía de acceso pavimentada a una distancia menor a 500 m del predio considerado. Se debe construir el tramo de acceso.	2			
			Vía de acceso pavimentada a más de 1 km de distancia.	1			

Criterio general	No.	Criterio específico	Umbral/condición/situación	Normalización	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3
Criterio técnico	k.4	Topografía del terreno	Zonas planas a semiplanos o con pequeñas ondulaciones con pendientes menores al 10 %.	3	2	2	3
			Lomeríos suaves con pendientes máximas de 20 %.	2			
			Terrenos muy abruptos con pendientes mayores de 20 %.	1			
	k.5	Presencia de infraestructura hidráulica (canales, acueductos, tanques o cajas de almacenamiento, pozos de visita, plantas de tratamiento, etc.)	No existe la presencia de infraestructura dentro del predio o en las cercanías que pudieran ser afectadas por la obra a emplazar.	3	3	3	0
			Existe la presencia de infraestructura dentro del predio o en las cercanías que pudieran ser afectadas por la obra a emplazar.	0			
	k.6	Capacidad de carga del suelo	Mayor a 50 Ton/m <sup>2</sup> con presencia de suelos duros y roca.	3	3	3	2
			Terrenos con capacidades de entre 15 y 50 Ton/m <sup>2</sup> en suelos intermedios.	2			
			Menor a 15 Ton/m <sup>2</sup> en suelos blandos	1			

Una vez elaborada una tabla con sus respectivos valores asignados para cada uno de los sitios analizados, se realizan las operaciones aritméticas básicas de la metodología con la siguiente expresión:

$$VCGP_{1,2,3} P_x = [i_x, j_x, k_x] * [\% i_x, j_x, k_x] * [\% CG1, CG2, CG3]$$

Donde:

$VCGP_x$  = Valor resultante del criterio general “1, 2 o 3”

$[i_x, j_x, k_x]$  = Valor asignado al subcriterio “i, j, k” para el sitio “px”

$[\% i_x, j_x, k_x]$  = Porcentaje asignado a los subcriterios “i, j, k”

$[\% CG1, CG2, CG3]$  = Porcentaje asignado al criterio general “1, 2 o 3”

$$VTP_x = \sum [ VCGP_{1,2,3} P_x ]$$

Donde:

$VTP_x$  = Valor total o resultante al sumar los criterios generales 1, 2 o 3.

Con base en el cálculo de los valores totales de cada sitio, estos resultados se comparan entre sí. Los sitios que deben seleccionarse son aquellos con mayor puntaje porque cumplen en gran medida con los criterios y ofrecen muchas ventajas. Los resultados de esta evaluación se presentan a continuación:

- ❖ Las **tablas 28, 29 y 30** muestran los resultados después de haber procesado la información de las matrices y aplicado la aritmética del método AHP.

**Tabla 28.** Evaluación general del criterio ambiental

Criterio general	No.	Criterio específico	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3
Criterio ambiental	i.1	Afectación de la capa vegetal existente.	0.045	0.023	0.045
	i.2	Áreas de importancia natural.	0.107	0.000	0.107
	i.3	Permeabilidad del suelo y afectación de agua subterránea.	0.035	0.035	0.052
	i.4	Afectación a la calidad de vida por contaminación de aire y ruido en las cercanías.	0.016	0.000	0.016
	i.5	Afectación de fauna presente en el sitio.	0.027	0.018	0.027
	i.6	Afectación de la calidad de agua superficial.	0.044	0.044	0.029
	TOTAL			0.274	0.119

**Tabla 29.** Evaluación general del criterio socioeconómico

Criterio general	No.	Criterio específico	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3
Criterio socioeconómico	j.1	Uso de suelo	0.291	0.291	0.194
	j.2	Cercanías o colindancias a zonas poblacionales	0.084	0.084	0.169
	j.3	Factibilidad de adquisición (propiedad)	0.551	0.275	0.275
	j.4	Costo del terreno	0.170	0.000	0.170
	j.5	Aceptación comunal	0.425	0.142	0.142
	j.6	Presencia de grupos u organizaciones en las cercanías del emplazamiento de la obra	0.108	0.000	0.108
	TOTAL			1.629	0.792

**Tabla 30.** Evaluación general del criterio técnico

Criterio general	No.	Criterio específico	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3
Criterio técnico	k.1	Área del predio.	0.193	0.064	0.193
	k.2	Cercanías a zonas de producción de RC&D.	0.082	0.122	0.041
	k.3	Distancia, tipo, ancho y longitud de vialidades de acceso.	0.082	0.122	0.082

Criterio general	No.	Criterio específico	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3
Criterio técnico	k.4	Topografía del terreno.	0.046	0.046	0.069
	k.5	Presencia de infraestructura hidráulica (canales, acueductos, tanques o cajas de almacenamiento, pozos de visita, plantas de tratamiento, etc.).	0.069	0.069	0.000
	k.6	Capacidad de carga del suelo.	0.038	0.038	0.025
		TOTAL	0.508	0.461	0.409

En la tabla 31, se muestra la evaluación general que representa la suma de los valores resultantes de cada criterio, es decir, los valores o puntuación finales de cada criterio para cada sitio evaluado.

**Tabla 31.** Evaluación general al sumar los criterios generales

Criterio general	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3
Ambiental	0.274	0.119	0.277
Socioeconómico	1.629	0.792	1.058
Técnico	0.508	0.461	0.409
Calificación final	2.411	1.373	1.744

### Tipología de predios

- Sitio más viable para ubicar un SDF
- Sitio de viabilidad media para ubicar un SDF
- Sitio no viable para ubicar un SDF

De esta manera, el sitio con mayor puntaje es el sitio 1, es decir, el sitio que se deberá seleccionar, pues es el que ofrece las mejores características y ventajas para emplazar un SDF de RC&D.

## 4.

## METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE ÁREAS Y SITIOS FACTIBLES

1

Una vez realizada la evaluación de los sitios, es decir, cuando ya se dispongan de uno a tres sitios idóneos (sitio ganador o ganadores), se desarrollarán los estudios específicos con las mayores características positivas para el emplazamiento de la infraestructura de depósito de residuos de la construcción y demolición (RC&D).

2

Lo anterior es esencial, ya que los estudios son indispensables para garantizar que la infraestructura de depósito de RC&D no presente afectación alguna sobre el medio ambiente cuando se encuentre en operación, principalmente sobre los recursos agua, flora y fauna. Entre los estudios que se requieren, se encuentran los geológicos e hidrogeológicos, que generarán información sobre la estructura del subsuelo; al mismo tiempo, otros estudios son indispensables para delimitar la ubicación de la infraestructura y determinar la forma del suelo, como son los topográficos.

3

### 4.1 Estudios ambientales

Debido a que existen diversas metodologías y propuestas para la evaluación ambiental de proyectos, de acuerdo con el listado incluido en el artículo 28 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), y siempre que no genere cambio de uso de suelo forestal, se decidió tomar como base el listado de aspectos ofrecido por

4

la *Guía de Autoevaluación Ambiental* de la PROFEPA, así como la *Guía para la Presentación del Informe Preventivo* y, como complemento, la *Guía para la Presentación de MIA*, ambas elaboradas por la SEMARNAT, ya que son instrumentos emitidos por entidades de carácter nacional y que son reconocidos por autoridades y particulares.

Asimismo, se puede contar con diversas propuestas para realizar estudios de impacto ambiental, algunas integran el componente socioeconómico y otras no. Para la evaluación de este tipo de proyectos, se considera pertinente abordar por separado los aspectos ambiental y socioeconómico.

#### 4.1.1 Recopilación de información

La información se puede recopilar de diversas fuentes. En el caso de la información ambiental, se puede obtener de entidades de nacionales, estatales o municipales como las siguientes:

- ❖ Secretaría de Gobernación: planes de ordenamiento territorial.
- ❖ Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT): planes de manejo de áreas naturales protegidas, licencias y permisos ambientales.
- ❖ Comisión Nacional del Agua (CONAGUA): cuerpos de agua y su calidad, concesiones y permisos.
- ❖ Otras fuentes: estudios de investigación por parte de universidades, institutos, industrias, organizaciones civiles, como inventarios de flora y fauna, etc.

La información requerida, en principio, debe tomarse de las fuentes mencionadas, pero es indispensable corroborarla con recorridos de campo y de ser necesario, estudios específicos adicionales.

1

2

3

4

### 4.1.2 Variables ambientales

A continuación, se presentan los factores ambientales que deben ser considerados para emplazar un sitio de disposición final de RC&D.

#### Aire

El aire juega un papel fundamental a la hora de emplazar un SDF de RC&D, ya que las corrientes de aire traen consigo emisiones de contaminantes y se asocian con frecuencia a la hora de su ubicación.

La lista de contaminantes puede ser muy extensa; sin embargo, la fuente también determina el tipo de contaminante: si provienen de la quema de combustibles fósiles (transporte o generación de energía) o de procesos industriales específicos. Estos contaminantes pueden ser primarios, si tienen la misma composición con la que se descargaron, o secundarios, cuando son producto de una reacción posterior en el ambiente.

Con relación al ruido, es importante considerar el receptor: el ruido puede provenir de actividades humanas, si son trabajadores en su jornada laboral, o ruido ambiental, si se refiere a los habitantes de una determinada zona.

Las emisiones de gases y partículas, así como la generación de ruido ambiental debido al uso de maquinaria, transporte y movilización de materiales parte del proyecto, se consideran iguales, independientemente del lugar de emplazamiento; sin embargo, el impacto generado dependerá de la proximidad de las áreas pobladas y la presencia de otras fuentes de contaminación en el sitio. Con esta condición, el escenario más favorable para emplazar este tipo de proyectos corresponde a una

zona con otros usos de facto, de tipo industrial o de dotación urbana que generan impactos similares relacionados con emisiones y ruido, de preferencia en zonas despobladas.

La información puede obtenerse a través de mapas de calidad de aire, mapas de ruido o por medición directa *in situ* de ser necesario.

## Agua

Para ubicar un SDF de RC&D, un aspecto de suma importancia que debe considerarse es el agua por los impactos negativos que esta infraestructura pudiera ocasionar. Se recomienda abstenerse de emplear terrenos que corresponden a zonas de recarga de acuíferos, así como evitar zonas con riesgo de inundación.

Los cuerpos de agua pueden ser afectados al ubicar un SDF de RC&D. Esta afectación puede ser por captación de aguas para consumo, el vertimiento de aguas residuales o la presencia de contaminantes por vía aérea que lleguen al agua.

Los vertimientos consistirán principalmente en aguas servidas y materiales de escorrentía o lixiviación, que se espera que sean entregadas a la red de alcantarillado con el tratamiento necesario. Así, lo más favorable será que no haya cuerpos de agua superficiales o subterráneos que se puedan ver afectados por la actividad; además, que se cuente con acceso a la red de alcantarillado y de suministro de agua para consumo básico de las áreas administrativas.

1

2

3

4

## Suelo

La alteración de este aspecto ambiental a la hora de emplazar un SDF de RC&D puede darse por cambios en su estructura o por contaminación con sustancias nocivas. Las principales fuentes de contaminación corresponden a actividades humanas como el uso de agroquímicos, derrames de sustancias por actividades industriales, por intermedio del aire o agua que terminan depositando materiales en el suelo e incluso su remoción o el cambio en su estructura y composición.

Por esta razón, es importante considerar el uso actual del suelo al emplazar un SDF de RC&D, tanto el establecido en los planes de ordenamiento regionales o locales, así como el que se da de facto; también si el sitio está inmerso en un área natural protegida o cualquier otra declaratoria de suelo de conservación y sus alcances en cuanto a actividades permitidas o infraestructura proyectada a futuro. Otra condición importante para tener en cuenta es la presencia de pasivos ambientales, como impactos ambientales de la minería, sitios contaminados o cualquier otra condición que ocasione que el proyecto asuma riesgos ambientales adicionales.

La mejor condición para emplazar el sitio de disposición será que el uso de suelo sea de tipo industrial de acuerdo con el plan de ordenamiento territorial del municipio, sin pasivos ambientales.

## Residuos

Antes este aspecto se incluía en la evaluación del suelo, debido a que los residuos se disponían básicamente en el suelo. En la actualidad, se da prioridad a la gestión de los residuos, desde la prevención hasta su

reincorporación a los procesos y tomando como última opción su disposición final en el suelo.

El control y minimización de los riesgos generados por los residuos, particularmente de los RC&D, son la razón de ser del proyecto; por lo tanto, el plan de manejo debe estar en sintonía con el plan municipal de residuos y el predio debe permitir el acceso de los sistemas de recolección de aquellos que no son recibidos, tanto peligrosos como no peligrosos. Por esta razón, es suficiente con evaluar si el predio se encuentra conectado por vías de acceso que permiten el ingreso de los sistemas de recolección municipal.

El no contar con sitios de disposición de RC&D autorizados origina que los planes de manejo para estos residuos no se cumplan y, en consecuencia, dichos residuos se encuentren presentes en sitios a cielo abierto, como camellones, barrancas, cerca de ríos, etc., lo cual ocasiona afectaciones al medio ambiente.

## Energía

La generación y consumo de energía tiene implicaciones ambientales que están relacionadas principalmente con la fuente de energía: la más común proviene de combustibles fósiles quemados con tecnología convencional y, por tanto, resulta ser de las más contaminantes.

Para el uso de energía eléctrica en los servicios de alumbrado y de oficina, se espera contar con acceso a la red pública. De no contarse con el acceso a la red, es necesario evaluar fuentes alternas que permitan el suministro y que, de preferencia, sean limpias. Si el consumo excediera los 0.5 MW, se debe considerar la exigencia de permisos por parte de la

1

2

3

4

Comisión Reguladora de Energía (CRE), en atención a la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica y su Reglamento.

Por otra parte, contar con redes de energía existentes al ubicar un sitio de disposición de RC&D implicaría un ahorro económico, es decir, no se invertiría en alguna otra fuente alterna de energía para proveer de energía a la infraestructura. Por ello, es conveniente que los sitios de disposición de RC&D que se ubicarán se encuentren los más cerca posible de las redes de energía.

### Recursos forestales y vida silvestre

Al emplazar un SDF de RC&D, se deben considerar los recursos forestales y vida silvestre. Lo estratégico en un ecosistema, según Herrera (2014), se puede dar por varios motivos: la urgencia y razones para su preservación dada la escasez de recursos naturales, su representatividad o sus atributos ecológicos destacados, como panorámicas, entornos de lúdica acuática, senderos, bosques periurbanos y las formas de intervención a razón de los bienes y servicios ambientales (emergencia por valores de existencia de la naturaleza).

La condición más favorable para este tipo de proyectos será un sitio en el cual no exista la capa vegetal virgen porque se ha removido para otros usos, anteriores al emplazamiento, que no se encuentren especies o ecosistemas endémicos de la región y que sea una zona natural altamente modificada que no ofrezca servicios ambientales de gran valor.

En caso de que las únicas áreas disponibles correspondan a zonas vírgenes o poco intervenidas, es conveniente contar con un inventario de flora y fauna para identificar especies protegidas, de dominio vital y las

1

2

3

4

relaciones entorno-especies para caracterizar el riesgo de alterar el ecosistema con el emplazamiento.

## Riesgo, emergencias y gestión ambiental

El control y gestión del riesgo industrial y ambiental endógeno son aspectos inherentes al diseño, ejecución y desarrollo del proyecto. Sin embargo, para esta etapa, es importante considerar si el lugar de emplazamiento se encuentra en zonas de riesgo natural, como inundaciones, sismos o deslizamientos, lo que se puede determinar con ayuda de los mapas de riesgo existentes para algunas zonas del país. De no existir dicha información, es necesario evaluarla a partir de información histórica. También es importante considerar si el sitio permite la atención y contención de las posibles emergencias que se presenten, por eso será conveniente que el predio cuente con acceso adecuado para los cuerpos de emergencia y que se encuentre a una distancia de los centros de atención para una respuesta oportuna.

En la tabla 32, se incluye el total de variables analizadas y algunos de los indicadores que se deben tener en consideración.

**Tabla 32.** Variables ambientales

ASPECTO AMBIENTAL	VARIABLE	INDICADORES
Aire	Contaminantes atmosféricos	Generación de contaminantes atmosféricos (partículas, gases, vapores y humos) por fuentes fijas o móviles.
	Ruido	Generación de ruido por maquinaria y remoción de materiales.

1

2

3

4

Agua	Cuerpos de agua	Presencia de cuerpos de agua superficiales y subterráneos potencialmente afectados.
	Aguas de uso	Disponibilidad de red pública, requerimiento de uso y necesidad de permisos.
	Aguas servidas	Disponibilidad de la red pública, requerimiento de descarga y necesidad de permisos.
Suelo	Conservación	Uso actual de suelo, legal y de facto. ANP.
	Condiciones especiales	Presencia de pasivos ambientales.
Residuos	No peligrosos	Plan de manejo, inclusión en el plan municipal.
	Peligrosos	Plan de manejo.
Energía	Fuente de energía	Disponibilidad de la red pública.
	Generación	Generación de energía por fuentes alternativas.
Recursos forestales y vida silvestre	Vegetación	Inventario/Especies protegidas, áreas sensibles.
	Fauna	Inventario/Especies protegidas, dominio vital.
	Ecosistemas estratégicos	Relaciones entorno-especies.
Riesgo, emergencias y gestión ambiental	Riesgos ambientales	Riesgos naturales: sismo, deslizamientos e inundaciones. Riesgos antrópicos: industriales, delincuenciales.
	Atención de emergencias	Capacidad de atención y respuesta interna y externa, presencia de cuerpos de socorro.
	Gestión ambiental	Manejo interno del riesgo.

Fuente: elaboración propia

## 4.2 Estudios hidrológicos

La hidrología es la ciencia que estudia el agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre. El objetivo primario de la hidrología es el estudio de las interrelaciones entre el agua y su ambiente. Ya que la hidrología estudia principalmente el agua localizada cerca de la superficie del suelo, se interesa particularmente en aquellos componentes del ciclo hidrológico que se presentan ahí, esto es, precipitación, evapotranspiración, escurrimiento y agua en el suelo.

Por lo anterior, ante la necesidad de conocer las aportaciones de lluvia, así como los escurrimientos pluviales que se generarán en los sitios por estudiar, la aplicación de la hidrología es fundamental para el emplazamiento de sitios para disposición final para residuos de la construcción y demolición (RC&D), puesto que su análisis se orienta hacia la obtención de los parámetros hidrológicos de diseño.

La cuenca hidrológica constituye la unidad de gestión del recurso hidráulico y, por definición, es una zona de la superficie terrestre en donde las gotas de lluvia que caen sobre ella son drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida.

Los objetivos particulares del estudio hidrológico son los siguientes:

- ❖ Calcular los parámetros hidrológicos que regirán la planeación y diseño del sitio de RC&D.
- ❖ Identificar la infraestructura hidráulica existente en el sitio en estudio para depósito de RC&D.
- ❖ Definir el riesgo de inundación en el RC&D.
- ❖ Elaboración a nivel de esquema de las alternativas para conducir los escurrimientos pluviales fuera del sitio de emplazamiento seleccionado para la construcción del RC&D.

### 4.2.1 Recopilación de información

Para la ejecución de los estudios hidrológicos, será necesario investigar, solicitar y recopilar la información documental disponible para la región en que se ubique la cuenca en estudio. A continuación, se mencionan brevemente las siguientes fuentes de información que pueden ser consultadas.

**Información fisiográfica.** Es un elemento indispensable en el proceso para la determinación de los escurrimientos pluviales, definiendo con apoyo en esta información el área de la cuenca, el perfil del cauce principal y el coeficiente y número de escurrimiento.

- ❖ Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI):  
Cartas topográficas Esc. I: 50 000.  
Cartas hidrológicas Esc. I: 50 000.  
Cartas de uso del suelo y vegetación Esc. I: 50 000.  
Cartas edafológicas Esc. I: 50 000.  
Compendio de información geográfica municipal.  
Condensado estatal.  
Simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas (SIATL).
- ❖ Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT): plano de carreteras estatal.
- ❖ Secretaría de Gobernación (SEGOB): Enciclopedia de los municipios de México.
- ❖ Portal de Internet Google Earth: imágenes de satélite para la zona de estudio.

**Información hidrológica.** El estudio hidrológico se estructura a través de un análisis regional de lluvias que involucra conocer la frecuencia de estas, su distribución y su relación con el escurrimiento. Para ello, es primordial la obtención de la siguiente información.

❖ Comisión Nacional del Agua (CONAGUA):

Plano General de la Región Hidrológica con la ubicación de las estaciones Hidrométricas y Climatológicas de la zona de estudio, incluyendo las operadas por otras dependencias.

Registros de las estaciones meteorológicas automáticas (EMA) del área en estudio. Registros de temperaturas, precipitación, evaporación y fenómenos diversos de las estaciones pluviográficas y pluviométricas de la cuenca en estudio. Normales climatológicas de las estaciones de la cuenca en estudio.

Registros de escurrimientos de las estaciones hidrométricas existentes en los cauces de las cuencas en estudio (BANDAS).

Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de los aprovechamientos de la región en estudio.

En este rubro se buscará la información cartográfica, topográfica, hidrológica y de estudios específicos para la zona en estudio o en su proximidad que pudieran resultar de utilidad para los propósitos del estudio.

#### 4.2.2 Reconocimiento de campo

Atendiendo a las variables que constituyen al criterio técnico en su aspecto hidrológico, se deberá realizar un reconocimiento de campo con el propósito de corroborar la información cartográfica e hidrológica disponible para la determinación de las características fisiográficas de las cuencas y subcuencas existentes en el sitio en estudio, información obtenida de acuerdo con lo indicado en el inciso a) del tema 4.2.1 Recopilación de la información.

1

2

3

4

## Cuencas de captación alrededor del sitio

Se refiere a la tipificación de las condiciones topográficas generales del sitio y de los terrenos externos que pudieran tener aportes al predio o de este a los vecinos, con objeto de determinar las cuencas y subcuencas que aportan escurrimientos pluviales a cada sitio, ya que los volúmenes de escurrimiento podrían condicionar la viabilidad de un sitio en particular. Dentro de este apartado, se deberán verificar los cambios o modificaciones en la cartografía e imágenes aéreas disponibles, debido a la construcción de nuevas obras o a la explotación de recursos naturales.

## Drenaje pluvial existente

Se deberá identificar la existencia de escurrimientos naturales o artificiales, e investigar que no se hayan realizado obras que modifiquen el comportamiento de los escurrimientos como presas, bordos, desvíos y encauzamientos que modifiquen las características hidrológicas documentadas de las cuencas. Las particularidades del drenaje pluvial existente inciden directamente en la planeación y diseño del emplazamiento de un RC&D al delimitar las áreas libres de escurrimientos.

## Encharcamientos e inundaciones

Un terreno sujeto a encharcamientos e inundaciones es inadecuado para el emplazamiento de un sitio de disposición de RC&D; por lo tanto, se deberá efectuar una búsqueda de problemas manifiestos de inundaciones o encharcamientos. En su caso, investigación de rastros de niveles máximos alcanzados por el agua en el cauce en las crecientes máximas históricas, mediante la consulta a los habitantes del lugar.

## Características fisiográficas

Las características fisiográficas del suelo en que se pretenda emplazar un sitio para disponer RC&D inciden directamente en la magnitud de la lluvia en exceso, la cual se define como la parte de la lluvia que contribuye al escurrimiento pluvial. Por tal motivo, se realizará la indagación de las características fisiográficas ordinarias del sitio, condiciones de uso del suelo y coberturas vegetales.

Asimismo, se deberán revisar las características edafológicas actuales del sitio, tipo y uso del suelo, así como tipo y densidad de la vegetación actual comparada con la reportada en la información documental. Es importante destacar los cambios en los suelos y materiales superficiales del terreno, y también las alteraciones de la vegetación en la cuenca, con objeto de determinar con la mayor aproximación posible los coeficientes de escurrimiento de la cuenca y de la rugosidad del cauce.

## Presencia de infraestructura hidráulica

La presencia de infraestructura hidráulica puede impedir el emplazamiento de un sitio para RC&D por las afectaciones que las propias obras y la operación del sitio propicien en esta. Por tal motivo, se deberá efectuar una investigación de infraestructura hidráulica dentro del sitio y sus cercanías: canales, acueductos, tanques o cajas de almacenamiento, pozos de visita, plantas de tratamiento. En este caso, se deberán reportar el tipo, geometría, dimensiones y ubicación de las obras detectadas, realizando levantamientos preliminares en forma de croquis de estas o fotografías que destaquen sus características.

## Obras de explotación de aguas subterráneas

Para prevenir el riesgo de contaminación de los mantos acuíferos, no deberá emplazarse un sitio para el depósito de RC&D si en un radio menor de 500 m existen obras de aprovechamiento de las aguas subterráneas. Por tal motivo, se realizará la identificación de la existencia de obras de explotación de aguas subterráneas: pozos profundos, norias, manantiales, etc. Esta información deberá corroborarse con los registros del REPDA disponibles, y en caso de ubicarse dentro del predio y en la zona de las obras por desarrollar, deberán investigarse sus principales parámetros operativos, siendo entre otros:

- ❖ Nombre del usuario
- ❖ Características y diámetros de perforación
- ❖ Datos de equipos que se encuentran instalados
- ❖ Registros de los niveles estático y dinámico
- ❖ Caudales de extracción
- ❖ Profundidad de los pozos
- ❖ Características constructivas y de operación

Para los aprovechamientos identificados, se determinará su ubicación preliminar con base en un equipo de posicionamiento GPS portátil, aceptando en esta etapa del estudio la aproximación que dicho equipo proporciona. En los aprovechamientos en que sea factible, se determinará la profundidad del nivel del agua.

## Presencia de infraestructura urbana

Para prevenir la afectación a la infraestructura urbana existente dentro o en las cercanías al sitio en estudio para el emplazamiento de un sitio

de disposición de RC&D, se hará un reconocimiento de la Infraestructura urbana existente con objeto de ubicar el posible sitio alejado de dicha infraestructura, considerando las vialidades y sus condiciones físicas, ductos de electricidad, telefonía y fibra óptica, líneas de telégrafos, tuberías de Petróleos Mexicanos (Pemex) o de gas natural, etc.

Como apoyo a estos reconocimientos de campo, se tomarán fotografías digitales en varios puntos que se consideraron relevantes para los objetivos del estudio, marcando en una figura o en un plano detallado la ubicación del punto de toma de cada fotografía con su ángulo de observación, con la finalidad de plasmar una perspectiva más amplia de las características topográficas del terreno, del tipo de suelos, cobertura vegetal, infraestructura existente y sus características, etc. Con estas fotografías, se elaborará un álbum fotográfico que se presentará en un anexo al documento final.

#### 4.2.3 Localización y descripción del sistema hidrológico

En este tema, se describirán las condiciones generales y particulares del sistema hidrológico, hidrográfico y geohidrológico para la región en estudio, considerando su localización geográfica de acuerdo con la regionalización de la CONAGUA; además, se explicarán las principales características de los parámetros climatológicos básicos como temperaturas, precipitación pluvial, cantidad intensidad frecuencia y duración de la precipitación, evaporación, infiltración, escurrimiento superficial, etc., y, en particular, de la infraestructura hidráulica identificada en la cuenca en estudio. Lo anterior permitirá determinar los parámetros hidrológicos de diseño de las obras de drenaje pluvial para el RC&D.

#### 4.2.4 Características fisiográficas de cuencas de aportación

Con apoyo de la cartografía y la topografía disponible, así como de los recorridos de campo realizados, se determinarán las cuencas de drenaje del predio en estudio y de cada uno de los cauces o escurrimientos naturales que pudieran influir en ellos y de las áreas externas que pudieran aportar escurrimientos pluviales al sitio en estudio. Con ello se obtienen las características fisiográficas de cada cuenca o subcuenca determinada, información requerida para evaluar los escurrimientos pluviales. Regulando y controlando los escurrimientos pluviales, se evitarán avenidas e inundaciones aguas abajo que afecten a las obras del RC&D.

##### Área de cuenca

El área de la cuenca es el parámetro más importante para la determinación de sus características hidrológicas, pues existe una relación directa entre la magnitud del área y la magnitud de los volúmenes generados (gastos) por la precipitación en ella. Está definida como el área que contribuye al escurrimiento y que proporciona parte o todo el flujo del cauce principal y sus tributarios mediante la proyección horizontal de toda el área de drenaje de un sistema de escurrimiento dirigido directa o indirectamente a un mismo punto de control. La cuenca de drenaje de una corriente está limitada por su parteaguas, el cual a su vez está formado por los puntos de mayor nivel topográfico y cruza las corrientes en los puntos de salida.

Con apoyo de algún software especializado como AutoCAD, sobre los planos cartográficos disponibles se dibuja una polilínea que una los puntos topográficos de mayor elevación, desde la porción inicial de cada línea de escurrimiento hacia uno y otro lado del eje de flujo y hasta

el punto de salida de cada cuenca. Dado que el área drenada de una cuenca es el área en proyección horizontal encerrada por el parteaguas, aprovechando las herramientas del software, se obtiene el área de este polígono que define el área de la cuenca de drenaje (A).

## Pendiente media y longitud del cauce principal

El cauce principal de la cuenca hidrográfica es aquel que pasa por el punto de salida de esta y que recibe el aporte de otros cauces de menor envergadura, denominados tributarios. El perfil de un cauce se puede representar llevando en una gráfica los valores de sus distancias horizontales, medidas sobre el cauce, contra sus cambios de elevaciones respectivas. Sobre la cartografía disponible, aprovechando las herramientas de algún software como AutoCAD, se determina la traza en planta del cauce y se obtiene, para cada tramo entre curvas de nivel, la distancia correspondiente; por último, se dibuja el perfil de cada eje de escurrimiento asociado a la cuenca de aportación identificada.

La pendiente y longitud del cauce principal son parámetros útiles en la definición de algunos coeficientes relacionados con la forma de la cuenca, los cuales permiten inferir cuál será su respuesta ante determinadas condiciones de precipitación que inciden en el diseño del RC&D.

La longitud del cauce principal (L), expresada en metros, es la distancia desde su origen en el parteaguas hasta la salida de la cuenca, medida perpendicularmente a las curvas de nivel.

Para determinar la pendiente del cauce, se utiliza el criterio de Taylor y Schwarz (Viessman,1989), ya que de los diversos métodos existentes es el más recomendable porque trata de ajustarse a la pendiente real. El

método se basa en considerar que el río está formado por una serie de canales con pendiente uniforme, cuyo tiempo de recorrido es igual al del río. La ecuación 1 que representa esta teoría es la siguiente:

$$S = \left[ \frac{L}{\sum_{j=1}^k \frac{l_j}{\sqrt{s_j}}} \right]^2 \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde:

- $S$  pendiente media del cauce
- $L$  longitud total del tramo del río, en  $m$
- $l_1, l_2, l_j$  longitud de cada segmento del río, en  $m$
- $s_1, s_2, s_j$  pendiente media de cada segmento del río, determinada como:

$$s_j = \frac{H}{l_j}$$

Siendo:

- $s_j$  pendiente media de cada segmento del río, en  $m$
- $H$  desnivel entre los extremos del segmento del río, en  $m$
- $l_j$  longitud de cada segmento del río, en  $m$
- $k$  número de segmentos del río

### Coefficiente y número de escurrimiento

El coeficiente de escurrimiento es otro de los parámetros básicos de la hidrología superficial porque representa la porción de la precipitación

que se convierte en gasto, es decir, la relación entre el volumen de escurrimiento superficial y el de precipitación total sobre un área (cuenca) determinada.

El coeficiente de escurrimiento no es un factor constante, pues varía de acuerdo con la magnitud de la lluvia y, particularmente, con las condiciones fisiográficas de la cuenca hidrográfica (cobertura vegetal, pendientes, tipo de suelo presentes en el sitio de depósito de RC&D), por lo que su determinación es aproximada.

Para tomar en cuenta el efecto de los factores que influyen en el escurrimiento directo, este se determina a partir del coeficiente de escurrimiento ( $C$ ) (método racional) o del número de escurrimiento ( $N$ ) (cuencas naturales), los cuales son un coeficiente de peso del escurrimiento directo y es función del uso del suelo y de las características de este.

Con apoyo de las cartas topográfica, edafológicas, de uso de suelo y vegetación, así como de las imágenes de satélite disponibles, y con base en los reconocimientos de campo realizados, se determina el coeficiente de escurrimiento ( $C$ ) y el número de escurrimiento ( $N$ ) de la cuenca de la siguiente manera:

- ❖ Sobre las cartas topográficas disponibles se dibujan las zonas que representen las distintas condiciones de la superficie de la cuenca, atendiendo a la topografía, geología, tipo y uso del suelo y el tipo y densidad de la vegetación existente.
- ❖ Se determinan las áreas ( $A_i$ ) de las zonas identificadas, el coeficiente de escurrimiento ( $C_i$ ) se obtendrá para cada área parcial de acuerdo con las condiciones de la superficie utilizando la **tabla 32** y se calculará el promedio ponderado para obtener el coeficiente

1

2

3

4

de escurrimiento ( $C$ ) de la cuenca. De manera análoga, se procede para determinar el número de escurrimiento de la cuenca ( $N$ ), utilizando en este caso las **tablas 33 y 34** y aplicando alguna de las siguientes ecuaciones respectivamente (Chow, 1962).

$$C = \frac{\sum_{i=1}^k C_i * A_i}{A} \quad \text{Ecuación (2)}$$

$$N = \frac{\sum_{i=1}^k N_i * A_i}{A} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde:

- $C$  Coeficiente de escurrimiento de la cuenca en estudio, adimensional
- $N$  Número de escurrimiento de la cuenca en estudio, adimensional
- $C_i$  Coeficiente de escurrimiento de la zona  $i$ , adimensional
- $N_i$  Número de escurrimiento de la zona  $i$ , adimensional
- $A$  Área total de la cuenca, en  $\text{km}^2$
- $A_i$  Área de la zona  $i$ , en  $\text{km}^2$
- $k$  Número de zonas identificadas.

**Tabla 33.** Coeficiente de escurrimiento ( $C$ ) para el método racional

Tipo de superficie para drenar	Pendiente %	Coeficiente de escurrimiento ( $C$ )	
		Mínimo	Máximo
A) Praderas:			
1. Suelo arenoso plano	< 2	0.05	0.10
2. Suelo arenoso medio	2 a 7	0.10	0.15
3. Suelo arenoso empinado	> 7	0.15	0.20

4. Suelo arcilloso plano	< 2	0.13	0.17
5. Suelo arcilloso medio	2 a 7	0.18	0.22
6. Suelo arcilloso empinado	> 7	0.25	0.35
B) Zonas pavimentadas:			
1. Pavimento asfáltico	---	0.70	0.95
2. Pavimento de concreto hidráulico	---	0.80	0.95
3. Pavimento adoquinado	---	0.70	0.85
4. Estacionamientos	---	0.75	0.85
5. Patios de ferrocarril	---	0.20	0.40
C) Zonas residenciales:			
1. Unifamiliares	---	0.30	0.50
2. Multifamiliares, espaciados	---	0.40	0.60
3. Multifamiliares, juntos	---	0.60	0.75
4. Suburbanas	---	0.25	0.40
5. Casas habitación	---	0.50	0.70
D) Zonas comerciales:			
1. Zona comercial (áreas céntricas)	---	0.70	0.95
2. Áreas vecinas	---	0.50	0.70
E) Zonas industriales:			
1. Construcciones espaciadas	---	0.50	0.80
2. Construcciones juntas	---	0.60	0.90
F) Campos cultivados	---	0.20	0.40
G) Zonas forestadas	---	0.10	0.30
H) Parques y cementerios	---	0.10	0.25
I) Áreas de recreo y campos de juego	---	0.20	0.35
J) Azoteas y techados	---	0.75	0.95

Fuente: *Manual de diseño de obras fluviales para la protección contra inundaciones*. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1981

**Tabla 34.** Clasificación hidrológica por tipos de suelo

Tipo de suelo	Clasificación hidrológica
A	<i>Suelos con potencial de escurrimiento mínimo.</i> Incluye gravas y arenas de tamaño medio, limpias y mezcla de ambas.
B	<i>Suelos con infiltración media inferior a la del tipo A.</i> Incluye arenas finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezclas de arena y limo.
C	<i>Suelos con infiltración media inferior a la del tipo B.</i> Comprende arenas muy finas, arcillas de baja plasticidad, mezclas de arena, limo y arcilla.
D	<i>Suelos con potencial de escurrimiento máximo.</i> Incluye principalmente arcillas de alta plasticidad, suelos poco profundos con subhorizontes casi impermeables cerca de la superficie.

Fuente: *Manual de diseño de obras fluviales para la protección contra inundaciones.* SARH, 1981

**Tabla 35.** Selección del número de escurrimiento *N*

Uso de la tierra o cobertura	Condición de la superficie	Tipo de suelo			
		A	B	C	D
Bosques sembrados y cultivados	Ralo, baja transpiración	45	66	77	83
	Normal, transpiración media	36	60	73	79
	Espeso o alta transpiración	25	55	70	77
Camino	De tierra	72	82	87	89
	De superficie dura	74	84	90	92

Bosques naturales	Muy ralo o baja transpiración	56	75	86	91
	Ralo, baja transpiración	46	68	78	84
	Normal, transpiración media	36	60	70	76
	Espeso o alta transpiración	26	52	62	69
	Muy espeso o alta transpiración	15	44	54	61
Descanso (sin cultivo)	Surcos rectos	77	86	91	94
Cultivos de surco	Surcos rectos	70	80	87	90
	Surcos en curvas de nivel	67	77	83	87
	Terrazas	64	73	79	82
Cereales	Surcos rectos	64	76	84	88
	Surcos en curvas de nivel	62	74	82	85
	Terrazas	60	71	79	82
Leguminosas (sembradas con maquinaria al voleo) o potrero en rotación	Surcos rectos	62	75	83	87
	Surcos en curvas de nivel	60	72	81	84
	Terrazas	57	70	78	82
Pastizal	Pobre	68	79	86	89
	Normal	49	69	79	84
	Bueno	39	61	74	80
	Curvas de nivel, pobre	47	67	81	88
	Curvas de nivel, normal	25	59	75	83
	Curvas de nivel, bueno	6	35	70	79
Potrero (Permanente)	Normal	30	58	71	78
Superficie impermeable		100	100	100	100

Fuente: Manual de diseño de obras fluviales para la protección contra inundaciones. SARH, 1981

#### 4.2.5 Modelo de tormenta

El modelo de tormenta se define como un patrón de precipitación para la utilización en el diseño de un sistema hidrológico, lo que conforma la entrada al sistema y a través de este las avenidas se calculan utilizando procedimientos de lluvia-escurrimiento.

Las tormentas de diseño se basan en información histórica de precipitación en un sitio o pueden construirse utilizando las características generales de la precipitación en regiones adyacentes meteorológicamente homogéneas. Una adecuada generación del modelo de tormenta permitirá definir con mayor certeza los efectos de lluvia y escurrimiento posibles de presentarse en el sitio de depósito de RC&D y con ello proyectar las obras de drenaje pluvial

En cuencas pequeñas sin información hidrométrica, el estudio hidrológico se estructura a través de un análisis regional de lluvias que involucra conocer la frecuencia de estas, su distribución y su relación con el escurrimiento. La única manera de acotar el evento de diseño de una estructura hidráulica, cuando el análisis se apoya en los registros de lluvias, es a través del conocimiento de la variación de las características de las tormentas en relación con su período de retorno.

Dado que los pluviógrafos registran en forma continua la variación de la altura de lluvia respecto al tiempo, son sus registros los que permiten realizar un análisis más completo del comportamiento del fenómeno, deduciéndolo por medio de las curvas de intensidad duración-período de retorno (i-d-T). Para esto, se requiere conocer la curva masa de cada tormenta máxima anual.

La república mexicana cuenta con una amplia red de estaciones climatológicas controladas principalmente por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y en parte por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA) y algunas instituciones de educación superior en diversos estados del país, en donde se dispone de información pluviográfica, así como de registros de un nuevo tipo de estaciones meteorológicas automáticas (EMA) o de estaciones sinópticas meteorológicas (ESIME).

Dado que los pluviógrafos registran de manera continua la variación de la altura de lluvia respecto al tiempo, son sus registros los que permiten realizar un análisis más completo del comportamiento del fenómeno, deduciéndolo por medio de las curvas de intensidad duración-período de retorno.

El análisis de los registros de lluvia se realiza valuando la máxima variación de la altura de lluvia respecto a un intervalo de duración contante. Para ello, se requiere conocer la curva masa de cada tormenta que se esté estudiando para determinar el máximo incremento de lluvia tenido para un cierto intervalo de tiempo.

De esta manera, se obtienen las condiciones más críticas de altura de lluvia-duración para cada tormenta. En este caso, se dispone de grupos de alturas de lluvia para duraciones constantes. Conocidas las características de las lluvias más desfavorables, como para cada duración de lluvia ( $d$ ) se dispone de un grupo de intensidades ( $i$ ), estas deberán de ordenarse de forma decreciente para asignarles su período de retorno ( $T$ ) Yevjevich (1972), el cual se obtiene con la siguiente ecuación:

$$T = \frac{n}{m}$$

Ecuación (4)

En donde:

- $m$  número de orden; 1 a la intensidad de lluvia más grande, 2 a la siguiente, etc.  
 $n$  número de años de registro  
 $T$  período de retorno asignado a ( $i$ ), en años

Para valorar las curvas de intensidad-duración-período de retorno, se requiere obtener la ecuación (5) de mejor ajuste entre los diversos grupos de valores de las intensidades de lluvia, su duración y sus períodos de retorno. Para plantear el tipo de ecuación más conveniente, cabe aclarar que el más usual Chow (1961) corresponde a la forma:

$$i = \frac{KT^h}{d^g} \quad \text{Ecuación (5)}$$

Siendo:

- $d$  duración de la lluvia, en minutos  
 $i$  intensidad de lluvia, en mm/h  
 $T$  período de retorno asignado a ( $i$ ), en años  
 $K, h$  y  $g$  parámetros de la ecuación de ajuste

Si se toman logaritmos a esta ecuación, se obtiene:

$$\log i = \log K + h \log T - g \log d$$

Y transformando esta ecuación, puede escribirse:

$$y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2$$

donde:

$$\begin{array}{lll} \log i = y; & \log T = X_1; & \log d = X_2 \\ a_0 = \log K; & a_1 = h; & a_2 = -g \end{array}$$

En la ecuación anterior, se requieren valuar los parámetros  $a_0$ ,  $a_1$  y  $a_2$ , de tal manera que la suma de los errores al cuadrado sea mínima. Para ello, se deberá resolver el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} N & \sum X_{1i} & \sum X_{2i} \\ \sum X_{1i} & \sum X_{1i}^2 & \sum X_{1i} X_{2i} \\ \sum X_{2i} & \sum X_{1i} X_{2i} & \sum X_{2i}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_i \\ Y_{1i} Y_i \\ X_{2i} Y_i \end{bmatrix}$$

Donde  $N$  es el número de grupos de valores  $(X_1, X_2, X_3, Y)$  y las sumas son desde  $i = 1$  hasta  $N$ .

Para definir el modelo de tormenta, se acepta que la ecuación deducida, según se expresó con la información recabada en los pluviógrafos, es representativa de la distribución en el tiempo de las tormentas de la región y que la distribución en el área está dada por el proceso de la información de los pluviómetros, aparatos a los cuales se les hace una lectura cada 24 horas, siendo de gran utilidad como apoyo para el análisis de la distribución de las tormentas en el área, dada su gran densidad en relación con los pluviógrafos.

En caso de que la cuenca en estudio se localice fuera de la zona de influencia de la estación pluviográfica que sirvió de apoyo para la obtención de las curvas de intensidad duración-período de retorno, se deberá ajustar el modelo de tormenta obtenido a la cuenca en estudio.

El factor de ajuste que se utiliza es:

$$F_a = \frac{hp_c}{hp_p}$$

En donde:

- $F_a$  factor de ajuste del modelo de tormenta
- $hp_c$  altura de lluvia media en la cuenca para una duración de 24 horas y un período de retorno igual al de diseño
- $hp_p$  altura de lluvia media en la estación pluviográfica para una duración de 24 horas y un período de retorno igual al de diseño

En este caso, la determinación de la variación de las alturas de lluvias máximas anuales en 24 horas en relación con su período de retorno se resuelve mediante un análisis similar al del subinciso anterior. Una vez recabada la información de la estación climatológica en estudio, los valores de altura de precipitación máxima anual con duración de 24 horas se ordenan de mayor a menor y se deducen sus períodos de retorno correspondientes de acuerdo con lo expresado anteriormente.

De esta manera, se plantea una ecuación del siguiente tipo (Springall, 1975):

$$h_p = a + b \log T \quad \text{Ecuación (6)}$$

Siendo:

- $a, b$  parámetros de ajuste
- $h_p$  altura de lluvia máxima anual en 24 horas en mm
- $T$  Período de retorno en años

Obsérvese que si  $h_p = X$  y  $\log T = Y$ , los parámetros  $a$  y  $b$  se deducen mediante un análisis de correlación múltiple semejante al descrito antes.

De esta manera, es posible conocer en cada estación con pluviómetro su altura de lluvia para un período de retorno cualquiera y, por ende, su distribución en el área en estudio.

#### 4.2.6 Determinación de avenidas de diseño o revisión

La avenida máxima de diseño o revisión es la elevación del nivel de un cauce o cuerpo de agua significativamente mayor que el flujo medio de este. En condiciones extremas puede ocurrir al paso de la avenida, que el nivel de un cauce de agua aumenta en tales proporciones que la sección del río puede resultar insuficiente para contenerlo. En este caso, el agua se desborda e invade la llanura marginal.

Considerando los factores enunciados, para el proyecto de las obras de protección o drenaje pluvial del emplazamiento de un sitio para depósito de RC&D, es imprescindible determinar la avenida máxima de diseño de dichas obras.

Para seleccionar el criterio de análisis a fin de obtener la avenida máxima de diseño o revisión de una obra pluvial, se requiere conocer la información disponible en la región de la cuenca en estudio y de las características de dicha cuenca.

Dado que el tipo de obra a desarrollar se refiere a un sitio de disposición final para residuos de la construcción y demolición, una de las premisas para la selección del sitio de emplazamiento, es que este se localice alejado de un escurrimiento pluvial; por lo anterior, no es factible que se disponga de información hidrométrica.

1

2

3

4

Para deducir el gasto máximo de diseño para una estructura en que no se dispone de información hidrométrica, el análisis se realiza a través de un estudio regional de las lluvias que involucra conocer la frecuencia de estas y su distribución, según se expresó anteriormente en el tema 4.2.5, y su relación con el escurrimiento, de acuerdo con los siguientes parámetros que se describen a continuación.

### Período de retorno

Es uno de los parámetros más significativos a ser tomado en cuenta en el momento de dimensionar una obra hidráulica destinada a la protección de avenidas, por ejemplo: el vertedor de una presa, los bordos perimetrales para control de escurrimientos, desvíos por medio de canales interceptores, lagunas de regulación o una obra que requiera cruzar un río o arroyo con seguridad, como puede ser un puente.

El período de retorno ( $T$ ) de un evento hidrológico se define como el intervalo promedio de tiempo dentro del cual ese evento puede ser igualado o excedido una vez en promedio.

El análisis hidrológico requiere asignar un período de retorno a la avenida de diseño en función de las obras hidráulicas involucradas, por lo que se considera la recomendación al respecto, de acuerdo con la información proporcionada por la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos (GASIR) de la Comisión Nacional del Agua. Así, en la tabla 36, se muestran los períodos de retorno recomendables para estructuras menores.

**Tabla 36.** Períodos de retorno de diseño recomendables para estructuras menores

Tipo de estructura	Período de retorno (años)
Puente sobre carretera importante donde el remanso puede causar daños excesivos por inundación y ocasionar la falla del puente	50 a 100
Puente sobre carreteras menos importantes o alcantarillas sobre carreteras importantes	25
Alcantarillas sobre caminos secundarios, drenaje de lluvia o contracunetas	1 a 10
Drenaje lateral de los pavimentos, donde puede tolerarse encharcamiento con lluvia de corta duración	1 a 5
Drenaje de aeropuertos	5
Drenajes urbanos	2 a 10
Bordos * Debe aumentar si estas obras protegen poblados de importancia	2 a 50 *

Fuente: Manual de diseño de obras fluviales para la protección contra inundaciones. SARH, 1981

## Duración de la tormenta

Para obtener la duración de la tormenta, se aceptó el criterio de igualarla al tiempo de concentración. El tiempo de concentración  $t_c$  de una cuenca se define como el tiempo que requiere una partícula de agua en recorrer la distancia más alejada del parteaguas a la salida de la cuenca.

En cuencas naturales, el tiempo de concentración se valúa mediante la fórmula presentada por Chow (1962):

$$t_c = 0.01 (L/S)^{0.64} \quad \text{Ecuación (7)}$$

En donde:

- $t_c$  tiempo de concentración de la cuenca, en horas
- $L$  longitud del cauce principal, en m
- $S$  pendiente media del cauce, en porcentaje

Para cuencas urbanas, se recomienda utilizar la fórmula de Kirpich (Snyder, 1974):

$$t_c = 0.0662 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad \text{Ecuación (8)}$$

Siendo en este caso:

- $t_c$  tiempo de concentración de la cuenca, en horas
- $L$  longitud del cauce principal, en km
- $S$  pendiente media del cauce, adimensional

### Tormenta de diseño

Considerando la información proporcionada por el modelo de tormenta generado, el período de retorno correspondiente para este tipo de obras y la duración de la tormenta de diseño, se utiliza la ecuación que define las curvas de intensidad-duración-período de retorno de la región para cada una de las subcuencas analizadas (según lo descrito en el tema 4.2.5) y se determinan los valores de la intensidad de precipitación o tormenta de diseño.

## Determinación del gasto pluvial

Deducida la tormenta de diseño, se requiere conocer la relación lluvia-escorrimento necesaria para obtener la avenida de diseño. Para ello, primeramente, se indica la forma de cuantificar la lluvia en exceso y, posteriormente, se proporcionan las características de la avenida de diseño o revisión.

*Lluvia en exceso.* Se define como la parte de la lluvia que contribuye al escurrimiento directo, siendo este el producido por el escurrimiento superficial y en menor o mayor grado por el escurrimiento subsuperficial rápido.

Los factores que afectan directamente a la cantidad de lluvia en exceso o escurrimiento directo son el uso de la tierra, condición de la superficie, tipo de suelo, cantidad y duración de la lluvia.

Para tomar en cuenta el efecto de estos factores en cuencas naturales, se tiene el número de escurrimiento ( $N$ ). La determinación de este parámetro se estableció en el Apartado c) de la Fracción 5.2.5 de este documento.

Una vez conocido el número de escurrimiento (Chow, 1964), el valor de la lluvia en exceso  $h_e$  puede calcularse para una lámina de lluvia dada  $h_p$ , a partir de la ecuación:

$$h_e = \frac{\left( h_p - \frac{508}{N} + 5.08 \right)^2}{h_p + \frac{2032}{N} - 20.32} \quad \text{Ecuación (9)}$$

En donde:

$h_e$  lluvia en exceso, en cm

$h_p$  lluvia total, en cm

Para procesar el hietograma de una tormenta conocida de la lluvia en exceso, se procede a determinar el índice de infiltración  $\phi$ . Para ello, se aplica por tanteos la ecuación (Springall, 1970):

$$h_e = \sum_{i=1}^n (h_{pi} - \phi \Delta_t) \quad \text{Ecuación (10)}$$

Siendo:

$h_e$  lluvia en exceso, en mm

$h_{pi}$  lluvia correspondiente al intervalo  $i$  del hietograma, en mm

$\phi$  índice de infiltración, en mm/h

$\Delta_t$  intervalo de tiempo asignado al hietograma de la tormenta, en h

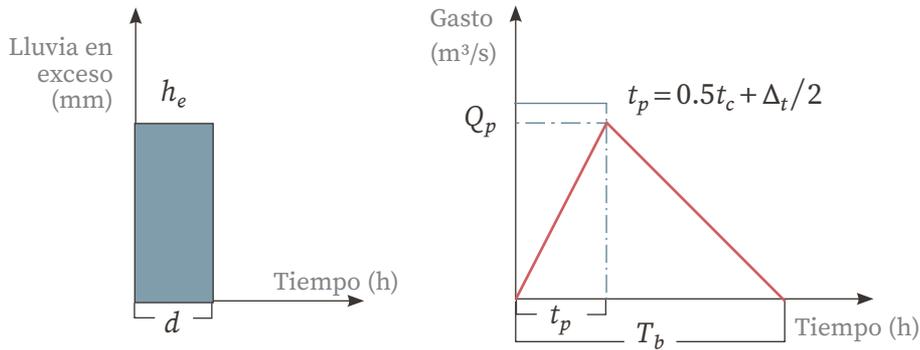
$n$  número de intervalos

Obsérvese que:

$$h_p = \sum_{i=1}^n h_{pi}$$

En donde  $h_p$  es la altura de lluvia total de la tormenta en estudio.

*Hidrograma unitario triangular.* Para cuencas naturales (Newton, 1967), el modelo lluvia escurrimiento a utilizar corresponde al hidrograma unitario triangular (**figura 13**), cuyas ecuaciones características son:



**Figura 13.** Hidrograma unitario triangular

Fuente: *Manual de diseño de obras fluviales para la protección contra inundaciones*. SARH, 1981

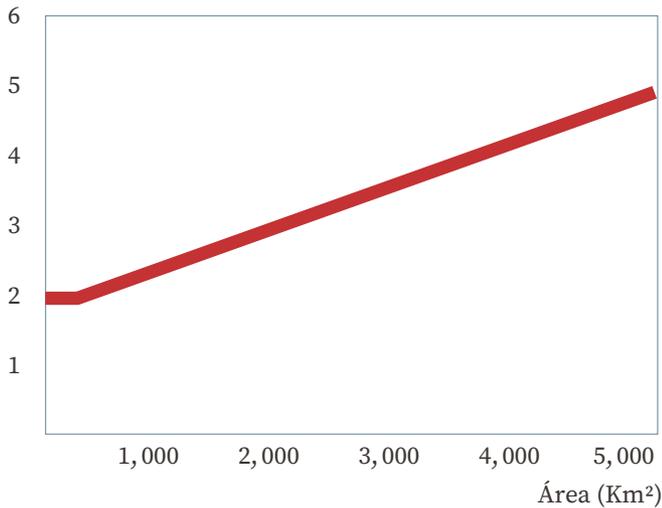
$$t_p = 0.5 t_c + \frac{\Delta_t}{2} \quad \text{Ecuación (11)}$$

$$Q_p = 0.556 \frac{h_e A}{n t_p} \quad \text{Ecuación (12)}$$

$$T_b = n t_p \quad \text{Ecuación (13)}$$

Siendo en este caso:

- $A$  = área de la cuenca en km<sup>2</sup> n parámetro (figura 14)
- $Q_p$  = gasto de pico, en m<sup>3</sup>/s  $h_e$  lluvia en exceso, en mm
- $T_b$  = tiempo base del hidrograma, en h
- $T_p$  = tiempo de pico del hidrograma, en h
- $t_c$  = tiempo de concentración, en h
- $\Delta_t$  = intervalo de análisis, en h



**Figura 14.** Variación del parámetro  $n$  en función del área de la cuenca

Fuente: *Manual de diseño de obras fluviales para la protección contra inundaciones*. SARH, 1981

*Método racional americano.* Para calcular el gasto pluvial en cuencas urbanas se aplica el método racional americano, cuya expresión es de la siguiente forma (Woods, 1960):

$$Q = 2.778 C i A \quad \text{Ecuación (14)}$$

Donde:

- $Q$  gasto máximo en lps
- $C$  coeficiente de escurrimiento adimensional
- $i$  intensidad de lluvia en mm/h
- $A$  área de la cuenca en Ha

Conocidas las características fisiográficas de la cuenca (fracción 5.2.5), se evalúa el tiempo de concentración ( $t_c$ ) (fracción 5.2.7), así como la intensidad de lluvia ( $i$ ) (fracción 5.2.6) y la lluvia en exceso ( $h_e$ ), (fracción 5.2.7) y, finalmente, se determina el hidrograma de la avenida de diseño con la aplicación de alguno de los dos últimos métodos de esta fracción.

## 4.3 Estudios de mecánica de suelos

### 4.3.1 Objetivos generales

La ejecución de un estudio de mecánica de suelos que tiene como objetivo la selección de sitios de disposición final para residuos de la construcción y demolición (RC&D) está enfocada al alcance de los siguientes objetivos:

- ❖ Determinación de las condiciones estratigráficas e hidráulicas particulares para posibles sitios de disposición final para RC&D.
- ❖ Obtención de las propiedades índice y mecánicas de los suelos que serían afectados por las nuevas condiciones de carga, a fin de conocer su comportamiento a corto y largo plazo.
- ❖ Efectuar la revisión de los estados límite de falla y de servicio, esto es, verificar que las acciones sean menores a la capacidad de carga, y que las posibles deformaciones no provoquen daños a la propia obra o a sus colindancias, considerando la normatividad vigente y las condiciones particulares de cada posible sitio de estudio.
- ❖ En caso requerido, apoyar a otras áreas involucradas dentro de la realización de un estudio integral, tales como hidrología, impacto ambiental, infraestructura urbana, etc., haciendo estudios de permeabilidad del suelo, construcción de bordos, analizando estabilidad de cortes naturales o taludes, diseñando caminos de acceso o refuerzo de pavimentos, etc.
- ❖ Establecer las recomendaciones para el diseño y construcción de las obras que involucren la realización de proyectos de disposición final para RC&D desde el punto de vista geotécnico.

Para el alcance de los objetivos señalados, se deberán realizar las actividades señaladas a continuación.

1

2

3

4

BIBLIOGRAFÍA

### 4.3.2 Antecedentes

En esta etapa, se deberá recopilar e investigar toda la información geotécnica referente al sitio de estudio. Estos trabajos permitirán conocer, en dado caso, las características regionales o locales del subsuelo, y a su vez, la elaboración de programas de actividades de campo y laboratorio que se adapten mejor a dichas características.

Los trabajos previos de investigación deberán incluir, además, la obtención de las condiciones topográficas a fin de tener una evaluación preliminar de posibles condiciones locales en el subsuelo, por ejemplo, sitios en el fondo de cañadas o al pie de laderas pueden acumular residuos naturales que forman depósitos de pie de monte que, por lo general, no tienen características adecuadas de compacidad, o en el caso de zonas profundas en valles, donde es posible la presencia de suelos lacustres o aluviales.

Otro punto importante por investigar, como parte de los antecedentes, se refiere a las condiciones sísmicas, especialmente en aquellas regiones o zonas en donde históricamente se han tenido problemas de comportamiento en las estructuras durante eventos sísmicos. A reserva de requerir en cierto momento un análisis más detallado o un espectro particular del posible sitio de estudio, sigue siendo útil, como parte de una orientación general, aunque ya no para un diseño preciso, la consulta de la regionalización sísmica propuesta por el *Manual de diseño de obras civiles*, capítulo de Sismo, de la Comisión Federal de Electricidad (1993). Para un análisis más preciso y detallado, se podrá aplicar el mismo Manual en su versión actualizada (CFE, 2015).

A fin de llevar a cabo la investigación señalada sobre las condiciones geotécnicas generales en un posible sitio para RC&D, se podrá recurrir

al reglamento de construcción local, a publicaciones de instituciones académicas (universidades e institutos tecnológicos), organismos de investigación como el Instituto de Ingeniería de la UNAM (II UNAM), Asociaciones Técnicas como la Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica (SMIG), o a instituciones federales que hayan realizado este tipo de trabajos, tales como Petróleos Mexicanos (Pemex) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Por supuesto que a las fuentes de información anteriores podrán sumarse las experiencias de particulares y empresas privadas, que también podrán proporcionar datos valiosos sobre las características del subsuelo en el sitio de estudio.

Los resultados de esta etapa del estudio permitirán elaborar un programa de exploración adecuado a la estratigrafía y tipo de suelo esperados en el sitio de interés.

### 4.3.3 Exploración de campo

Una vez que se ha seleccionado el o los posibles sitios para la disposición final de los RC&D, los trabajos de investigación en campo tienen como fines primordiales caracterizar el suelo en estos lugares de estudio, establecer la estratigrafía local que incluirá tipo de materiales existentes, espesores, posición del nivel de aguas freáticas, compacidad de suelos granulares y consistencia de suelos finos, existencia de estratos permeables y, en un momento dado, verificar la ausencia de agrietamientos o cavidades, especialmente en aquellas regiones donde se tengan antecedentes sobre la presencia de estos fenómenos, ya sea naturales o provocados por la mano del hombre.

Las actividades que se realizan en esta parte del estudio deberán seguir los procedimientos estandarizados y especificados que se mencionan

de manera general más adelante y que, de forma detallada, se describen en los diferentes manuales y normas vigentes, entre los que se pueden mencionar los más aplicados en México:

- ❖ Reglamentos de Construcción locales, o en su caso, el *Reglamento de Construcción para el Distrito Federal* (RCDF, 2004)
- ❖ *Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Cimentaciones* (RCDF, 2004)
- ❖ ASTM (*American Society for Testing of Materials*)
- ❖ *Manual de Mecánica de suelos de la Secretaría de Recursos Hidráulicos* (SRH, 1970)
- ❖ *Instructivo para ensayos de suelos del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua* (IMTA, 1990)
- ❖ Especificaciones generales para proyectos de obras. *Manual de Petróleos Mexicanos, Manual de diseño de obras civiles* (CFE, 1993).

A continuación, como parte de esta etapa de actividades, se presenta una descripción resumida de las características más importantes en los métodos de investigación de campo que con mayor frecuencia se aplican en la práctica de la mecánica de suelos en la república mexicana:

- ❖ *La investigación del subsuelo a poca profundidad (<4.0 m) se podrá efectuar mediante la excavación de pozos a cielo abierto (PCA), ya sea por medios manuales o con equipo mecánico de construcción. Este método de exploración permitirá entre otras cosas observar de manera directa la estratigrafía superficial del sitio de estudio, obtener muestras alteradas de los estratos existentes, y extraer muestras cúbicas inalteradas. Las muestras obtenidas son identificadas y empacadas a fin de ser trasladadas al laboratorio de mecánica de suelos donde se realizarán los ensayos necesarios para determinar las propiedades índices y las propiedades mecánicas*

1

2

3

4

de los suelos que serían afectados por las nuevas condiciones de trabajo.

- ❖ *Para la exploración en suelos a diversas profundidades*, se emplea el método de penetración estándar (prueba ASTM D-1586), el cual se realiza dejando caer un martillo que pesa 63.5 kg de peso desde una altura de caída libre de 76 cm sobre un cabezal que impulsa a las barras de perforación en cuya parte inferior está conectado un tubo partido o de mediacaña. El número de golpes “N” necesario para producir una penetración de 30 cm en la parte media del muestreador se considera como la resistencia a la penetración, la cual a su vez puede correlacionarse con la compacidad relativa y el ángulo de fricción interna de las arenas, y de manera menos confiable, con el valor de cohesión en suelos finos. Una descripción más detallada puede encontrarse en el informe de Hvorslev (1948). Las muestras obtenidas se colocan en bolsas de polietileno, selladas y perfectamente identificadas de acuerdo con los manuales e instructivos mencionados al principio de este inciso, a fin de transportarse al laboratorio y proceder a la ejecución de las pruebas requeridas.
  
- ❖ *Para la exploración en suelos blandos*, se podrán obtener muestras inalteradas mediante el empleo de un tubo de pared delgada, conocido también como tubo Shelby, que se hinca a presión en suelos de consistencia blanda. El tubo tiene un diámetro de 10 cm, espesor de 1.5 mm y una longitud que en la mayoría de los casos es de 90 cm. La cabeza tiene perforaciones laterales para aliviar la presión del muestreador y una válvula que protege a la muestra de las presiones hidrodinámicas que se generan al extraerla.

❖ *Para suelos de consistencia blanda a media* también se puede utilizar el cono eléctrico, consistente en el hincado de manera continua, de un cono metálico con ángulos interiores a  $60^\circ$ , por medio de una presión hidráulica a velocidad constante, cuyo valor se registra en una consola eléctrica; la resistencia que el suelo opone a la penetración del cono ( $qc$ ) se puede correlacionar con la cohesión en suelos finos.

❖ *El avance y muestreo en materiales rocosos* se hará por medio de la herramienta conocida como barril Denison que recupera núcleos de roca que a su vez son cortados por una broca de diamante o carburo de tungsteno. La recuperación de los corazones de roca, además de permitir identificar y clasificar el tipo de material existente en el sitio, también ofrece la posibilidad de medir cualitativamente la calidad del estrato rocoso mediante el parámetro conocido como índice de calidad de la roca (ICR) o más comúnmente por sus siglas en inglés RQD (*rock quality designation*) (Deere, 1963).

Cuando se tengan condiciones topográficas, geológicas o características locales especiales, como la presencia de zonas minadas, sospecha de fallas o la posibilidad de cavidades, los procedimientos anteriores podrán ser complementados por medio de métodos indirectos que proporcionan las técnicas de exploración geofísica.

Entre los procedimientos geofísicos más comúnmente empleados para la exploración del subsuelo y de acuerdo con los objetivos que persigue el proyecto de disposición final para RC&D, se encuentran los siguientes: resistividad eléctrica, por el método de calicateo polo dipolo o por medio de sondeos eléctricos verticales (SEV), los cuales se basan en la resistividad que oponen los diversos materiales del subsuelo al paso de una corriente eléctrica; tendidos de refracción sísmica (TRS), especial-

mente útiles en el caso de mantos rocosos, y en el cual se mide la velocidad de las ondas sísmicas a través de los diferentes estratos de suelo o roca, provocadas a su vez por un impacto o explosión controlada; georradar, método que utiliza las propiedades de propagación de ondas ultrasónicas a través de los diferentes horizontes litológicos presentes en el sitio que se esté estudiando.

## Número, profundidad y distribución de exploraciones

El tipo, cantidad y profundidad de las exploraciones programadas dependerá de varios factores, tales como antecedentes geotécnicos, topografía, tamaño del área por explorar, y posibles riesgos a causa de una eventual falla por capacidad de carga, o las consecuencias de asentamientos excesivos, tanto para el propio proyecto de disposición de residuos como para las para estructuras aledañas existentes.

Dado que no existe un marco normativo para proyectos de disposición final de residuos de la construcción y demolición (RC&D), tampoco se tienen criterios específicos en cuanto al número o profundidad de las exploraciones por realizar; sin embargo, se tienen algunas recomendaciones que pueden ser aplicables a este caso, señalando que de cualquier manera será fundamental el conocimiento del subsuelo y las experiencias previas que se tengan en la zona de estudio.

A continuación, en las **tablas 37 y 38** se presentan algunas recomendaciones que en determinado momento podrán servir de guía para programar el número de exploraciones por realizar para un proyecto de este tipo.

**Tabla 37.** Espaciamiento propuesto de sondeos

Espaciamiento de sondeos	
Tipo de Obra	Espaciamiento en metros
Caminos y carreteras	300 – 600
Presas y diques	30 – 60
Bancos de préstamo	30 – 120
Edificios de varios pisos	15 – 30
Estructuras de uno o dos niveles	30 - 90

Fuente: Adaptado de George B. Sowers y George F. Sowers, 1980, “Introducción a la Mecánica de Suelos y Cimentaciones”, pág. 335

**Tabla 38.** Espaciamiento requisitos mínimos de exploración en campo

Requisitos mínimos de exploración		
Zona geotécnica	Perímetro del área en estudio	Número de exploraciones
Zona I y II	$\leq 80$ m	1 exploración *
Zona III	$\leq 120$ m	1 exploración *

**Notas:**

\* Para estructuras ligeras o medianas (presión de contacto  $<40$  Kpa) y con profundidades de desplante menor a 2.5 m la exploración se podrá realizar mediante pozos a cielo abierto.

Para estructuras pesadas ( $P_c >40$  Kpa y/o profundidades de desplante mayores a 2.5 m) la exploración será mediante sondeos profundos.

Fuente: Gobierno de la Ciudad de México. *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal*, 2004

En cuanto a la profundidad de los sondeos, los criterios que se tienen al respecto no contemplan cotas de exploración fijas, puesto que estas dependerán de los antecedentes geotécnicos de la región, de las dimensiones calculadas o estimadas para las áreas que transmitirán las cargas y de la magnitud de estas.

Una recomendación, generalmente utilizada en la práctica, indica que las exploraciones para estructuras pesadas, siguiendo el criterio mencionado anteriormente, deberán llegar hasta una profundidad en que los esfuerzos inducidos por las cargas externas tengan una magnitud aproximada del 10 % al 20 % de la presión de contacto total en la superficie, para lo cual se podrán aplicar las diversas teorías de distribución de esfuerzos desarrolladas para tal fin.

Evidentemente, el criterio anterior está sujeto a la estratigrafía real encontrada, ya que, por ejemplo, se pueden tener estratos de materiales muy duros o inclusive roca a poca profundidad, hecho que no justificaría la realización de sondeos a grandes profundidades, independientemente del área por estudiar o de la magnitud de las nuevas cargas aplicadas.

Finalmente, se buscará que las exploraciones se distribuyan de manera equidistante, pero poniendo énfasis en aquellas zonas donde se tenga proyectada una mayor concentración de cargas, o en puntos donde existan condiciones particulares que obliguen a tener un mayor número de pozos o sondeos, como la existencia de estructuras colindantes, sospecha de fallas o accidentes geológicos, o áreas donde se manifiesten deformaciones importantes y fuera del patrón observado en el resto del área estudiada.

### 4.3.4 Ensayes de laboratorio

Las muestras obtenidas en los trabajos de exploración de campo serán llevadas a laboratorio, donde deberán ejecutarse los ensayos que, de acuerdo con los requerimientos del proyecto, a las condiciones topográficas y sísmicas, a la estratigrafía del sitio en estudio, a la naturaleza de suelo encontrado y al tipo de muestra obtenido, deberán realizarse siguiendo los procedimientos indicados y estandarizados por diferentes organismos y manuales.

En general, las pruebas de laboratorio se engloban en dos grandes grupos:

- ❖ Obtener las *propiedades índice* o físicas de los suelos (clasificación, peso volumétrico natural, límites de plasticidad, granulometría, contenido natural de agua, grado de saturación, relación de vacíos, etc.), a fin de determinar, como su nombre lo indica, las características físicas que permitan tener un conocimiento aproximado y preliminar de los suelos en estudio, y con ello poder elaborar un programa de pruebas más detallado y preciso.
- ❖ *Determinar las propiedades mecánicas*, las cuales permiten obtener características de comportamiento, tales como resistencia al esfuerzo cortante, compresibilidad y permeabilidad.

Este grupo de pruebas, ya sea de manera individual o combinada, permitirá establecer las reacciones y comportamiento de los suelos a corto y largo plazo, como consecuencia de la aplicación de las cargas que representan los residuos de la construcción y demolición. A continuación, en la **tabla 39**, se mencionan algunas de las pruebas que en principio deberán contemplarse, así como las referencias que describen el procedimiento de ejecución de cada una.

**Tabla 39.** Ensayes de laboratorio para muestras de suelo en estudios de disposición final para RC&D

PRUEBA	ASTM *	AASHO **
Clasificación SUCS	D-2487	
Contenido de humedad	D2216-71	
Límites de consistencia	D-423, D-424 y D-427	T89-68 y T90-70
Análisis granulométrico	D421-58 y D422-63	T88-70
Densidad de sólidos	D854-58	T100-70
Compresión simple	2166-66	T208-70
Resistencia triaxial (UU)	D2850-70	T234-70
Consolidación unidimensional	D2435-70	T216-66
Permeabilidad	D-2434	

Fuentes: \*American Society for Testing of Materials, \*\* American Association of State Highways Officials.

### 4.3.5 Capacidad de carga

Uno de los objetivos fundamentales que persigue un estudio de mecánica de suelos para fines de cimentaciones, se refiere a la obtención de la capacidad de carga, propiedad que combina las propiedades de resistencia de un suelo, con las características geométricas de una cimentación, tales como el ancho de la misma y su profundidad de desplante, a fin de establecer las presiones de contacto máximas permisibles que podrán aplicarse al suelo de cimentación sin que este sufra alguna falla por ruptura o esfuerzo cortante.

Existen diversas teorías y criterios para la determinación de la capacidad de carga. Sin embargo, para los objetivos del presente documento, solamente se presentará la teoría propuesta por Karl Terzaghi (1943),

que ha servido de base para el desarrollo de otras teorías posteriores, y el criterio propuesto por el *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal* (RCDF 2004) a través de las *Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Cimentaciones* (NTCDCC), documento que también ha servido como referencia en la elaboración de algunos otros reglamentos locales en la República Mexicana.

*Criterio de Terzaghi* (1943). El cálculo de la capacidad de carga toma en cuenta la sobrecarga por encima del desplante, así como las propiedades de resistencia y peso correspondientes al terreno natural sobre el cual se colocará la carga que, en este caso, estaría representada por materiales producto de demoliciones y desechos de construcción.

En un sentido general, se considera al suelo de apoyo con un comportamiento cohesivo friccionante, y para su determinación se aplica la siguiente ecuación:

$$Q_a = (c N_c + P_v N_q + 0.5 B^{\gamma} N_{\gamma}) / FS \quad \text{Ecuación (21)}$$

Donde:

$Q_a$	capacidad de carga admisible (de diseño)
$c$	cohesión aparente del suelo de apoyo, en $t/m^2$
$p_v$	presión vertical total a la profundidad de desplante, en $t/m^2$
$\gamma$	peso volumétrico del suelo de apoyo, en $t/m^3$
$B$	ancho de la cimentación o del área cargada, en m
$N_c, N_q,$	
$N_{\gamma}$	coeficientes de capacidad de carga, que dependen del ángulo de fricción interna del material
$FS$	factor de seguridad

El resultado obtenido mediante la aplicación de la expresión anterior representa el esfuerzo máximo que puede transmitirse al suelo de apoyo sin que esta sufra una falla de ruptura por esfuerzo cortante; el valor que se obtenga deberá compararse contra la presión unitaria de contacto que, para este caso, será el resultado de dividir la carga máxima esperada, debido a la acumulación de los desechos producto de RC&D, entre el área designada para tal fin.

*Criterio del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF, 2004).* Este criterio, aun cuando originalmente fue elaborado para revisar las condiciones de seguridad de estructuras que sean desplantadas dentro del área de la cuenca de la Ciudad de México, en la práctica ha resultado un instrumento normativo que, por su condición de abarcar diversas situaciones geotécnicas, ha sido utilizado ya sea de manera directa en regiones que carecen de una normatividad propia o como base para la elaboración de una reglamentación local.

Se trata de un criterio integral donde se determina de manera detallada no solamente el valor de la capacidad del sistema suelo-cimentación, sino también se revisa la estabilidad de dicho sistema en función de la presión unitaria transmitida al subsuelo. Dado que para el caso de sitios de disposición final para residuos de la construcción y demolición (RC&D) no se contempla la necesidad de usar cimientos profundos, a continuación, se detalla solamente el criterio antes señalado (RCDF, 2004) aplicable para cimentaciones superficiales.

### Capacidad de carga

Para el caso de suelos con un comportamiento cohesivo, la capacidad de carga admisible se obtendrá de la siguiente manera:

$$q_a = c_u N_c F_R + P_v$$

Ecuación (22)

Donde:

- $q_a$  capacidad de carga admisible, en  $t/m^2$   
 $c_u$  Cohesión promedio del suelo de apoyo, en  $t/m^2$   
 $N_c$  Coeficiente de capacidad de carga, determinado con la expresión:

$$N_c = 5.14 (1 + 0.25 D_f/B + 0.25 B/L), \text{ donde:}$$

$L$  = Longitud del cimiento, en m

$B$  = Ancho del cimiento, en m

$D_f$  = Profundidad de desplante del cimiento, en m

$P_v$  Presión vertical total a la profundidad de desplante por peso propio del suelo, en  $t/m^2$

$F_R$  Factor de resistencia: 0.35 o 0.70, dependiendo del tipo de cimiento y de la zona Geotécnica de que se trate (NTCDCC).

Para suelos de comportamiento primordialmente friccionante, se utilizará la siguiente expresión:

$$q_a = [P_v' (N_q - 1) + \gamma B N\gamma/2] F_R + P_v$$

Ecuación (23)

Donde:

- $q_a$  capacidad de carga admisible, en  $t/m^2$   
 $P_v'$  Presión vertical efectiva del suelo a la profundidad de desplante, en  $t/m^2$   
 $N_q$  Coeficiente de capacidad de carga, que depende del ángulo de fricción del suelo  
 $\gamma$  Peso volumétrico del material de apoyo, en  $t/m^3$

1

2

3

4

$P_V$	Presión vertical total a la profundidad de desplante por peso propio del suelo, en $t/m^2$
$B$	Ancho del cimiento, en m
$N\gamma$	Coefficiente de capacidad de carga, que depende del ángulo de fricción del suelo
$F_R$	Factor de resistencia: 0.35

### Estados límite de falla

De acuerdo con el RCDF y sus NTCDCC, deberá verificarse la estabilidad de las cimentaciones para distintas combinaciones posibles de acciones verticales que, una vez afectadas por un factor de carga, deberán ser menores a la capacidad de carga admisible de la cimentación.

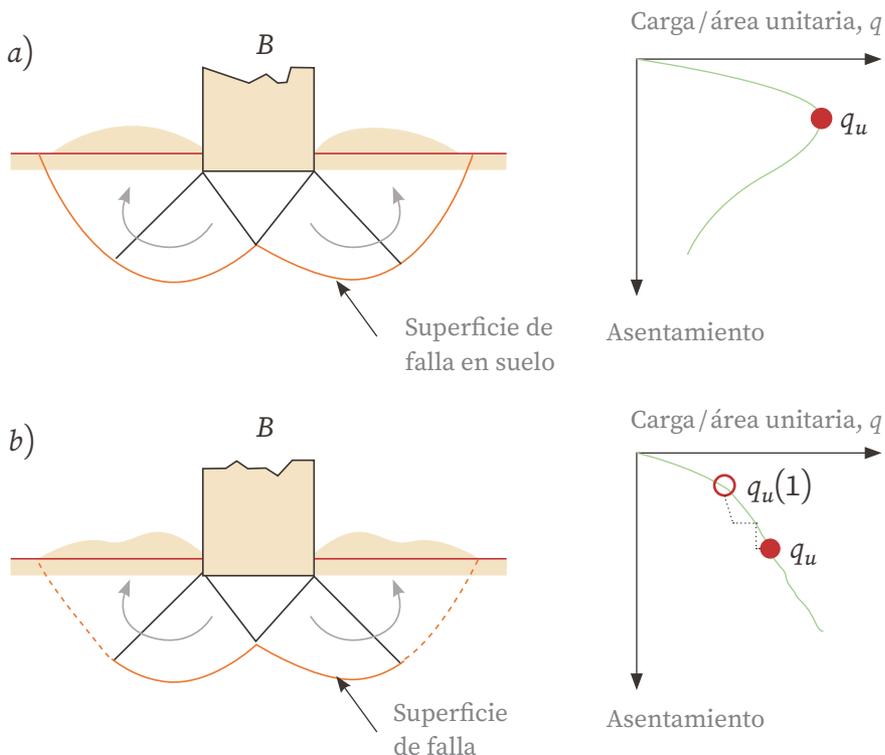
En caso de que esta condición no se cumpla, se tiene el riesgo de que el suelo donde se han colocado los residuos producto de construcciones y demoliciones sufra una falla por esfuerzo cortante, hecho que a su vez pudiera provocar movimientos o deformaciones en las inmediaciones de la zona de falla, dado que el mecanismo de esta contempla un desplazamiento radial hacia los costados y hacia la superficie del terreno, tal como se muestra en la **figura 15**. Si hubiera estructuras o infraestructura urbanas cercanas, estas podrían verse afectadas al desarrollarse el mecanismo de falla antes indicado.

1

2

3

4



**Figura 15.** Mecanismos de falla para cimientos superficiales

Fuente: Terzaghi, 1943

Para evitar lo anterior, se deberá verificar el cumplimiento de la siguiente expresión (RCDF y NTCDC, 2004):

$$\sum Q F_c / A < q_a \quad \text{Ecuación (24)}$$

Donde:

$\sum Q$  Suma de las acciones verticales a nivel de desplante de la cimentación (considerando carga viva máxima, c.v.máx.)

$F_c$  Factor de carga (artículo 139 del RCDF)

- $A$  Área del cimiento.  
 $q_a$  Capacidad de carga admisible, en  $t/m^2$

Una vez que se cumpla la desigualdad anterior, se podrá concluir que la cimentación es estable bajo condiciones estáticas, de otra manera se tendrá que cambiar las condiciones geométricas del cimiento o adoptar otro tipo de cimentación.

### 4.3.6 Asentamientos

Para un sitio de disposición final de residuos de la construcción y demolición, el tema de los hundimientos podría no ser tan relevante, dado que la consecuencia de un asentamiento excesivo por deformaciones del suelo se asocia a daños estructurales o de operación de las estructuras que se desplantan sobre ellos. Dado que los residuos no tienen ni requieren de una estabilidad estructural como tal, los efectos de un hundimiento no tendrían consecuencias mayores sobre ellos; sin embargo, nuevamente se hace referencia a las consecuencias que una deformación excesiva del subsuelo podría tener sobre edificaciones vecinas o en la infraestructura urbana, tales como vialidades, redes de alcantarillado o de agua potable, instalaciones eléctricas, etc., por lo que es importante realizar una estimación de los posibles hundimientos que provocaría la colocación de las cargas representadas por los RC&D.

Dependiendo del tipo de suelo existente, los asentamientos podrán ser a corto plazo (deformaciones elásticas) o diferido (por consolidación). A manera de ejemplo, para la Ciudad de México, en las zonas geotécnicas II y III (Transición y Lago, respectivamente), las deformaciones más importantes ocurren a largo plazo, mientras que en la Zona I los hundimientos principales se dan de manera inmediata. De igual manera,

1

2

3

4

en otras regiones del país, la magnitud y las características de los asentamientos dependerán del tipo de suelo que es afectado por las nuevas cargas.

A continuación, se indican los procedimientos generales que deberán seguirse para la obtención de los hundimientos, debido a la aplicación de las cargas por efecto de la acumulación de los desechos provenientes de demoliciones o actividades relacionadas con la industria de la construcción.

### Asentamientos por consolidación (diferidos)

Estos hundimientos se dan, por lo general, en suelos que tienen las siguientes características: valores altos en su relación de vacíos, su porosidad y su contenido natural de agua y, por el contrario, una baja permeabilidad. La reacción o deformación del suelo ocurre cuando se aplica una carga externa que rompe el equilibrio entre los esfuerzos en la estructura del suelo, haciendo que el agua de los poros sea expulsada de estos, lo cual permite entonces que las partículas sólidas se reacomoden en los huecos que han quedado libres por la salida del agua. La magnitud y velocidad de deformación dependen del coeficiente de permeabilidad del material, del espesor del estrato compresible, de la historia de cargas previas en el sitio, así como de sus características de deformabilidad.

El cálculo de estos asentamientos se da mediante la aplicación del siguiente criterio (Terzaghi, 1943):

$$\delta_{DIF} = \sum M_v \Delta_\sigma H_i \quad \text{Ecuación (25)}$$

1

2

3

4

Donde:

- $\delta_{DIF}$  Hundimiento a largo plazo
- $M_v$  Coeficiente de variación volumétrica de cada estrato que contribuye al hundimiento total
- $\Delta\sigma$  Incremento de esfuerzo vertical en cada uno de los estratos de suelo considerados, producidos por la carga viva media y el peso de la cimentación
- $H_i$  Espesor de cada estrato compresible considerado

### Asentamientos elásticos (inmediatos)

Los hundimientos a corto plazo se dan en suelos granulares (arenas y gravas), y en suelos finos poco plásticos y con bajos contenidos de agua. La reacción del suelo ocurre de manera inmediata, es decir, se da al momento en que se está colocando las cargas sobre el terreno.

Los hundimientos que se encuentran en esta condición pueden calcularse aplicando criterios de la teoría de la elasticidad, tal como lo indica la Comisión Federal de Electricidad (1981).

$$\delta_{e-m\acute{a}x} = qB \left( (1 - \nu^2) / E \right) I_w \quad \text{Ecuación (26)}$$

Donde:

- $\delta_{e-m\acute{a}x}$  Asentamiento elástico, en m
- $q$  Esfuerzo transmitido al suelo por medio de la cimentación, en t/m<sup>2</sup>
- $B$  Ancho del cimiento o área cargada, en m
- $\nu$  Relación de Poisson

- $E$  Módulo de elasticidad del suelo afectado, en  $t/m^2$   
 $I_w$  Factor adimensional por la forma de la cimentación

### 4.3.7 Estabilidad de taludes

Las teorías y procedimientos de análisis de estabilidad no han sido suficientemente desarrollados para considerar las características heterogéneas y erráticas que pueden presentar los residuos producto de construcciones y demoliciones. Por lo general, los métodos actuales de análisis se basan en propiedades mecánicas de medios más o menos uniformes y continuos, pudiéndose inclusive tomar en cuenta medios estratificados; sin embargo, para ellos es necesario asignar parámetros de resistencia (cohesión y ángulo de fricción) y el peso del tipo de suelo que constituya el talud por analizar.

En el caso de RC&D, no se tienen propiedades que puedan representar de manera confiable a toda una masa de estos materiales, puesto que al menos en México no hay investigaciones desarrolladas para tal fin; de tal suerte, se tendrían que adoptar algunos métodos de análisis un tanto empíricos que permitieran tener alguna idea más precisa del comportamiento de los taludes constituidos por este tipo de residuos. Seguramente en cuanto se empiecen a desarrollar los sitios de disposición de RC&D, se contará con más información que permita elaborar métodos de análisis y de revisión de taludes de acuerdo con el comportamiento observado.

Mientras tanto, para fines exclusivos de estimar cargas y áreas de trabajo, en el diseño de las celdas de disposición, y tomando en cuenta que en principio estos materiales se colocarán a volteo, es decir, sin control de compactación, se podrá tomar un ángulo de reposo natural igual a  $30^\circ$  o taludes con pendiente 1:0.6 (hor:ver).

1

2

3

4

### 4.3.8 Interpretación y evaluación de resultados

Los criterios para poder interpretar los resultados, tanto de capacidad de carga como de los posibles hundimientos, toman en cuenta las consecuencias que podrían sufrir las diversas estructuras al sobrepasar ciertos límites de resistencia o deformabilidad; sin embargo, en el caso de sitios para la disposición de residuos de la construcción y demolición, es claro que no es posible aplicar los mismos criterios de evaluación, dado que no se trata de obras donde habitan o trabajan personas (vivienda u oficinas), o estructuras que proporcionan servicios (escuelas, comercios, hospitales, etc.), o que son utilizadas para alojar bienes (bodegas, fábricas, almacenes, etc.).

En el caso de un edificio, una planta industrial o un almacén, una falla por capacidad de carga, casi de manera irremediable, trae como consecuencia el colapso de la estructura; un asentamiento excesivo provocará problemas estéticos o de operación, fallas en acabados y elementos no estructurales, y eventualmente, de continuar las deformaciones, se podría tener problemas de tipo estructural que pondrían en riesgo la edificación.

En cuanto al proyecto de análisis de sitios para la disposición de RC&D, y dado que no se trata de estructuras rígidas que alberguen bienes, servicios o personas, los criterios tradicionales generales que califican como “alta” o “baja” a la capacidad de carga, o que limitan los asentamientos en función de posibles interferencias de operación o riesgos estructurales no son aplicables. Se tendría entonces que hacer una interpretación particular de cada sitio para evaluar posibles consecuencias en caso de fallas por capacidad de carga o de asentamientos excesivos, tomando en cuenta daños a colindancias, infraestructura urbana, eventuales estructuras dentro del mismo sitio de disposición, o afectaciones para la propia operación del proyecto.

Tomando como base proyectos con características similares, tales como sitios para disposición de desechos sólidos (rellenos sanitarios), y considerando algunos criterios para limitar los asentamientos en áreas urbanas, se puede establecer de manera general las siguientes recomendaciones al respecto que se presentan en la **tabla 40**.

**Tabla 40.** Recomendación para limitar presiones de contacto sitios para disposición de RC&D

Altura de celdas de disposición [m]	Capacidad admisible mínima recomendable [t/m <sup>2</sup> ]
3.0	8.4
5.0	14.0
7.0	19.6

En lo que se refiere a la magnitud de los hundimientos, se puede considerar el criterio mostrado en la **tabla 41**:

**Tabla 41.** Asentamiento máximo permisible

Condición del sitio y/o celda de disposición	Asentamiento máximo permisible [cm]
Con colindancias	15.0
Sin colindancias	30.0

Fuente: Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal y Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Cimentaciones, 2004

El criterio anterior se aplica a zonas urbanas y a estructuras rígidas (acero, concreto o mampostería) que albergan personas, bienes o servicios, por lo que los valores anteriores se antojarían muy conservadores

en el caso de sitios para disposición de RC&D por las razones expuestas en párrafos anteriores. Por lo tanto, se reitera la recomendación para hacer análisis particulares para evaluar las deformaciones máximas que se pueden permitir de acuerdo con los posibles daños, riesgos o interferencia al entorno y al propio proyecto.

## 4.4 Estudios de topografía

Un levantamiento topográfico reside en crear una topografía de un lugar, es decir, llevar a cabo la representación gráfica de un terreno de manera simplificada. Con el levantamiento topográfico, un ingeniero geomático realiza un reconocimiento y medición de una superficie, incluyendo tanto las características naturales de esa superficie como las que haya hecho el ser humano. Con los datos medidos en un levantamiento topográfico, se pueden dibujar mapas o planos en los que, aparte de las características mencionadas anteriormente, también se describen las diferencias de altura de los relieves o de los elementos que se encuentran en el lugar donde se realiza el levantamiento.

### 4.4.1 Objetivos

El principal objetivo de un levantamiento topográfico es determinar la posición relativa entre varios puntos sobre un plano horizontal. Esto se realiza mediante un método llamado planimetría.

El siguiente objetivo es determinar la altura entre varios puntos en relación con el plano horizontal definido anteriormente. Esto se lleva a cabo mediante la nivelación directa. Tras ejecutar estos dos objetivos,

es posible dibujar planos y mapas a partir de los resultados obtenidos para conseguir un levantamiento tipográfico.

De acuerdo con los objetivos anteriores, surgen dos métodos de levantamientos topográficos: *planimétrico* y *altimétrico*.

Los levantamientos topográficos y la topografía, en general, tienen una gran importancia en el desarrollo de proyectos de construcción de infraestructuras, debido a la evolución y avance que se ha producido en esta ciencia por la ayuda de las nuevas tecnologías que permiten llevar a cabo mediciones y descripciones más precisas y exactas. Por lo anterior, una medida mal tomada o un plano realizado erróneamente pueden tener graves consecuencias, pues supondría una incorrecta representación de la realidad que impediría efectuar construcciones en dicho terreno.

#### 4.4.2 Estudios requeridos para definir una zona adecuada

La ejecución de un estudio de topografía para fines de la selección de un sitio de disposición final para RC&D no puede diseñarse y operarse en cualquier tipo de topografía. Sin embargo, es preferible aquella en que se logre un mayor volumen aprovechable por hectárea, como puede ser el caso de minas abandonadas a cielo abierto e inicio de cañadas, así como depresiones naturales de cerros.

El estudio topográfico se encuentra dentro de los estudios requeridos para poder definir una zona adecuada para la disposición de residuos sólidos de la construcción y demolición, así como para la planeación y control de la disposición ordenada del material.

1

2

3

4

El estudio topográfico requiere de una serie de actividades, que se clasifican temporalmente como las que se realizan antes del estudio, las que se llevan durante él y las que se realizan después (De Sanjosé *et al.*, 2009).

## Actividades que se realizan antes del estudio

**Evaluación del sitio.** Esta actividad consiste en evaluar mediante una serie de variables cada uno de los sitios preseleccionados como posibles para el fin requerido.

Las variables de interés, desde el punto de vista de la topografía, que se requieren observar son las siguientes:

- ❖ **Ancho vialidad principal:** determinar la distancia entre guarniciones para identificar la facilidad de las maniobras de los camiones para entrar y salir del predio.
- ❖ **Longitud colindante a calle:** conocer la distancia cuyo frente colinda con la calle para poder proyectar accesos y salidas dentro del reglamento de vialidades.
- ❖ **Colinda al norte, sur, este y oeste:** conocer los colindantes para establecer el límite legal del predio.
- ❖ **Bardeado:** determinar los límites que están bardeados y que serán indicadores del límite legal del predio
- ❖ **Vegetación:** tipo de vegetación cuyo impacto podría ser definitivo para impedir que se utilice el predio, y conocer la cantidad de desmonte que se tendría que llevar a cabo.
- ❖ **Postes:** cuantificar y evaluar el tipo de postes que se encuentran tanto en el perímetro como dentro del predio. Una gran cantidad de postes puede restringir el proyecto en cuanto a los accesos por su distribución horizontal como en la altura de cables y en cuanto

1

2

3

4

a la zona federal si en caso de que una línea de alta tensión atravesase al predio.

- ❖ **Banqueta:** cuando no exista banqueta, el ancho de la vialidad será afectado en el momento de urbanizar, lo que reducirá a futuro el ancho de la calzada.
- ❖ **Flujo vial:** conocer la intensidad de circulación de vehículos para estimar tiempos de viajes y maniobras de entrada y salida al sitio, a fin de proyectar accesos adecuados que no entorpezcan la circulación de vehículos.
- ❖ **Accesos:** referente a los caminos secundarios que llevan al predio y que se tienen que circular después de dejar una avenida principal, con el fin de determinar la factibilidad de circulación de camiones de volteo en cuanto al ancho, pendiente, vehículos parqueados sobre los caminos que impidan el paso, tianguis, terracería y cables a baja altura.
- ❖ **Pendientes máxima, media y mínima:** conocer la inclinación del terreno para planear ordenadamente las zonas de tiro, respetando las pendientes permitidas para el tipo de vehículos de carga.
- ❖ **Área:** conocer el área del predio con el fin de saber la extensión y cuantificar el volumen de capacidad del predio.
- ❖ **Orientación del lindero colindante a la calle:** conocer la orientación del predio para georreferenciarlo, de este modo los usuarios de la zona de tiro podrán calcular tiempos y recorridos mediante geoaplicaciones usuales.
- ❖ **Número de lados del predio:** determinar el polígono que delimita el predio. Esto con la finalidad de cuantificar el área.
- ❖ **Desnivel máximo:** estimación del rango de diferencias de elevación para establecer una ordenada planeación en los rellenos.
- ❖ **Accidentado, ondulado, plano:** determinar la topografía del terreno para establecer los caminos, dentro del predio, que marcarán la eficiencia del fin que se persigue.

- ❖ **Límite definido:** conocer si existen evidencias físicas que delimiten el predio claramente con el objeto de prevenir tiempos y costos del trazo de los lados del predio de acuerdo con escrituras o con algún representante legal.
- ❖ **Construcciones en el interior:** identificar el tipo de construcciones ya existentes en el interior del predio con la finalidad de demarcar su ubicación y considerarlas para la planeación de las actividades de relleno.
- ❖ **Comercios cercanos:** conocer tipos de comercios aledaños al predio. Se obtendrán parámetros de cierre de vialidades por tianguis o mercados sobre ruedas, ferias o estacionamiento de camiones que cargan y descargan mercancía.
- ❖ **Despoblado:** conocer el tipo de población en los alrededores. Prevenir quejas de vecinos y afectaciones por contaminación de ruido polvo y humo.

Reconocimiento del sitio. Esta actividad consiste en hacer un recorrido del predio factible con el fin de observar con más detalle las variables expuestas en el inciso anterior, y así poder determinar de manera fehaciente el sitio que presente mayor ponderación en sus variables.

El recorrido tiene que llevarse a cabo sobre todo el predio, de preferencia a pie para poder tener una mejor visión de las variables consideradas. En este recorrido es necesario contar con un navegador GPS, una brújula con clisímetro y una cinta, así como cámara fotográfica para obtener con más detalle los datos que responden a cada variable.

1

2

3

4

## Actividades que se realizan durante el estudio topográfico

### El levantamiento topográfico

Después de haber elegido el sitio para la disposición final de RC&D, será necesario realizar el levantamiento topográfico que consiste en llevar a cabo un procedimiento para efectuar mediciones y recopilaciones de datos fehacientes sobre y del terreno que se desea representar.

1

### Métodos de levantamientos topográficos

Existen diferentes métodos de levantamientos topográficos para llegar a la obtención del plano topográfico del sitio elegido, los cuales se dividen en directos e indirectos.

2

#### *Levantamientos directos*

Son aquellos en que las mediciones se efectúan sobre el terreno utilizando, por ejemplo, cinta, brújula, tránsito, teodolito, distanciómetro, estación total y niveles fijos con sus aditamentos (Higashida, 1971).

3

En la actualidad, los levantamientos directos son necesarios cuando la vegetación es abundante, en interiores como minas o túneles, en cañadas y cuando las dimensiones son pequeñas, como el caso de un terreno de una vivienda. Estos métodos son aplicables para extensiones de terreno máximo de 30 hectáreas (De Sanjosé *et al.*, 2009).

4

Dependiendo del equipo elegido, varía el método a seguir y se pueden clasificar para este tipo de levantamientos como:

- ❖ Cinta
- ❖ Nivel fijo (nivelación diferencial)
- ❖ Brújula y cinta
- ❖ Tránsito y cinta
- ❖ Teodolito y cinta
- ❖ Teodolito y distanciómetro
- ❖ Estación total
- ❖ Escáner

Del resultado de estos levantamientos, se pueden obtener los siguientes parámetros: la planimetría, los desniveles y la configuración (curvas de nivel).

### ***Los levantamientos indirectos***

Estos levantamientos consisten en la obtención de los datos de una manera tal que no se tiene contacto físico con el terreno, es decir, levantamientos topográficos mediante imágenes tomadas del terreno en cuestión (Russel, 1982).

Estos levantamientos sirven para grandes extensiones de terreno mayores a 30 ha con las limitantes de la vegetación, la nubosidad, acantilados, obras subterráneas y la precisión requerida, ya que esta última depende de la resolución de las imágenes que llegan a tener píxeles desde 10 m hasta 0.5 m, lo cual estaría muy por debajo de la precisión que se obtendría con los métodos directos. Este tipo de levantamiento topográfico es útil para grandes extensiones de terreno o para la representación de elementos inaccesibles (Bannister, 2004).

Las imágenes tomadas se clasifican de acuerdo con la forma en que fueron obtenidas como imágenes satelitales, imágenes fotogramétricas o imágenes obtenidas con vehículo aéreo no tripulado (VANT).

1

2

3

4

Con este tipo de levantamiento, se puede obtener:

- ❖ **Ortofotografía:** imagen rectificadas y georreferenciadas con coordenadas conocidas para cada punto, combinando la calidad gráfica de una foto con las propiedades geométricas de un plano (Schenk, 2002).
- ❖ **MDT:** modelo digital del terreno es una representación en 3D de su superficie (Mena, 1992).
- ❖ **Cartografía base (georreferenciación):** es aquella que se realiza de acuerdo con una norma cartográfica establecida por el estado, y se obtiene por procesos directos de observación y medición de la superficie terrestre (Mena, 1992).

Estos métodos sirven tanto para hacer planimetría como altimetría y planimetría simultánea:

- ❖ **Planimetría.** Consiste en proyectar sobre un plano horizontal los elementos de la cadena o poligonal sin considerar su diferencia de elevación (Russel, 1999).
- ❖ **Altimetría.** Estudia las diferencias de elevación de los puntos sobre la superficie terrestre, dando su posición relativa o absoluta, proyectado sobre un plano vertical y referido a un plano de comparación cualquiera o a una superficie de comparación como el nivel medio del mar (Russel, 1999).
- ❖ **Planimetría y altimetría simultánea.** Estudia los métodos y procedimientos de medición y representación gráfica de los elementos que componen los detalles y elevaciones simultáneamente (Russel, 1999).

## Actividades que se realizan después del estudio topográfico

Los datos obtenidos en campo requieren de un posproceso para poder representarlos gráficamente. Esto depende del método elegido con el cual se realizó el levantamiento del sitio destinado a la disposición final de RC&D.

A continuación, se describen los posprocesos de acuerdo con cada método de levantamiento topográfico mencionados con anterioridad:

- ❖ **Cinta.** Un levantamiento mediante este método requiere realizar una serie de cálculos después de haber sido medidos todos los lados de los triángulos trazados en el terreno con el fin de poder propagar las coordenadas a partir de uno de sus vértices y los ángulos y azimuts calculados de cada lado. Las coordenadas servirán para elaborar el dibujo del plano (Torres, 1995).
- ❖ **Nivel fijo (nivelación diferencial).** Después de haber efectuado la nivelación diferencial, se debe hacer el ajuste correspondiente y reasignar las elevaciones ajustadas a los bancos de nivel establecidos y también a los puntos nivelados sobre el predio (Schmidt, 1997).
- ❖ **Brújula y cinta.** El trabajo que se efectúa después del levantamiento topográfico y que consiste en calcular las coordenadas de los vértices haciendo las correcciones establecidas mediante el denominado “método de la brújula” (Toscano, 1955).
- ❖ **Tránsito y cinta.** El trabajo que se realiza después del levantamiento topográfico y que consiste en calcular las coordenadas de los vértices haciendo las correcciones establecidas en el “método del tránsito” (Toscano, 1955).

❖ **Teodolito y cinta.** El trabajo que se lleva a cabo después del levantamiento topográfico y que consiste en calcular las coordenadas de los vértices haciendo las correcciones establecidas mediante el “método del tránsito” (Schimidt, 1997).

❖ **Teodolito y distanciómetro.** El trabajo que se efectúa después del levantamiento topográfico y que consiste en calcular las coordenadas de los vértices haciendo las correcciones establecidas en el “método del tránsito” (Domínguez, 1993).

❖ **Estación total.** Los cálculos que se llevan a cabo son menores y se refieren a los correspondientes al dibujo topográfico con respecto a la escala del plano que se entregará (Domínguez, 1993).

❖ **Escáner.** Los cálculos son más laboriosos, por lo que el equipo trae consigo su propio software para poder efectuarlos; sin embargo, el hardware debe tener una gran capacidad de memoria gráfica.

❖ **GPS.** Su posproceso requiere, por una parte, de un software especializado incluido en el propio equipo y, por otra, de información de la o las estaciones de referencia, las cuales pueden ser establecidas por el usuario o ligarse a la red geodésica nacional activa del INEGI.

❖ **Imágenes de satélite.** La mayoría del trabajo se realiza en gabinete con software especializado con licencia o libre.

❖ **Fotografías aéreas.** El trabajo en gabinete requiere de equipo y software especializado para obtener resultados en menor tiempo y con mayor precisión.

- ❖ **Imágenes con vehículo aéreo no tripulado.** El trabajo en gabinete requiere de equipo y software muy especializado, a fin de que la precisión del trabajo sea muy alta.

#### 4.4.3 Procedimiento para el vuelo con VANT

Sobre una imagen de satélite y una carta topográfica, se procede a ubicar la zona de vuelo y determinar el área aproximada a levantar. Con apoyo de las imágenes y las cartas, también se visualiza el tipo de terreno y las complicaciones que pudieran presentarse al sobrevolar el área sugerida. Se debe tomar en consideración que los lugares seleccionables deben tener una configuración topográfica de tipo plana, es decir, curvas de nivel muy distantes para poder utilizar el terreno para los fines que se buscó y, en este caso, será para ubicar un sitio de disposición final para RC&D. Es importante definir la equidistancia entre curvas para poder así brindar una representación del terreno lo más fiel posible a la realidad.

Posteriormente a la selección del terreno, se procede a determinar el tipo de drones que se utilizará, así como los parámetros necesarios para realizar el vuelo, como lo son:

- ❖ Altura de vuelo
- ❖ Escala de la imagen
- ❖ Velocidad de recorrido
- ❖ Área cubierta y tiempo de recorrido
- ❖ Velocidad del viento
- ❖ Clima del día a sobrevolar
- ❖ Número de baterías que se requieren

El análisis de todos estos factores permite que el levantamiento sea más eficiente y evita algún contratiempo que se pueda presentar durante el día de vuelo y en el vuelo específico.

Concluyendo con esta etapa, se visita físicamente el terreno para lanzar el dron al vuelo planificado y, de manera paralela a esta actividad, se procede a levantar puntos de apoyo terrestre para dar referencia geográfica a la imagen y brindarle un estimado de precisión, utilizando equipo de GPS de alta precisión mediante el procedimiento RTK.

Sin embargo, este procedimiento requiere de personal experto y preparado para recorrer en campo todo el polígono levantado con el dron. El personal debe ser experto en el manejo de equipo, en la técnica de levantamiento y en la metodología de estos equipos dado que son muy caros y delicados, cualquier mal manejo puede provocar una falla en el sistema, en el equipo; cualquier falla que sea, reduce la precisión en el levantamiento.

Una vez recabada la información, se procede a generar los productos finales mediante un software de proceso y una computadora de alto rendimiento. Debido a que los procedimientos para obtener los productos finales requieren demasiados recursos computacionales, los productos finales generados son los siguientes:

- ❖ Modelo digital de terreno
- ❖ Modelo digital de elevaciones
- ❖ Ortofoto verdadera escala 1:5000
- ❖ Curvas de nivel con equidistancia a 0.5 m
- ❖ Reporte de procedimiento
- ❖ Planos en digital y papel

Cabe mencionar que, para la selección del método de levantamiento que se utilizará, se deben considerar los siguientes aspectos:

- ❖ Tamaño del predio
- ❖ Vegetación
- ❖ Accesibilidad
- ❖ Tiempo
- ❖ Precisión
- ❖ Escala del plano

## 4.5 Estudios de geología

Los estudios geológicos se enfocan en el conocimiento de la superficie terrestre, lo que implica comprender su origen, forma y evolución. Para lograrlo, es necesario, en primera instancia, desarrollar un análisis previo mediante un reconocimiento preliminar (trabajo de gabinete), el cual consiste en recopilar información geológica disponible (topografía, cartografía geológica, imágenes de satélite, artículos en boletines, revistas y publicaciones de índole geológica).

En segunda instancia, después de la etapa de reconocimiento preliminar, llevar a cabo el trabajo de campo mediante actividades de exploración e investigación detalladas, en el que se determina la geología del área en estudio y el entorno de esta. La información geológica de los estudios realizados en el país puede consultarse en diversos portales electrónicos de diferentes instituciones gubernamentales y universidades nacionales; los mapas geológicos pueden estudiarse utilizando la percepción remota.

1

2

3

4

#### 4.5.1 Reconocimiento preliminar y recopilación de información geológica

En esta etapa, se recopila y analiza la información geológica publicada. El Servicio Geológico Mexicano (SGM) cuenta con la cartografía del país a escala 1:250 000 y monografías geológico-mineras para cada estado de la república mexicana; además, se puede consultar la litología, geología estructural y un mapa geológico estatal (Servicio Geológico Mexicano, 2016).

Por otra parte, el Instituto de Geología de la UNAM difunde el *Boletín de la Sociedad Geológica* en el cual se publican investigaciones en torno a la geología del país. Un ejemplo fue la publicación de la litología, estratigrafía, mapa geológico y secciones geológico-estructurales del pozo profundo San Lorenzo Tezonco y sus alrededores al sur de la Cuenca de México. Esta información geológica se puede consultar en los portales electrónicos institucionales.

Para la realización de un estudio geológico es indispensable, en primer término, la recopilación de información geológica documental en la región del país en donde se localice el área en estudio, como lo es la litología, estratigrafía, geología estructural (fallas y fracturas) y un mapa geológico base.

En segundo término, a nivel regional, se puede buscar información en instituciones gubernamentales, como las siguientes:

- ❖ El Servicio Geológico Mexicano (SGM) publicó, en 2007, la Carta Geológica de la República Mexicana a **escala 1:2 000 000**, en la cual se puede consultar la litología de nuestro país, acompañada de un texto explicativo que indica la distribución de la litología en el país, así como los rasgos estructurales más importantes en México;

1

2

3

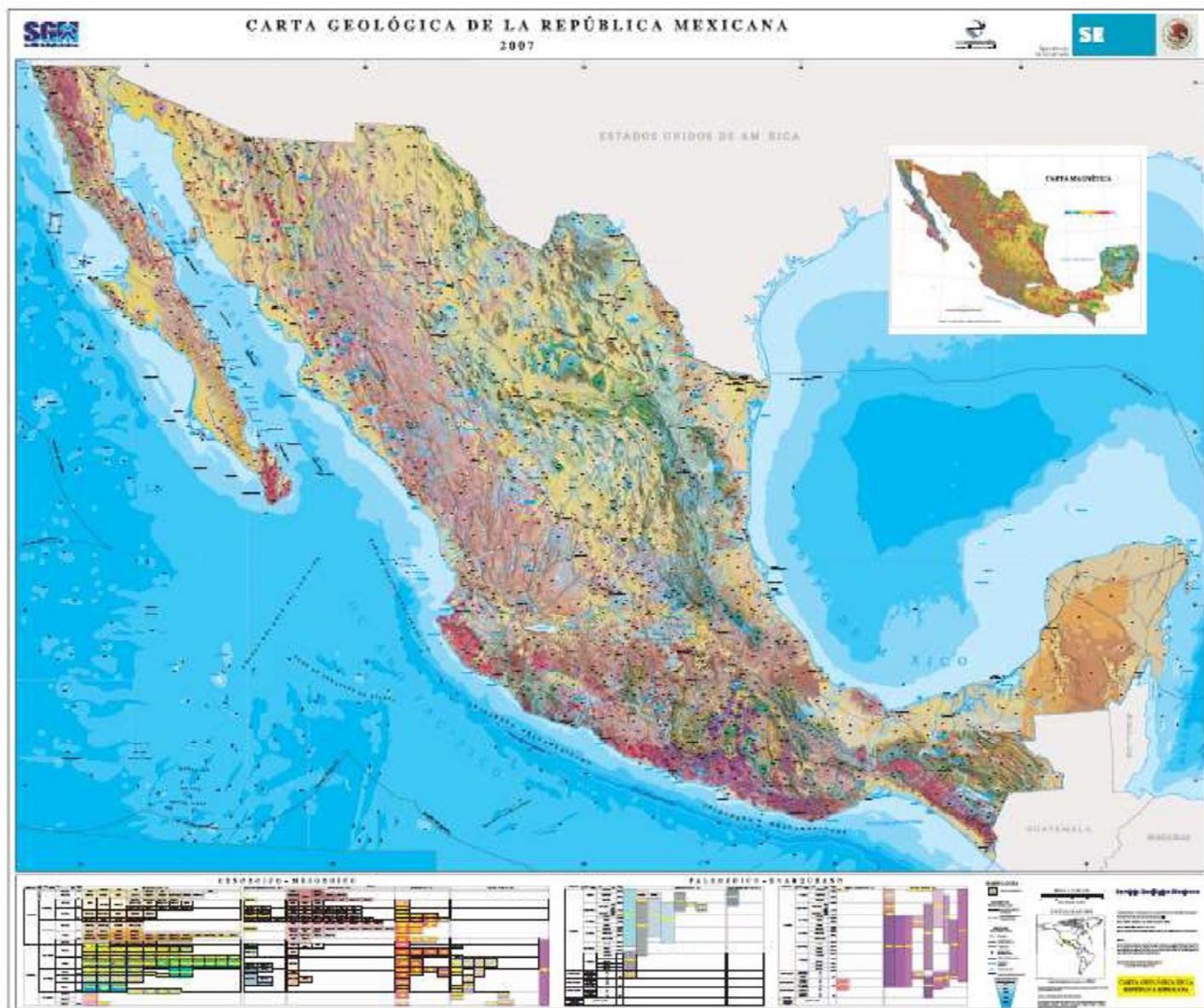
4

además, nos ayuda a comprender la geología de una determinada región y nos presenta referencias bibliográficas que pueden apoyar en un estudio geológico a mayor detalle (**figura 16**).

- ❖ El Mapa Geológico de México a **escala 1 : 2 000 000** fue realizado por el Instituto de Geología de la UNAM en colaboración con el Consejo de Recursos Minerales en 1992, como se muestra en la **figura 17**.

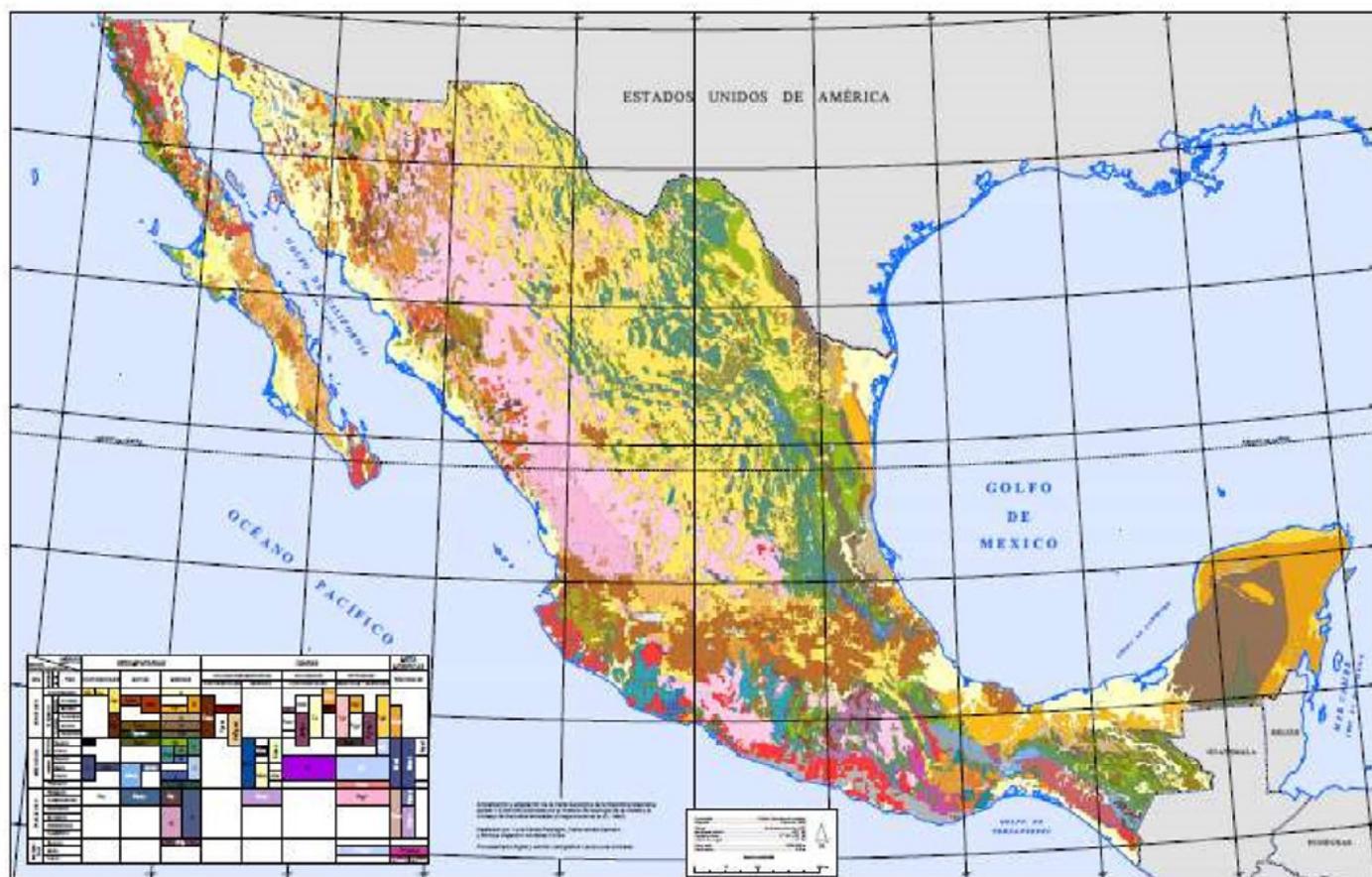
Sin embargo, resalta a la vista que la geología de México es diversa. Si el área de estudio es del orden de decenas de hectáreas, es necesario apoyarse de cartografía a semidetalle que está dispuesta en cartas geológicas-mineras a **escala 1 : 250 000**, editadas por el SGM. Existe un total de 119 cartas geológicas-mineras que comprenden todo el territorio nacional. Se muestra como ejemplo la Carta Geológica-Minera de la Ciudad de México (**figura 18**).

Para un estudio geológico con el detalle que se requiere para emplazar un sitio de disposición final y residuos de la construcción (RC&D), existe una base cartográfica a **escala 1 : 50 000** editada por el INEGI. Asimismo, se cuenta con la cartografía topográfica que cubre todo el país; sin embargo, aún no está cubierta la totalidad la cartografía geológica del territorio mexicano, aunque para las ciudades importantes, como la Ciudad de México, existe la geología a detalle, que corresponde a la carta con clave E14 A39, editada en 1978 (**figura 19**).



**Figura 16.** Carta Geológica de la República Mexicana del Servicio Geológico Mexicano  
Fuente: Instituto de Geología, UNAM

MAPA GEOLÓGICO DE MÉXICO



**Figura 17.** Mapa Geológico de México  
Fuente: Instituto de Geología, UNAM





El objetivo de la etapa de recopilación de información geológica es obtener la mayor cantidad de información, derivada de estudios desarrollados en el área de estudio o cercanos a ella. Para ello, se recurre a instituciones gubernamentales y universidades que dispongan de información, la cual se analiza y se sintetiza para obtener datos precisos acerca del origen geológico, litología, estratigrafía y fenómenos asociados a la geodinámica (sismicidad, presencia de fallas y fracturas). Posteriormente, se realiza un reconocimiento preliminar al área en estudio para evaluar la información geológica recopilada y fundamentar un programa de exploración y de investigación detallada en el área de interés. Como producto se tendrá un informe geológico preliminar del sitio RC&D.

#### 4.5.2 Exploración e investigación geológica a detalle

El objetivo en esta etapa es determinar y comprender la geología del área en estudio y de su entorno, por lo tanto, la extensión de los trabajos de geología en el sitio seleccionado dependerá de las dimensiones del sitio de RC&D, de tal manera que el informe geológico pueda utilizarse para fines de diseño. A continuación, se explican las actividades que se realizan durante esta etapa.

##### Elaboración de un mapa geológico

Se considera la superficie del terreno del área en estudio del sitio de RC&D a una escala adecuada. En un primer acercamiento, la elaboración se apoya con imágenes de satélite que cubran la superficie total y los alrededores del sitio en estudio, con la finalidad de tener información geológica a nivel local, primordialmente para el conocimiento de cambios en las unidades de roca o suelos.

A manera de sugerencia, se propone desarrollar la cartografía geológica de la región de la siguiente forma:

En terrenos de hasta de 20 hectáreas, a escala **1:10 000**

En terrenos mayores de 20 hectáreas, a escala **1:20 000**

Es importante mencionar que, para la generación de la cartografía geológica, es válido apoyarse en la herramienta de la percepción remota.

**Definición de la litología y estratigrafía.** Se define mediante la obtención de muestras de las diferentes unidades de suelo y roca, que sean representativas para su descripción y realización de pruebas *in situ*, con el propósito de conocer su clasificación y origen geológico, seleccionar algunas muestras para su análisis posterior en laboratorio y así determinar su mineralogía y petrología.

La litología comprende tanto el estudio de suelos como de rocas. De acuerdo con la definición de Terzaghi (1967), los suelos son aquellos agregados naturales de partículas que pueden ser disgregados por agentes mecánicos, como la agitación en agua. En cambio, las rocas son agregados naturales de partículas minerales unidas firmemente por fuerzas cohesivas permanentes. De tal manera que es necesario determinar las unidades de roca y suelo presentes en el área de estudio donde se emplazará el sitio de RC&D.

**Suelos.** La clasificación de los suelos debe realizarse en el sitio de estudio de manera macroscópica. Se determina su espesor, distribución y posición estratigráfica mediante un perfil de campo que muestre los diferentes tipos de suelo con sus respectivos espesores (que pueden variar desde milímetros hasta varios metros). Se colectan muestras repre-

1

2

3

4

representativas de los suelos y, posteriormente, son analizadas en el laboratorio, en donde el objetivo es realizar su clasificación de acuerdo con el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS); adicionalmente, se determinan sus propiedades índice y el origen del suelo en estudio (CFE, 1981).

En laboratorio, la muestra se prepara para cribarla mediante los tamices que presentan diversas aberturas en las mallas con el objetivo de separar los sedimentos del suelo en función del tamaño de la partícula, y después clasificarlos de acuerdo con el SUCS. En la **figura 20**, se muestra una clasificación con diferentes criterios, que varía desde las gravas (G), arenas (S), limos (M) hasta las arcillas (C), y considera la turba y suelos orgánicos (P).

**Rocas.** La clasificación y distribución de las diferentes unidades de rocas se verifica (en caso de existir información geológica preliminar) y se realiza en aquellos sitios en donde se encuentren las rocas expuestas en la superficie del terreno. Primero, se efectúa un reconocimiento en toda la superficie del sitio de RC&D con la finalidad de conocer cuántos tipos de unidades de rocas afloran; posteriormente, se realiza un muestreo de cada roca para elaborar una clasificación macroscópica de la muestra considerando su origen; se colectan muestras representativas de las diferentes unidades de roca con el objetivo de analizar su mineralogía y petrología para determinar clasificación y origen.

Las rocas se clasifican en tres grupos: ígneas, sedimentarias y metamórficas. En la **figura 21**, se aprecia la clasificación de las rocas de acuerdo con su origen (Ruiz, 2000).

**SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (S.U.C.S.)**  
INCLUYENDO IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN

DIVISIÓN MAYOR		SÍMBOLO	NOMBRES TÍPICOS	CRITERIO DE CLASIFICACIÓN EN EL LABORATORIO		
SUELOS DE PARTICULAS GRUESAS Más de la mitad del material es retenido en la malla número 200 @	ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla No. 4 PARA CLASIFICACION VISUAL PUEDE USARSE 1/2 em. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA No. 4	GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por la malla No. 4	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos	<p>COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD Cu: mayor de 4. COEFICIENTE DE CURVATURA Cc: entre 1 y 3. <math>Cu = D_{60} / D_{10}</math>      <math>Cc = (D_{30})^2 / (D_{10}(D_{60}))</math></p> <p>NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS DE GRADUACIÓN PARA GW.</p> <p>LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LÍNEA A" O I.P. MENOR QUE 4.</p> <p>LÍMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA "LÍNEA A" CON I.P. MAYOR QUE 7.</p> <p><math>Cu = D_{60} / D_{10}</math> mayor de 6 ; <math>Cc = (D_{30})^2 / (D_{10}(D_{60}))</math> entre 1 y 3.</p> <p>No satisfacen todos los requisitos de graduación para SW</p> <p>LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LÍNEA A" O I.P. MENOR QUE 4.</p> <p>LÍMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA "LÍNEA A" CON I.P. MAYOR QUE 7.</p>	
			GP	Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos		
		GRAVA CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	* d u	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo		
			GC	Gravas arcillosas, mezclas de gravas, arena y arcilla		
		ARENA LIMPIA Poco o nada de partículas finas	SW	Arenas bien graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.		
			SP	Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.		
	ARENA CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	* d u	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.			
		SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla.			
	SUELOS DE PARTICULAS FINAS Más de la mitad del material pasa por la malla número 200 @	LIMOS Y ARCILLAS Limite Líquido menor de 50	ML	Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos.		<p>G – Grava, S – Arena, O – Suelo Orgánico, P – Turba, M – Limo C – Arcilla, W – Bien Graduada, P – Mal Graduada, L – Baja Compresibilidad, H – Alta Compresibilidad</p> <p align="center"><b>CARTA DE PLASTICIDAD (S.U.C.S.)</b></p>
			CL	Arcillas inorgánicas de baja o media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres.		
			OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.		
		LIMOS Y ARCILLAS Limite Líquido Mayor de 50	MH	Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomáceos, más elásticos.		
CH			Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas.			
OH			Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad.			
SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS	P	Turbas y otros suelos altamente orgánicos.				

\*\* CLASIFICACIÓN DE FRONTERA- LOS SUELOS QUE POSEAN LAS CARACTERÍSTICAS DE DOS GRUPOS SE DESIGNAN CON LA COMBINACIÓN DE LOS DOS SÍMBOLOS. POR EJEMPLO GW-GC, MEZCLA DE ARENA Y GRAVA BIEN GRADUADAS CON CEMENTANTE ARCILLOSO.

@ TODOS LOS TAMAÑOS DE LAS MALLAS EN ESTA CARTA SON LOS U.S. STANDARD.

\* LA DIVISIÓN DE LOS GRUPOS GM Y SM EN SUBDIVISIONES d y u SON PARA CAMINOS Y AEROPUERTOS ÚNICAMENTE. LA SUB-DIVISIÓN ESTA BASADA EN LOS LÍMITES DE ATTERBERG EL SUFJO d SE USA CUANDO EL L.L. ES DE 28 O MENOS Y EL I.P. ES DE 6 O MENOS. EL SUFJO u ES USADO CUANDO EL L.L. ES MAYOR QUE 28.

Figura 20 . Clasificación del suelo de acuerdo con el SUCS

**Figura 21.** Clasificación de las rocas de acuerdo con su origen

Fuente: Ruiz, 2000



**Rocas ígneas.** Se forman a partir del enfriamiento del magma y constituyen la mayor parte de la corteza terrestre. Los magmas pueden enfriar de manera rápida en la superficie de la Tierra mediante la actividad volcánica, lo cual origina rocas volcánicas y material piroclástico. Sin embargo, pueden cristalizar lentamente en el interior y producir grandes masas de rocas llamadas plutónicas, y cuando cristalizan en fallas de la corteza forman las rocas ígneas filonianas (Cepeda, 1993).

La textura de las rocas ígneas es fundamental para su clasificación. La textura se define como la apariencia general de la roca que incluye los aspectos geométricos de sus componentes, así como sus relaciones mutuas que indican el ambiente en que se originó la roca ígnea. La textura es el resultado de los procesos de enfriamiento y cristalización del magma (Cepeda, 1993).

Para la clasificación de las rocas ígneas, se consideran los siguientes parámetros: textura (grano grueso o grano fino), contenido de sílice en la roca, tiempo de enfriamiento del magma: rápido para las rocas volcánicas y lento para las rocas plutónicas o intrusivas. En la **figura 22**, se muestra la clasificación de las rocas ígneas.

Rocas	Plutónicas (grano grueso)							
		Granito	Sienita	Diorita	Gabro	Peridotita		
		Volcánicas (grano fino)					Son muy poco frecuentes con estas características	
			Riolita	Traquita	Andesita	Basalto		
			Color		Predominan minerales claros			Predominan minerales oscuros
	Composición		Química	Altas en sílice		Bajas en sílice		
		Bajas en Fe y Mg		Altas en Fe y Mg				
		Míneal	Cuarzo	Feldespato	Silicatos ferromagnesianos			

**Figura 22.** Clasificación de las rocas de origen ígneo  
Adaptada de: [www.e-educativa.ecadatu.es](http://www.e-educativa.ecadatu.es)

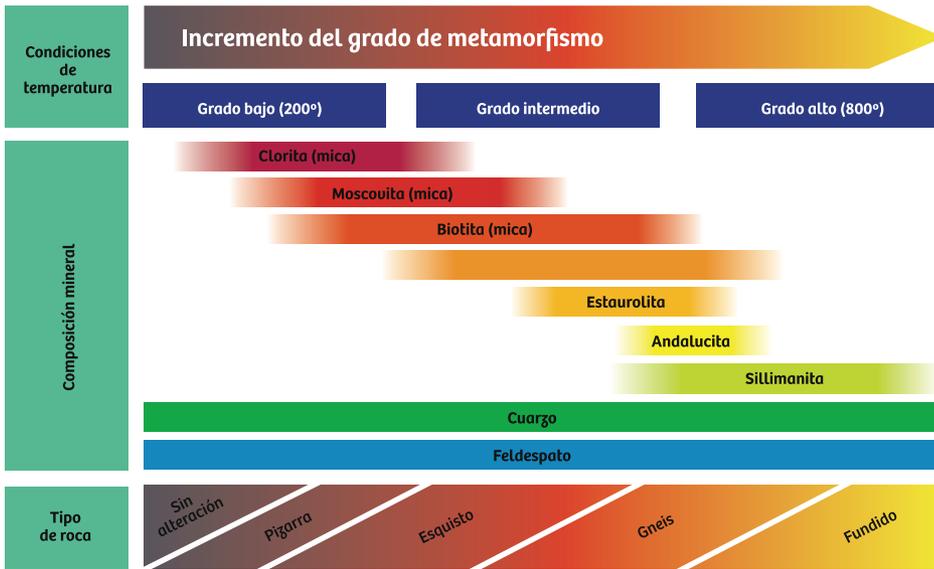
**Rocas volcánicas o extrusivas.** De acuerdo con el contenido de sílice, se clasifican en riolita (alto contenido de sílice y presencia de minerales en tonos claros), traquita, andesita y basalto (el cual tiene la menor cantidad de sílice y aumento de fierro y magnesio, y presenta un tono oscuro).

**Rocas plutónicas o intrusivas.** Se consideran las siguientes: granito (alto contenido de sílice y presencia de minerales en tonos claros), sienita, dorita, gabro y peridotita (estas últimas contienen la menor cantidad de sílice con aumento de fierro y magnesio, y presentan un tono oscuro).

**Rocas metamórficas.** Se forman a partir de otras rocas que, sin llegar a fundirse, han estado sometidas a grandes presiones y temperaturas en la litósfera, cambiando su apariencia, es decir, se han transformado (Mason, 1990).

Según su aspecto externo, las rocas metamórficas se clasifican en dos tipos: laminares y cristalinas. En las rocas metamórficas laminares, durante el metamorfismo, algunos minerales de arcilla originan cristales de mica blanca y negra que son laminares, los cuales suelen separarse en láminas al romperse. En cambio, las rocas metamórficas cristalinas no presentan láminas, sino que son homogéneas, se rompen de forma irregular sin separarse de las láminas (Mason, 1990).

Así pues, conforme aumenta el grado de metamorfismo, cambiará el aspecto de la roca, debido a que se encuentra sujeta a la variación en las condiciones de presión y temperatura en el subsuelo, como se ilustra en la **figura 23**.



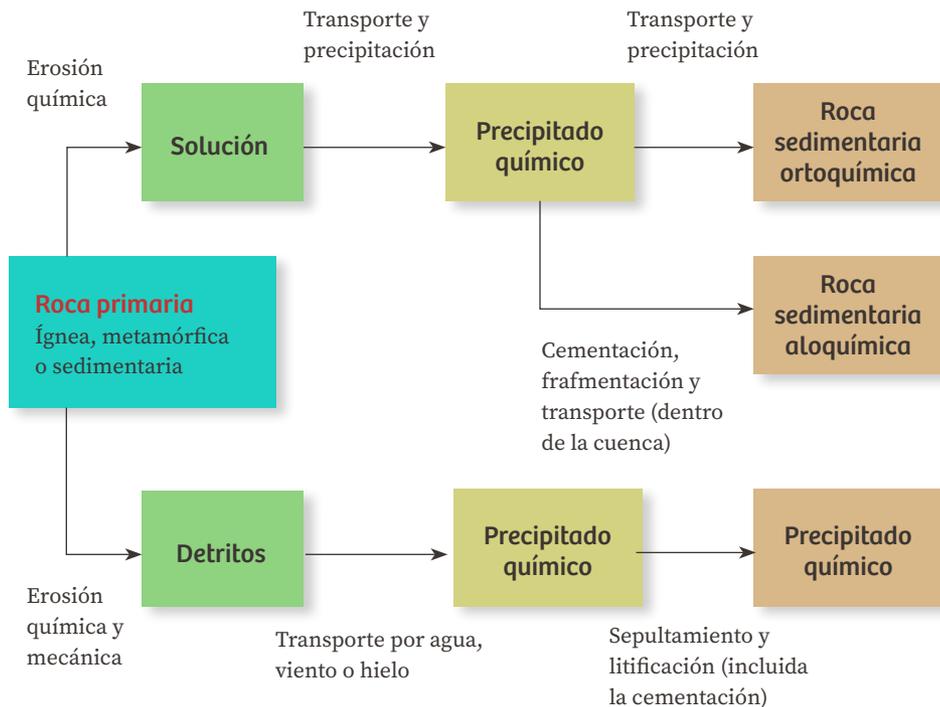
**Figura 23.** Clasificación de las rocas metamórficas

Fuente: [www.e-educativa.ecadatu.es](http://www.e-educativa.ecadatu.es)

Las rocas metamórficas representativas son las siguientes: pizarra, esquisto y gneis. En estas va aumentando el grado de metamorfismo de la primera a la última.

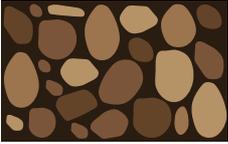
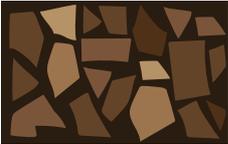
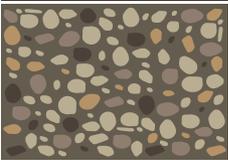
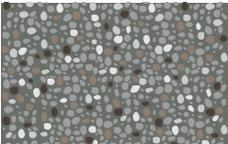
**Rocas sedimentarias.** Se dividen en dos grupos: las detríticas y las de origen químico. Las detríticas, también llamadas clásticas, se originan a partir de detritos o sedimentos provenientes de otras rocas y se encuentran en zonas superficiales de la corteza por dos agentes: el agua y el viento. Los sedimentos son transportados y, posteriormente, depositados formando capas o estratos (Vidal, 2009).

El grupo de origen químico y orgánico se forma a partir de precipitación de compuestos químicos (sales y  $\text{CaCO}_3$ ) o acumulación de restos de seres vivos antiguos (fósiles). En la figura 24, se muestra un esquema diagramático detallado que ilustra los procesos de la formación de las rocas sedimentarias.



**Figura 24.** Diagrama esquemático que muestra la formación de rocas sedimentarias detríticas o clásticas y las rocas de origen químico y bioquímico

Las rocas sedimentarias detríticas o clásticas se clasifican de acuerdo con el tamaño de la partícula o sedimento. El sedimento mayor a 2 mm de tamaño con clastos redondeados, ya litificado (proceso en que pasa de ser sedimento a roca), se llama conglomerado; en cambio, si los clastos son angulosos, la roca se denomina brecha. Para sedimento con tamaño de 1 mm a 1/16 mm (arenas de grano grueso variando arenas muy finas), cuando se litifica recibe el nombre de arenisca. Finalmente, para las partículas más finas, la partícula de tamaño (1/16 a 1/64 mm) se llama limo y cuando se litifica, limolita; en cambio, la partícula de tamaño de la arcilla (menor a 1/256 mm) cuando se litifica se denomina lutita. En la **figura 25**, se ilustra el tamaño de los sedimentos para las rocas detríticas.

Rocas sedimentarias detríticas			
Textura clástica Tamaño del clasto		Nombre del sedimento	Nombre de la roca
Grueso (más de 2 mm)		Grava (clastos redondeados)	Conglomerado
		Grava (clastos angulosos)	Brecha
Medio (de 1/16 a 2 mm)		Arena (Si el feldespato es abundante la roca se denomina arcosa)	Arenisca
Fino (de 1/16 a 1/256 mm)		Limo	Limolita
Muy fino (menos de 1/256 mm)		Arcilla	Lutita

**Figura 25.** Clasificación de rocas sedimentarias detríticas o clásticas  
Fuente: <http://cienciasdelatierra2010>

Por otra parte, las rocas sedimentarias de origen químico y orgánico son representativas de ambientes sedimentarios marinos. Las rocas más conocidas son las calizas constituidas por  $\text{CaCO}_3$  y las dolomías constituidas por  $(\text{Ca}, \text{Mg}) \text{CO}_3$ , así como las rocas constituidas por sales en las que se encuentran la halita, yeso y carnalita, y una subdivisión son las rocas sedimentarias de origen orgánico representados por las rocas carbonosas, como se muestra en la **tabla 42**.

**Tabla 42** Clasificación de las rocas químicas y orgánicas

Origen	Naturaleza	Sedimento consolidado
Químico	Calcárea	Caliza, dolomía, travertino
	Calcárea-arcillosa	Marga
		Pedernal, geiserita
	Silicona	Sal, yeso, bórax
Salina (evaporitas)		
Orgánico	Carbonasa (% de C libre)	Turba C > 50 %: carbón compresible y de formación reciente
		Lignito C $\approx$ 50 %: carbón de formación inmediata
		Hulla C $\approx$ 75 %: carbón fósil o mineral Antracita C > 80 %: carbón ultracarbonizado

**Estratigrafía.** El término *estratigrafía*, que proviene del latín *stratum* y del griego *graphia*, alude etimológicamente a la “ciencia que trata de la descripción de las rocas estratificadas” (James Hutton, 1785).

La *estratigrafía* es la ciencia que trata del estudio e interpretación de los estratos (de cualquier litología), sus relaciones espaciales en sentido vertical y horizontal (correlación de las unidades *estratigráficas*) y sus relaciones temporales (edad de la roca).

Los objetivos de la *estratigrafía* son los siguientes: identificación de los materiales, delimitación de unidades *litoestratigráficas*, ordenación relativa de las unidades (mediante la elaboración de columnas y secciones *estratigráficas*), interpretación genética de las unidades, levantamiento de secciones *estratigráficas* y su correlación *estratigráfica*.

Dentro de las actividades de índole geológica para el emplazamiento de un sitio de RC&D, es necesario determinar la estratigrafía en la superficie de estudio mediante la realización de una columna estratigráfica, que define cómo se depositaron las diferentes unidades de roca y suelo. Se miden los espesores de las rocas y suelos presentes en el subsuelo, en la base quedará ubicada la unidad de roca o suelo más antigua, y en la cima de unidades de roca o suelo más reciente. Debe precisarse que la edad para los suelos se mide en miles de años y para las rocas la escala varía desde miles de años hasta millones de años.

La estratigrafía, además, nos ayuda a definir el espesor, distribución y posición en la secuencia de las diferentes unidades de roca y suelo presentes en el sitio de RC&D, a fin de comprender cómo ha sido la evolución histórica de las rocas y suelos en el área de estudio desde el punto de vista geológico.

Es común denominar a una unidad de roca con el nombre de “formación geológica” si cumple con las siguientes consideraciones: tiene asignada una localidad tipo donde se encuentra expuesta la roca ampliamente, se conoce su espesor que fue medido desde la base hasta su cima (en metros o kilómetros), así como la clasificación detallada de la roca (mineralogía y petrología), y finalmente, si es conocida su distribución espacial y temporal. Un ejemplo es la formación Tarango, constituida por rocas volcánicas expuestas en el Estado de México, Hidalgo y en la zona poniente del Distrito Federal (Lugo Hubp *et al.*, 1995).

## Geología estructural y discontinuidades

Para una mejor comprensión del comportamiento del sitio de RC&D, se necesitan reconocer las estructuras geológicas y discontinuidades de

las rocas y suelos, como son fallas, fracturas, diaclasas, planos de estratificación, pliegues y discordancias. A continuación, se describen estas estructuras y discontinuidades geológicas haciendo énfasis en las características que deben considerarse en el área de estudio.

**Falla.** Es una estructura geológica donde existe un rompimiento y desplazamiento apreciable de las rocas en la corteza terrestre (Arellano, 2002). Estos accidentes tectónicos pueden ser de diferentes longitudes, que llegan a medir hasta decenas de kilómetros, según la edad. Desde luego, también es necesario determinar si una falla es activa, es decir, que la falla se ha movido en el pasado geológico, en el reciente y que puede moverse en el futuro. Las fallas pueden generar terremotos a lo largo de su extensión y causar daño y destrucción de estructuras civiles construidas sobre o cercanas a estas, debido a la energía liberada proveniente del subsuelo. Un ejemplo de una falla activa es la de San Andrés.

Los datos estructurales que se deben recopilar en el área de estudio son los siguientes: orientación (rumbo y buzamiento), longitud (del orden de metros hasta kilómetros), desplazamiento neto de la falla (centímetros, metros y decenas de metros) y, de ser posible, sus componentes del desplazamiento, tipo de material de relleno en la falla y en la pared (determinar si es lisa, alabeada, rugosa, con presencia de estrías o relieves), edad geológica (reciente, antigua) y determinar si es activa o inactiva, el estado mecánico, es decir, si se trata de falla tensional, compresional o de cizalla y, finalmente, la clasificación de la falla: si es normal, inversa o de transcurrencia (Arellano, 2002).

**Fractura.** Término que se aplica comúnmente para cualquier ruptura en la roca sin presentar desplazamiento, originado por esfuerzos de tensión. Las fracturas, por lo general, presentan aberturas del orden de milímetros a centímetros. El fracturamiento en las rocas es una ma-

nifestación de la intensidad y dirección de los movimientos tectónicos (Ramsay, 1997).

Para determinar el comportamiento de las fracturas en un sitio en estudio, se realiza la toma de los datos de su orientación (rumbo y buzamiento) y localización de cada fractura georreferenciados a un mapa geológico; posteriormente, con la cuantificación de los datos estructurales obtenidos en las fracturas, se determinan los patrones de fracturamiento con la ayuda de la roseta de fracturas y su densidad. Un dato importante es determinar si presenta relleno la abertura en las fracturas y qué tipo de material es desde el punto de vista mineralógico.

**Diaclasas.** Son fracturas originadas por un súbito enfriamiento en las rocas de ígneas, generalmente son más o menos verticales, mediante las cuales no ha ocurrido un movimiento apreciable, se estudian de la misma manera que las fracturas (Ramsay, 1997).

**Discordancias.** Son accidentes estructurales que presentan ausencia de correspondencia entre unidades de roca, con presencia o ausencia de plegamiento, horizontales, inclinadas y verticales, de modo que expresan diversos ángulos. Las discordancias son evidencias de que han existido movimientos tectónicos, períodos de erosión en las rocas y también posterior depósito por procesos de sedimentación. Las discordancias pueden corresponder a zonas de debilidad y que, por lo general, corresponden a cambios notables en la litología (Ramsay, 1997).

**Modelo geológico del subsuelo.** Una vez definida la distribución espacial y de las unidades de roca y suelo en el sitio del RC&D, se cuenta con información geológica suficiente y conocimiento no solo de la litología, sino también de las estructuras existentes; sin embargo, este conocimiento es certero en superficie, pero hipotético en el subsuelo. Por

esta razón, es necesario llevar a cabo actividades complementarias que permitan corroborar el modelo geológico supuesto a profundidad en el subsuelo.

En este sentido, la forma más exacta de obtener información complementaria es con la perforación de pozos, que permite obtener muestras de la litología (suelos y rocas) del material extraído en el subsuelo; sin embargo, tiende a ser una limitante, ya que la información es puntual y tendrían que perforarse una gran cantidad de pozos para tener un buen conocimiento horizontal y vertical del subsuelo. La solución a esta problemática ha sido emplear métodos indirectos que, de forma rápida y económica, permiten lograr un modelo más preciso del subsuelo. Estos métodos son conocidos como métodos de prospección geofísica.

Algunos de los métodos de prospección geofísica más conocidos que suelen emplearse son los siguientes:

- ❖ **Método sísmico:** se basa en determinar los tiempos de recorrido de las ondas primarias (P) y secundarias (S) en el subsuelo, desde un punto conocido (fuente sísmica) hasta una serie de receptores (geófonos), localizados a lo largo de una línea de adquisición de datos. El resultado obtenido con el método sísmico permite que los estratos de diferentes tipos de roca en el subsuelo pueden ser medidos y definidos mediante la determinación de la velocidad de la onda (metros/segundo) medida en una unidad de roca (Del Valle Toledo, 86).
- ❖ **Método eléctrico resistivo:** determina las variaciones que generan las propiedades eléctricas de las rocas y minerales, especialmente su resistividad, mediante la inducción de un campo artificial eléctrico creado en superficie al hacer pasar una corriente eléctrica en

el subsuelo. De tal manera que se pueden interpretar los cambios que se producen en el subsuelo, como presencia de agua subterránea o al contenido mineralógico que presentan las unidades de roca; es decir, el método utiliza la distribución del subsuelo en términos de homogeneidad, basados en la caracterización de la resistividad (Del Valle Toledo, 86).

- ❖ **Método electromagnético:** se emplea cuando se desea conocer la distribución de la resistividad eléctrica con la profundidad. La trayectoria de la profundidad de la corriente se usa para estimar la profundidad; es decir, los voltajes de corta duración proveen información de la resistividad de las capas superficiales y los de mayor duración proporcionan la resistividad de las capas situadas a mayor profundidad (Consultores en Ingeniería Geofísica [CIGSA], 2000).
- ❖ **Método gravimétrico:** consiste en la medición de la aceleración de la gravedad en una superficie, con el objetivo de detectar las variaciones de la densidad en las unidades de roca en el subsuelo (CIGSA, 2000).

Los resultados de los estudios geofísicos en el subsuelo y su correlación con la exploración geológica en superficie establecen un modelo geológico acoplado en la superficie y en el subsuelo, el cual se calibra a través de los cortes litológicos obtenidos con la perforación de algunos pozos.

De esta forma, las secciones geoelectricas y sísmicas realizadas durante la fase de interpretación geofísica son fácilmente calibradas y transformadas en secciones geológicas, lo que permite establecer un modelo geológico a detalle en el sitio de estudio en el cual se muestra la distribución geométrica de las unidades de roca y suelos, así como los espesores de las unidades de roca en el subsuelo.

La información geológica obtenida de las actividades anteriores dará como resultado un mapa de las secciones geológicas representativas que muestran la distribución en el subsuelo de las diferentes unidades de suelo y roca con la finalidad de que sea de máxima utilidad en el diseño del sitio de RC&D.

### **4.5.3 Evaluación geológica por la presencia de fallas y fracturamiento en un sitio para RC&D y de su entorno**

En México, la geología es diversa y, por ende, el comportamiento de las unidades de roca en el subsuelo dependerá de los esfuerzos a los que se encuentran sometidas considerando la teoría de la tectónica de placas.

Por este motivo, en un estudio geológico, es necesario considerar la presencia de fallas (determinar si se trata de una falla activa o inactiva) y su área de influencia a nivel regional, ya que la existencia de estas discontinuidades geológicas no se puede omitir en una obra civil; al contrario, habrá que cartografiarlas y georreferenciarlas en el mapa geológico elaborado para el estudio, en el caso particular, para el emplazamiento de un sitio para RC&D y de su entorno. Esto es esencial, puesto que las fallas se encontrarán rompiendo y desplazando la secuencia estratigráfica de las unidades de roca desde la superficie hasta el subsuelo, y esta situación puede ocasionar la presencia de sismicidad (liberación de energía debido a que las unidades de roca están sometidas a esfuerzos) durante un tiempo indefinido.

Asimismo, la existencia de fallas en una obra civil puede propiciar inestabilidad en el subsuelo a causa de movimientos diferenciales frecuentes y presentar aberturas en las unidades de roca fácilmente observa-

bles y medibles en la superficie del terreno en donde se consideraría emplazar la obra civil.

Por otra parte, la presencia de fallas en un sitio de RC&D funcionaría como un conducto natural para la migración de contaminantes y lixiviados en los planos de la falla (con solo centímetros de abertura), desde la superficie del terreno hasta decenas de metros en el subsuelo. Es fundamental definir la presencia de fallas y, en caso de presentarse, tratar de evitar en lo posible el asentamiento de un sitio de RC&D.

Dado que hasta el momento no existe un mecanismo mediante el cual se pueda pronosticar el comportamiento de las fallas, solo se pueden monitorear, como el caso de la falla de San Andrés, que durante décadas ha propiciado una serie de terremotos que han afectado obras civiles de todo tipo en el estado de California.

En lo que respecta al fracturamiento presente en los suelos y rocas, es indispensable la evaluación de su intensidad en un área donde se pretenda emplazar un sitio de RC&D, además de tener conocimiento de la continuidad del fracturamiento en el subsuelo y de su abertura en la fractura. El fracturamiento en suelos y rocas es un reflejo de la manifestación de los eventos tectónicos en un sitio.

En nuestro país, las rocas presentan generalmente fracturamiento, por lo que se debe cuantificar su intensidad y su orientación para determinar el comportamiento y los patrones en que se orientan las fracturas. Esto es importante, ya que el emplazamiento de una obra civil en rocas fracturadas puede traer consigo la inducción de esfuerzos que originen el rompimiento de la roca, lo cual puede producir que el fracturamiento sea más intenso, o la carga de los materiales depositados en la superficie ocasione la abertura de las fracturas en el subsuelo y el macizo

rocoso posiblemente presente debilitamiento para soportar la carga de materiales depositados en la superficie.

De manera particular, en las rocas volcánicas, es importante definir la continuidad en el subsuelo, ya que el fracturamiento puede llegar a decenas de metros de profundidad, y esto propiciar que dichas rocas sean conductos potenciales para la migración de contaminantes y lixiviados que estén presentes en la superficie del terreno y que puedan migrar por las fracturas.

La experiencia en excavaciones de taludes en carreteras, túneles de gran diámetro y taludes en tajos mineros ha demostrado que la estabilidad de estas obras depende de realizar un estudio detallado del fracturamiento para que no ocasione daños en la vida activa de la obra civil.

## 4.6 Estudios socioeconómicos

Se deben estudiar los efectos tanto positivos como negativos que un determinado plan, programa o proyecto, como ubicar un sitio de disposición de RC&D, tienen sobre el medio socioeconómico de las personas. Describir las características sociales y económicas más importantes de la ciudad o zona más cercana al ubicar el SDF de RC&D se puede realizar mencionando la información obtenida en campo.

### 4.6.1 Recopilación de información

Para obtener información socioeconómica, se pueden consultar entidades de nivel nacional, estatal o municipal:

- ❖ Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI): datos de demografía, vivienda, nivel de ingreso y actividades económicas
- ❖ Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH): sitios arqueológicos que pudieran encontrarse en el área de influencia del proyecto
- ❖ Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL): organizaciones civiles
- ❖ Consejo Nacional de Población (CONAPO): procesos de crecimiento y migración de población.

También es útil consultar los medios de comunicación masiva como prensa, televisión o páginas web de los grupos organizados.

#### 4.6.2 Variables socioeconómicas

##### Demografía

De acuerdo con la Unión Internacional para el Estudio Científico de la Población (IUSSP, por sus siglas en inglés) de Naciones Unidas, la demografía es la “ciencia cuyo objeto es el estudio de las poblaciones humanas y que trata de su dimensión, estructura, evolución y caracteres generales, considerados principalmente desde un punto de vista cuantitativo” (IUSSP, 1985).

La demografía estudia la dimensión y composición de las poblaciones humanas y, principalmente, sus mecanismos de evolución. La búsqueda de la comprensión de los mecanismos de su evolución es lo que ha dado origen a un cuerpo metodológico específico (Vallin, 1994). La demografía se centra en cinco aspectos de la población humana: i) el tamaño; ii) la distribución; iii) la composición; iv) la dinámica, y v) los determinantes y consecuencias socioeconómicas del cambio poblacional.

Junto a los nacimientos y las muertes, la migración es uno de los tres elementos importantes para comprender el cambio del tamaño y la estructura de la población en un territorio en particular. En varias circunstancias, la migración puede llegar a ser el componente principal del cambio poblacional de un determinado territorio. Más allá de sus efectos demográficos, también son relevantes las repercusiones de los movimientos migratorios sobre la realidad socioeconómica de los territorios.

Finalmente, las diferentes características como el sexo, la edad, la nacionalidad, la lengua materna, la duración de la residencia (temporal o permanente), las causas de la migración, la inserción ocupacional, el nivel educativo, las costumbres, entre otros rasgos, permiten comprender la naturaleza y magnitud de los desafíos vinculados a la integración social y cultural de las personas migrantes observados en las zonas que reciben grandes contingentes migratorios (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], 1998).

Al ubicar un sitio de disposición de RC&D, es conveniente conocer información sobre la zona aledaña y de servicio, el número de habitantes y el crecimiento de la población a través de los años, la distribución de la población por sexo y edad, el origen de la población (procesos migratorios), a fin de determinar si la presencia del proyecto puede impactar esas variables.

La situación más favorable para el proyecto será si se tiene muy baja densidad poblacional y el proyecto no genera procesos migratorios significativos, como también si la actividad productiva no es mermada por el proyecto y, por el contrario, ofrece nuevas oportunidades de empleo.

## Calidad de vida

Según la Organización Mundial de Salud (OMS), la calidad de vida se define como la percepción individual de la propia posición en la vida dentro del contexto del sistema cultural y de valores en que se vive, y en relación con sus objetivos, esperanzas, normas y preocupaciones.

Al ubicar un sitio de disposición de RC&D, es conveniente conocer si los estilos de vida de la población cercana corresponden a entornos urbanos o rurales y a sus actividades lúdicas, deportivas y culturales, esto por alguna afectación que pudiera ocasionar la infraestructura a la forma de vida de la comunidad.

Por último, los cambios en los factores ambientales que pueden afectar la calidad de vida de las comunidades cercanas, debido a la ubicación de un sitio de disposición de RC&D.

## Economía

Este aspecto abarca información relacionada con la población económicamente activa, su nivel de ingresos y la actividad productiva a la que se dedican. Si el proyecto genera cambios en las actividades productivas, se presentarán repercusiones importantes, como pueden ser una alta dependencia de la tierra, cambios en las formas de organización para el trabajo y en los mecanismos de comercialización, las condiciones de empleo y nivel de ingreso, también en la participación del sector público y privado, así como el destino de la producción.

Ante la presencia de un sitio de disposición de RC&D, es necesario considerar la alteración de patrones económicos que pudieran presentarse en la zona, como pueden ser los siguientes:

- ❖ Crecimiento en los niveles de empleo
- ❖ Aumento de valor de la tierra
- ❖ Alteraciones de la demanda de los sistemas de transporte
- ❖ Crecimiento de los niveles de ingreso
- ❖ Un movimiento adicional de vehículos
- ❖ Alteraciones sobre las pautas de circulación en la zona

1

## Orden jurídico-político

Se debe conocer el orden del marco legal, ya sea si corresponde al nivel nacional, regional o municipal, así como el carácter de la tenencia de la tierra. También es importante identificar la presencia en la comunidad de grupos de poder de carácter formal o informal, organizaciones civiles e incluso de grupos delincuenciales.

2

## Cultura

Es un concepto abstracto y complejo, la definición más clásica es de E. B. Tylor: “La cultura o civilización, en sentido etnográfico amplio, es ese todo complejo que incluye el conocimiento, las creencias, el arte, la moral, el derecho, las costumbres y cualesquiera otros hábitos y capacidades adquiridos por el hombre en cuanto miembro de una sociedad”. Para el proyecto, es relevante conocer si hay presencia de grupos étnicos, su lengua nativa y las creencias particulares, así como las tradiciones y mitos asociados al lugar de emplazamiento.

3

4

Asimismo, al ubicar un sitio de disposición de RC&D, es necesario determinar si el proyecto no cambia significativamente la escala visual, o si altera sitios, construcciones o edificios de interés arqueológico, cultural o histórico, o alguna otra área de especial interés.

BIBLIOGRAFÍA

## Estética, grado de aceptación y adaptación

La estética está relacionada con el valor de lo que se percibe como bello. Al respecto, en la ubicación del sitio de disposición de RC&D deben considerarse los efectos que puede tener la alteración de la calidad visual del entorno natural o la intervención de obras arquitectónicas existentes que son apreciadas por la comunidad. El grado de aceptación y adaptación de la comunidad al emplazamiento es otro de los factores fundamentales para la selección del sitio.

La confrontación con los pobladores puede hacer inviable ubicar un sitio de disposición de RC&D. Este aspecto se puede deducir indirectamente si se conoce la respuesta a proyectos similares en ocasiones anteriores, si se han presentado protestas, acciones populares o cualquier otra manifestación de inconformidad; también se puede deducir directamente a través de una consulta pública o el levantamiento de entrevistas o encuestas.

### Presión en los recursos naturales

Corresponde a la presión que se ejercerá con la ubicación de un sitio de disposición de RC&D durante su ejecución y funcionamiento sobre los recursos utilizados por la comunidad. Es decir, si el emplazamiento generará una competencia por recursos vitales, como el agua, la energía o el suelo, o si se requerirá la importación de estos recursos para su funcionamiento.

La **tabla 43** muestra cada variable socioeconómica con algunos de los indicadores que pueden ser considerados para su evaluación.

Tabla 43. Variables socioeconómicas

Aspecto Socioeconómico	Variable	Indicadores
Demografía	Población y densidad	Número de habitantes, distribución por sexo y edad.
	Movilidad y migración	Población fija, flotante, causas de migración.
Calidad de vida	Estilos de vida	Actividades lúdicas, culturales, etc.
	Servicios y equipamiento	Salud, educación, vivienda, equipamiento urbano, seguridad, etc.
	Factores ambientales	Contaminación por fuentes existentes.
Economía	Actividades productivas	Cambio de actividad productiva, dependencia de la tierra, organización del trabajo.
	Mecanismos de comercialización	Carácter público/privado. Destino de la producción.
	Ingreso y empleo	Nivel de ingreso y distribución. Características del empleo.
Orden jurídico-político	Orden del marco legal	
	Grupos de poder formal/informal	Organizaciones civiles, grupos delictivos, etc.
Cultura	Etnia	Grupos étnicos, lengua nativa, creencias, etc.
	Tradicición	Actividades tradicionales, mitos, etc.
Estética, grado de aceptación y adaptación	Paisaje	Valor dado por la comunidad a la calidad visual del entorno.
	Arquitectura	Valor agregado al entorno por obra humana en el lugar.
Recursos naturales	Competencia por los recursos	Demanda de agua, suelo y otros recursos de uso humano versus proyecto.
	Requerimiento de recursos no existentes	Necesidad de importar recursos para el proyecto.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, D. (2002). Reducción y gestión de residuos de la construcción y demolición (RCD). *Tecnología y Construcción*, 18(2), 49-68.
- Arce, J. *et al.* (2015). Geología y estratigrafía del pozo profundo San Lorenzo Tezonco y de sus alrededores, sur de la Cuenca de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. Volumen 67, Núm. 2, pp. 123-143.
- Arce, L. y Tapia, E. (2014). *Planteamiento de un manual para la gestión de los residuos de la construcción y demolición en edificaciones urbanas*. [Tesis de grado]. Lima, Perú: Universidad de San Martín de Porres.
- Arellano, J., De la Llata, R., Carreón, M., Morales, W. y Villareal, J. (2002). *Ejercicios de Geología estructural*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
- Banai-Kashani, R. (1989, november). A new method for site suitability analysis: The analytic hierarchy process. *Environmental Management*, 13(6), 685-693.
- Bannister, A., Raymond, S. y Baker, R. (2004). *Técnicas modernas en topografía*. México: Alfaomega, pp. 47-93.
- Barredo, J. (1996, julio). *Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. Madrid: Ra-Ma. 250 pp.
- Bosque, J. (1997). *Sistemas de información geográfica*. 2ª. Madrid: Ediciones Rialp. 451 pp.
- Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción. (2013). *Plan de manejo de residuos de la construcción y la demolición*. Recuperado de <https://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/medioambiente/Flayer/PM%20RCD%20Completo.pdf>

1

2

3

4

- Carrión, C. (2015, 31 de mayo). *El proceso de análisis jerárquico (PAJ)*. [Diapositivas de Power Point]. Recuperado el 20 de junio de 2017, de <https://www.slideshare.net/CarlosCarrion2/metodologia-paraseleccion-valorada-multicriterio-comparativo-mp-y-r-61475823>
- Cepeda, L. (1993). *Apuntes de Petrología ígnea*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
- Chow, V. T. (1961). A General Formula for Hydrologic Frequency Analysis. *Transactions American Geophysical Union*. Vol. 32. 231-237.
- Chow, V. T. (1962). Hydrologic Determination of Waterway Areas for the Design of Drainage Structures in Small Drainage Basins. *Engineering Experiment Station Bulletin No. 462*. Universidad de Illinois.
- Chow, V. T. (1964). *Handbook of Applied Hydrology*. New York: McGraw-Hill.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2014). Los datos demográficos: alcances, limitaciones y métodos de evaluación. Serie Manuales 82. Santiago de Chile: Naciones Unidas, CEPAL. Recuperado en enero de 2017, de [http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/37145/S1420555\\_es.pdf;jsessionid=14D443EF61F69D62CC50C695B07FD1EC?sequence=1](http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/37145/S1420555_es.pdf;jsessionid=14D443EF61F69D62CC50C695B07FD1EC?sequence=1)
- Comisión Federal de Electricidad (1980). *Manual de diseño de obras civiles*. Sección A: Hidrotecnia.
- Comisión Federal de Electricidad. (1981). *Manual de Diseño de obras civiles*. Sección B, Capítulo de Mecánica de suelos.
- Comisión Federal de Electricidad. (1981). *Manual de Diseño de obras civiles*. Sección B: Geotecnia, Tema 2: Mecánica de suelos, Capítulo B.2.4: Cimentaciones en suelos.
- Comisión Federal de Electricidad. (1993). *Manual de Diseño de obras civiles*. Sección C: Estructuras, Tema 1: Criterios de diseño, Sección C.1.3: Diseño por sismo.
- Comisión Nacional del Agua. (s. f.). Medio Ambiente. CONAGUA. <https://www.gob.mx/conagua>
- Consultores en Ingeniería Geofísica. (2000). Integración de los estudios de resistividad eléctrica por SEV, tendidos de refracción sísmica y gravimetría levantados en la Cuenca de México. (Informe inédito).

1

2

3

4

- Deere, D. (1963). Technical Description of Rock Cores for Engineering Purposes. *Rock Mechanics and Engineering Geology*, Vol. 1, No. 1, 16-22.
- Del Valle, E. (1986). *Apuntes a la introducción a los métodos geofísicos de exploración*. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
- De Sanjosé, J., Martínez, E., López, M., y Atkinson, A. (2009). *Topografía para estudios de grado: geodesia, cartografía, fotogrametría, topografía*. Madrid: Bellisco, pp. 47-124.
- De Santos, D., Monercillo, B. y García, A. (2011). *Gestión de residuos en las obras de construcción y demolición*. Recuperado en enero de 2017, de <http://libreria.fundacionlaboral.org/ExtPublicaciones/GestionResiduos2.pdf>
- Domínguez, F. (1993). *Topografía abreviada*. Madrid: Mundi-Prensa, pp. 47-68.
- Eastman, J., Kyem, P., Toledano J. y Jin, W. (1993). *GIS and Decision Making*. Ginebra: United Nation Institute for Training and Research (UNITAR).
- Flores, A. (2013, 27 de noviembre). Cimentaciones superficiales. [Diapositivas en Power Point]. Lima, Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas. Recuperado de <https://es.slideshare.net/jhongesellvillanuevaportella9/cimentaciones-superficiales>
- Gaceta del Gobierno del Estado de México. (2009, 21 de mayo). *Norma Técnica Estatal Ambiental NTEA-011-SMA-RS-2008 que establece los requisitos para el manejo de los residuos de la construcción para el Estado de México*.
- Gaceta Oficial del Distrito Federal. (2004, 29 de enero). *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal y Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Cimentaciones*.
- Gaceta Oficial del Distrito Federal. (2015, 26 de febrero). *Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-007-RNAT-2013, que establece la clasificación y especificaciones de manejo para residuos de la construcción y demolición en el Distrito Federal*.
- Gómez, M. y Barredo, J. (2005). *Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. 2ª. Madrid: Ra-Ma, 276 pp.

1

2

3

4

- Gómez, M. y Bosque, J. (2007). *Integración de técnicas de evaluación multicriterio y SIG: Métodos de ayuda a la toma de decisiones*, Curso 2007/2008. Recuperado de [https://portal.uah.es/portal/page/portal/GP\\_EPD/PD-GP-MA-ASIG/PD-ASIG-200388/TAB42351/emc\\_08.pdf](https://portal.uah.es/portal/page/portal/GP_EPD/PD-GP-MA-ASIG/PD-ASIG-200388/TAB42351/emc_08.pdf)
- González, E., Morán, D., Mori, L. y Martiny, B. (2015). Revisión de los últimos eventos del Cenozoico del sector norte-central de la Sierra Madre del Sur y su posible conexión con el subsuelo profundo de la Cuenca de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Vol. 67, Núm. 2, pp. 285-297.
- Gutiérrez, V., Ramírez, I., Encarnación, G. y Medina, A. (2012). *Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos. Versión extensa*. Recuperado en septiembre de 2016, de [http://www.inecc.gob.mx/descargas/dgcenica/diagnostico\\_basico\\_extenso\\_2012.pdf](http://www.inecc.gob.mx/descargas/dgcenica/diagnostico_basico_extenso_2012.pdf)
- Henderson, F. (1966). *Open Channel Flow*. New York: Macmillan.
- Herrera, A. (2014). *Ecosistemas estratégicos: Análisis crítico del concepto*. [Tesis de Maestría en Estudios Urbano Regionales]. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Recuperado en enero de 2017, de <http://www.bdigital.unal.edu.co/49724/1/43159794.2015.pdf>
- Higashida, S. (1971). *Topografía general*. México: Autor, pp. 16-156.
- Hutton, J. (1980). Teoría de la Tierra y el uniformismo (1785). *Glossary of Geology*. 2nd. American Geological Institute.
- Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México. (1992). Mapa geológico de la república mexicana. Recuperado de [www.geologia.unam.mx:8080/...carta-geologica-de-la-republicamexicana/495-carta](http://www.geologia.unam.mx:8080/...carta-geologica-de-la-republicamexicana/495-carta).
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (s. f.). INEGI. <http://www.inegi.org.mx/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (1978). Carta geológica de la Ciudad de México a escala 1.50,000. Clave E14-A39.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2016). *Estructura porcentual del producto interno bruto por sector de actividad económica*. Recuperado en noviembre de 2016, de <http://www.inegi.org.mx/sistemas/bie/cuadrosestadisticos/GeneraCuadro.aspx?s=est&nc=785&c=24393>
- Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. (s. f.). INAFED. <https://www.gob.mx/inafed>

1

2

3

4

- Jankowski, P. (1995). Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making methods, *International Journal of Geographical Information System*, 9(3), 251-273.
- Llatas, C. (2000). *Residuos generados en la construcción de viviendas. Propuestas y evaluación de procedimientos y prescripciones para su minimización*. [Tesis doctoral]. Sevilla, España: Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, pp. 14-15.
- Lugo-Hubp, J., Cordero-Estrada, M., Zamorano-Orozco, J. (1995). Relieve, litología y riesgos en la zona urbana de la Delegación Álvaro Obregón, Distrito Federal, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. Vol.12, Número 1, pp. 52-67.
- Malczewski, J. (1999). *GIS and Multicriteria Decision Analysis*, New York: John Wiley & Sons. 393 pp.
- Malczewski, J. (2004). GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. *Progress in Planning*, 62 (1), 3-65.
- Malczewski, J. y Rinner, C. (2015). *Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science*. New York: Springer Science+Business Media. 535 pp.
- Martínez, A. y Damián, S. (1999). *Catálogo de impactos ambientales generados por las carreteras y sus medidas de mitigación*. Recuperado en noviembre de 2016, de <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt133.pdf>
- Mason, B. (1990). *Petrology of the Metamorphic Rocks*. Londres: Uniwin Hyman. 230 pp.
- McHarg, I. (1969). *Design with nature*. Garden City, N.Y.: American Museum of Natural History [by] the Natural History Press.
- Mena, J. (1992). *Cartografía digital. Desarrollo de software interno*. Madrid: Ra-Ma, pp. 57-72.
- Newton, D. y Vinyard, J. (1967). Computer Determined Unit Hydrography from Floods. *Journal Hydraulics Division*. A.S.C.E., Vol. 93, No. HY5, 209-235.
- Noguez, J. (2018). *Propuesta de un Centro Integral de Residuos de la Construcción (CIREC)* [Tesis de licenciatura]. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
- Olivas, U., Valdez, J., Aldrete, A., González, M. y Vera, G. (2007). Áreas con aptitud para establecer plantaciones de maguey cenizo: definición mediante análisis multicriterio y SIG. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 30(4), 411-419.

1

2

3

4

- Petróleos Mexicanos (1987). Informe geológico final del pozo Copilco-1. Informe Inédito.
- Petróleos Mexicanos (1987). Informe geológico final del pozo Roma-1. Informe Inédito.
- Petróleos Mexicanos (1987). Informe geológico final del pozo Texcoco-1. Informe Inédito.
- Petróleos Mexicanos (1987). Informe geológico final del pozo Tulyehualco-1. Informe Inédito.
- Procuraduría Federal de Protección al Ambiente-PROFEPA (2012). Guía de Autoevaluación Ambiental. Publicada en el Portal electrónico de la entidad, 36 pp. Recuperado en enero de 2017, de [http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/26/1/guia\\_de\\_autoevaluacion\\_ambiental.pdf](http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/26/1/guia_de_autoevaluacion_ambiental.pdf)
- Ramsay, G. (1997). Plegamiento y fracturación de las rocas. McGraw-Hill.
- Ruiz, M. y González, S. (2000). *Geología aplicada a la Ingeniería Civil*. México: Limusa.
- Russell, B. y Wolf, P. (1999). *Topografía moderna*. New York: Thomas y Crowell, pp. 78-167.
- Saaty, T. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. New York: McGraw-Hill.
- Schenk, T. (2002). *Fotogrametría digital* (Geomática Vol. I). Barcelona: Marcombo, pp. 45-157.
- Schimidt, O., Milton, D. y Rayner, H. (1997). *Fundamentos de topografía*. México: Continental, pp. 63-132.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. (1978). *Recomendaciones para el diseño y revisión de estructuras para el control de avenidas*. Comisión del Plan Nacional Hidráulico.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. (1981). *Manual de diseño de obras fluviales para la protección contra inundaciones*. Subsecretaría de Infraestructura Hidráulica.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (s. f.). Comunicaciones. Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. <https://www.gob.mx/sct>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2010). *Estudio de análisis, evaluación y definición de estrategias de solución de la corriente de residuos generados por las actividades de construcción en México*. Recuperado en septiembre de 2016, de <https://>

1

2

3

4

biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2011/CD000933.pdf

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). Guía para la presentación del informe preventivo. 29 pp. Recuperado en enero de 2017, de [http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/120997/Guia\\_\\_Informe\\_Preventivo.pdf](http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/120997/Guia__Informe_Preventivo.pdf)

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). Guía para la presentación de la manifestación de impacto ambiental del sector industrial. Modalidad particular. 123 pp. Recuperado en enero de 2017, de <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/gindustria.pdf>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2012). Residuos de manejo especial. En *Informe de la situación del medio ambiente en México*. Recuperado en noviembre de 2016, de [http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe\\_12/07\\_residuos/cap7\\_2.html](http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/07_residuos/cap7_2.html)

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2013). Norma Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011. Que establece los criterios para clasificar a los Residuos de Manejo Especial y determinar cuáles están sujetos a Plan de Manejo; el listado de estos, el procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho listado; así como los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo.

Servicio Geológico Mexicano (2007). Mapa Geológico de la República Mexicana escala 1:2 000 000. Recuperado de [https://mapasims.sgm.gob.mx/GeoInfoMex\\_gobmx](https://mapasims.sgm.gob.mx/GeoInfoMex_gobmx)

Servicio Geológico Mexicano (2016). Monografías geológico-mineras de la república mexicana a escala 1:250 000. Recuperado de [https://mapasims.sgm.gob.mx/GeoInfoMex\\_gobmx](https://mapasims.sgm.gob.mx/GeoInfoMex_gobmx)

Servicio Geológico Mexicano (2016). Anexo con información de las monografías geológico-mineras de la República Mexicana. Recuperado de <http://www.gob.mx/sgm/articulos/descargas-cartas-impresadeditadas-por-el-sgm-70622>

Servicio Meteorológico Nacional. (s. f.). SMN. <https://smn.conagua.gob.mx/es/>

Snyder, F. (1964, may). Hydrology of Spillway Design: Large Structures-Adequate Data. *Journal of Hydraulics Division*. A.S.C.E., 90(3), 239-259.

1

2

3

4

- Sowers, G. B. y Sowers, G. F. (1980). *Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones*. 3ª. México: Limusa, 667 pp.
- Springall, R. (1970). *Hidrología*. Primera parte. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
- Springall, R. (1975). *Análisis estadístico y probabilístico de datos hidrológicos*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. Nueva York: John Wiley & Sons.
- Terzaghi, K. (1967). Measurement of stress in rock. *Gestechnique*. Vol. 17, Núm.1.
- Terzaghi, K. (s. f.). Tabla de clasificación de rocas ígneas. Recuperado de [http://eeucativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/750/984/html/3\\_tipos\\_de\\_rocas\\_magmaticas.html](http://eeucativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/750/984/html/3_tipos_de_rocas_magmaticas.html).
- Terzaghi, K. (s. f.). Tabla de clasificación de rocas metamórficas. Recuperado de [https://educativa.catedu.es%25252F44700165%25252F52Faula%25252Farchivos%25252F750%25252F985%25252Fhtml%25252F42\\_clasificacin\\_de\\_las\\_rocas\\_metamrficas.html&source](https://educativa.catedu.es%25252F44700165%25252F52Faula%25252Farchivos%25252F750%25252F985%25252Fhtml%25252F42_clasificacin_de_las_rocas_metamrficas.html&source).
- Terzaghi, K. (s. f.). Tabla de clasificación de rocas sedimentarias. Recuperado de <http://cienciasdelatierra2010.blogspot.mx/2009/05/rocassedimentarias.html>
- Torres, Á., y Villate, E. (1995). *Topografía*. Cali: Norma, pp. 23-89.
- Toscano, R. (1955). *Métodos topográficos*. México: Porrúa, pp. 118-198.
- Unión Internacional para el Estudio Científico de la Población. (1959). *Diccionario Demográfico Multilingüe*. Versión en español. Naciones Unidas, IUSSP, CELADE, 123 pp. Recuperado en enero de 2017, de [http://www.demopaedia.org/tools/spip.php?page=generate\\_dictionary&edition=es-i&format=html#chapitre1](http://www.demopaedia.org/tools/spip.php?page=generate_dictionary&edition=es-i&format=html#chapitre1)
- Vallin, J. (1994) *La Demografía*. Santiago de Chile: Naciones Unidas, Comisión Económica para América Latina y el Caribe, pp. 7-15. Recuperado en enero de 2017, de <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/9614>.
- Vázquez, E. y Jaimes, R. (1989). Geología de la Cuenca de México. *Geofísica Internacional*, Vol. 28(2), pp. 133-190.
- Vidal, M. (2009). Presentación de rocas sedimentarias para la asignatura de Geología de Yacimientos de Fluidos Carrera de In-

1

2

3

4

geniería Petrolera. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.

Viessman W., Lewis, G. & Knapp, J. (1989) *Introduction to Hydrology*. 3th. Harper and Row.

Woods, K., Berry, D. & Geotz, W. (1960). *Highway Engineering Handbook*. New York: McGraw-Hill.

Yevjevich, V. (1972). *Probability and Statistics in Hydrology*. Water Resources Publication Fort Collins, Colorado.

Zolfagharian, S., Nourbakhsh, M., Irizarry, J., Ressang, A. y Gheisari, M. (2012). Environmental Impacts Assesment on Construction Sites. *Construction Research Congress. American Society of Civil Engineers*. West Lafayette, Indiana, Estados Unidos, 21 al 23 de mayo de 2012. Versión digital.

Zurita, L. (2011). *La gestión del conocimiento territorial*. Jarama, España: Alfaomega, Ra-Ma. 206 pp.

1

2

3

4



UNIDAD DE APOYO EDITORIAL

**Manual técnico.**

**Localización de sitios para la disposición final  
de residuos de la construcción y demolición**

Se publicó la primera edición electrónica de un ejemplar (11 MB) en formato PDF en abril de 2024, en el repositorio de la Facultad de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, Ciudad de México. C.P. 04510

El diseño estuvo a cargo de la Unidad de Apoyo Editorial de la Facultad de Ingeniería.

Las familias tipográficas utilizadas fueron Source Serif Pro para texto y Bree para títulos.