

II. EL AMBIENTE

Se incluyen los lineamientos del muestreo de recursos no renovables (suelo y agua) con los que los manejadores de recursos han de contender, y de otras herramientas ambientales, como el clima o monolitos de suelo, con que cuentan como elemento de juicio.

La importancia del suelo a nivel mundial ha sido recientemente revalorada, ya que la edafósfera es una capa más del planeta tierra. Esta capa puede considerarse como una geomembrana que permite el intercambio de materia y energía entre la litosfera y la atmósfera, sirviendo de protección a la litósfera ante los efectos climáticos. Además, se le califica como un recurso natural no renovable debido a sus bajas tasas de formación. En los ecosistemas terrestres, es soporte y fuente de nutrimentos para los microorganismos, invertebrados y plantas. Su importancia a nivel agronómico es ampliamente reconocida.

En la esfera ambiental, los recursos hídricos están llamados a ser el gran problema de la humanidad para el presente siglo. Es por esto que el tema “cuerpos de agua superficiales” es de suma importancia, tanto por el consumo de grandes cantidades de este recurso por las comunidades humanas a nivel doméstico y por la industria, como por la descarga de aguas residuales, contaminadas en diversos grados, a los cuerpos de agua.

La toma de datos climáticos no es menos importante. Este aspecto tiene al menos dos vertientes de relevancia para los manejadores de recursos naturales: el clima como factor que puede limitar u orientar la distribución y abundancia de los seres vivos, y el clima como elemento cambiante (calentamiento global) que puede modificar estos patrones y que debe ser considerado en la toma de decisiones en materia ambiental.

2

SUELOS

Francisco Bautista Zúñiga* Silke Cram Heydrich** e Irene Sommer Cervantes**

Introducción

El suelo es un cuerpo natural localizado en la superficie terrestre que soporta o es capaz de soportar plantas en forma natural. Es dinámico, cambia con el tiempo y en el espacio, contiene material mineral y/o orgánico no consolidado que ha sido sujeto a factores formadores y muestra efectos de procesos pedogenéticos. Un suelo difiere del material del cual se ha formado en características físicas, químicas, biológicas y morfológicas (SSSA, 1997).

El suelo puede concebirse como un sistema abierto que presenta intercambios de materia y energía con el medio, en él, se desarrollan diversos procesos físicos, químicos y biológicos, responsables de su morfología (forma), características y propiedades (Arnold, 1990).

La formación de un suelo es un proceso largo que dura de cientos a miles de años, por lo que este recurso debe considerarse como no renovable. Los suelos constituyen el medio natural en donde se desarrolla la vegetación y los cultivos agrícolas, en él se inicia y termina la cadena alimentaria: las plantas toman de ahí varios nutrimentos, los herbívoros necesitan de las plantas para vivir, en tanto que los consumidores secundarios, los carnívoros, requieren de los herbívoros para su subsistencia. Cuando plantas, herbívoros y carnívoros mueren los desintegradores los descomponen y se reciclan los nutrimentos. Si se corta la base de la cadena, se altera fuerte e irremediamente al ecosistema (Bautista y Estrada, 1998).

* Departamento de “Manejo y conservación de recursos naturales tropicales”, FMVZ, Universidad Autónoma de Yucatán

** Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México

Otras funciones que cumplen los suelos son: a) Ser regulador de la calidad del agua y del aire ya que funcionan como un reactor, filtrando, amortiguando y transformando muchos compuestos, entre ellos los contaminantes; b) Representa el hábitat de muchos organismos y es reserva genética; c) Es el medio físico para sostener estructura socioeconómica, habitación, desarrollo industrial, sistemas de transporte, recreación, disposición de residuos etc.; y d); Es fuente de materiales como arcilla, arena, grava, minerales etc. Y además es parte de nuestra herencia cultural que contiene tesoros arqueológicos y paleontológicos importantes para preservar la historia de la tierra y la humanidad.

El suelo es más heterogéneo que el agua o el aire, tiende a cambiar mucho más lentamente y por lo tanto a preservar su estado por más tiempo, es por ello que, los estudios de suelo son más intensivos en espacio, pero requieren menor resolución en tiempo.

En general, las investigaciones en edafología, requieren de análisis químicos, físicos, biológicos y bioquímicos *ex situ* y por lo tanto un muestreo de suelos destructivo. El tamaño de muestra generalmente será menor que el estadísticamente deseado y por eso es recomendable seguir una estrategia que permita tomar las muestras de forma eficiente para no invertir recursos económicos en vano.

Los resultados obtenidos del análisis de muestras de suelo se podrán tomar como una descripción exacta de la propiedad del suelo, sólo si: La muestra representa a la población. Los resultados deben, idealmente, ser reproducibles y no tener sesgo, esto significa que en principio no deben depender del investigador. La calidad de un estudio tiene que ser controlable y por lo tanto los procedimientos deben ser transparentes y bien documentados (Schulin *et al.*, 1994).

Obtener una muestra representativa no es tarea sencilla, muchas veces los errores en el muestreo de suelos son mucho más graves que los errores analíticos. El grado en el cual el resultado de un análisis identifica una característica real de toda la población del suelo a estudiar, depende de la precisión del muestreo. Todo el esfuerzo invertido en el aseguramiento de la calidad de los análisis en el laboratorio se desperdicia si la muestra a analizar no es representativa.

La obtención de muestras representativas es una tarea complicada debido a la variabilidad que presenta el suelo. Diferencias en la composición y propiedades del suelo las encontramos no sólo de región a región, sino también a distancias de muestreo muy cortas e incluso dentro de una misma parcela de cultivo. Cada situación es singular y requiere la toma de decisiones de acuerdo a los objetivos específicos y a las características del paisaje o lugar. El hecho de que un suelo varía de una región a otra a escalas muy diferentes, implica que en el diseño de estrategias de muestreo de suelos no se puede seguir una “receta”, más bien cada muestreo debe diseñarse de acuerdo a las características de la región de interés y

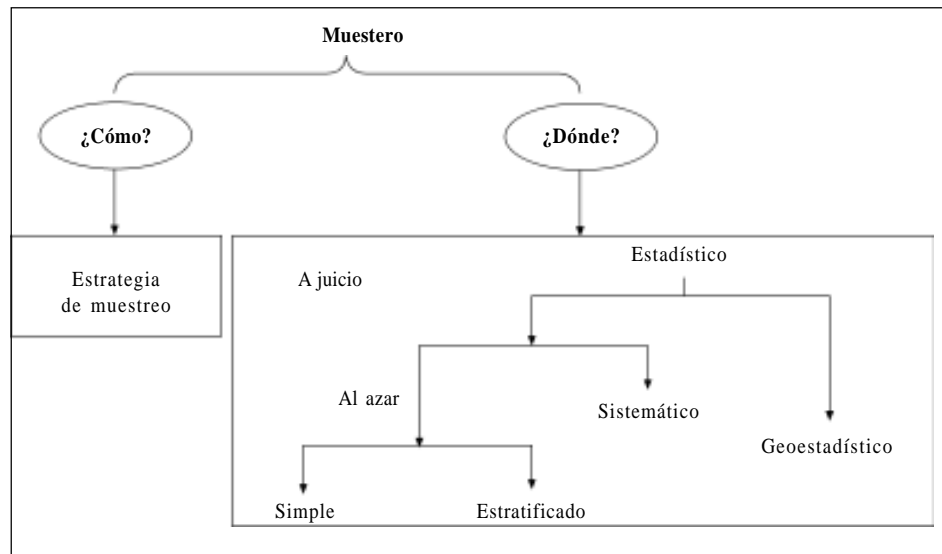
al objetivo que se persigue; contestando las siguientes preguntas: ¿Cómo? y ¿Dónde? (Figura 1).

El presente ensayo tiene como objetivo orientar al lector sobre las preguntas que debe responder en la construcción de una estrategia de muestreo de suelos de acuerdo con los objetivos y nivel de detalle que se requiere en el estudio. Las técnicas de muestreo de suelo que se comentarán en este texto son: 1) Para el levantamiento de suelos; 2) Para estudios de contaminación; 3) Para diagnóstico de la fertilidad del suelo; y 4) Para evaluaciones de técnicas agrícolas.

Estrategia general del muestreo

Esta parte comprende básicamente los elementos que deben tomarse en cuenta para diseñar una estrategia de muestreo considerando los objetivos del estudio y las características de la zona.

Figura 1



Preguntas que se deben contestar durante el diseño de un muestreo

En cada caso se tendrá que elaborar una estrategia o un modelo de aproximación que contemple los siguientes puntos (Figura 2): a) Definición del problema y objetivos del estudio; b) Definición de las variables a medir; c) Definición de la población; d) Número y ubicación de sitios de muestreo; e) Tipo de muestra y equipo; f) Profundidad de muestreo; g) Cantidad de muestra y h) Época de muestreo.

- Definición del problema y objetivos del estudio. Este punto se refiere a que se debe tener en mente la pregunta que se quiere contestar con los resultados de los análisis de las muestras, para que desde un inicio se elabore un plan de toma de muestras completo y adecuado al objetivo del estudio. En muchas ocasiones es preciso recolectar primero toda la información relacionada con el caso, para decidir cuál es la información adicional que se necesita para resolver el problema.
- Definición de las variables a medir. Se refiere al listado de características y propiedades que se necesitan medir y existe una relación muy estrecha entre los métodos analíticos utilizados y los procedimientos de toma de muestras. Los métodos analíticos determinan la forma de la toma de muestras, la herramienta a utilizar, la cantidad de muestra y la forma de preservación y transporte. El procedimiento se vuelve complejo si el estudio considera múltiples métodos que requieren diferentes formas de recolección, tratamiento y almacenamiento. Es importante considerar además las variables y datos del sitio que se necesitan para la interpretación de los resultados generados (p. e. vegetación, uso del suelo, tipo de suelo, topografía, datos de agua, etc.).
- Definición de la población. Antes de ejecutar una investigación se debe definir la población que se va a representar en la muestra, para disminuir el riesgo de que se tomen datos no válidos, incompatibles o irrelevantes. La muestra se toma definiendo la región que se quiere estudiar y las localidades de interés dentro de esta región.
- Número y ubicación de sitios de muestreo. En esta sección se exponen los principios generales para obtener muestras representativas de un suelo, considerando diversas opciones. Existen dos diseños que dependen de la cantidad y utilidad de la información que se desea obtener del área de estudio, estos son: 1) Basado en el juicio del experto; y 2) El diseño estadístico, que comprende a los métodos estadísticos tradicionales (aleatorio simple, aleatorio estratificado y sistemático) y al análisis de datos correlacionados en el espacio (geoestadísticos) (Webster y Oliver, 1990; Schulin, 1994; Tan, 1996; Peterson y Calvin, 1996; ISO/DIS, 1996; Einax *et al.*, 1997) (Figura 3, Cuadro 1).

A juicio del experto

La selección de puntos de muestreo consiste en la ubicación de las muestras típicas de la población de estudio con base en la experiencia de quien toma la muestra, o sea, se lleva a cabo por un experto. Este tipo de muestreo disminuye considerablemente el número de muestras, lo cual se traduce en un menor costo del estudio,

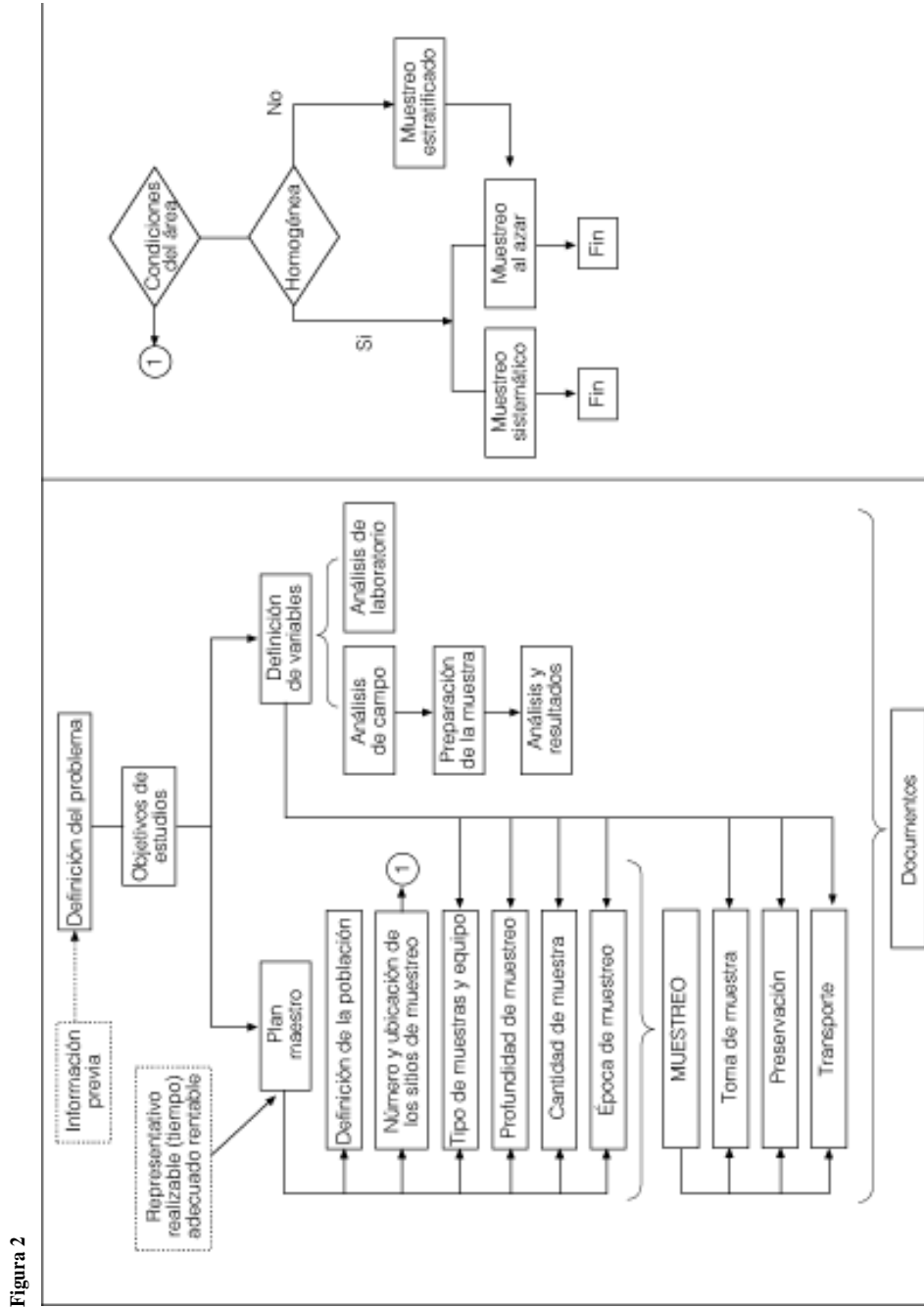


Figura 2

Diagrama de flujo para el diseño de una estrategia de muestreo de suelos.

pero es importante considerar que se tiene que contar con edafólogos que tengan experiencia en la identificación de unidades de paisaje y de características del suelo, para a su vez identificar la variabilidad del suelo en campo y así poder ubicar los sitios de muestreo.

Con un muestreo de este tipo no se podrán aplicar aproximaciones a los resultados, se corre el riesgo de realizar un estudio subjetivo, sesgado y con errores sistemáticos, sin datos adicionales no podrán hacerse extrapolaciones. Representa una aproximación inicial o muestreo primario para obtener datos para elegir el diseño de muestreo estadístico más adecuado.

Muestreo aleatorio simple

Los puntos de muestreo de toda la población, se eligen de tal forma, que cualquier combinación de n unidades, tenga la misma oportunidad de ser seleccionada, se lleva a cabo seleccionando cada unidad al azar e independientemente de cualquier unidad previamente obtenida. La forma más usual para determinar los puntos de muestreo, es trazando un sistema de coordenadas sobre el área de estudio, seleccionando dos distancias al azar, una para cada eje, y la intersección de estas dos será el sitio en el que se tomará la muestra.

Los resultados de este tipo de muestreo, son adecuados para poblaciones homogéneas, aunque, si se conoce la variabilidad de la población es mejor utilizar uno de los métodos que se describen a continuación:

Cuadro 1

Diseño	Número de muestreo	Precisión de muestras	Aplicación / Observaciones y Exactitud
A juicio del experto	+	No se puede evaluar	Información general, primera aproximación para elegir un diseño de muestreo. Lo debe llevar a cabo personal con experiencia
Aleatorio simple	++	+	En poblaciones homogéneas
Aleatorio estratificado para cada subpoblación	+++	++	En poblaciones heterogéneas. Se obtienen datos
Sistemático	++++	+++	En poblaciones heterogéneas, se utiliza para elaborar mapas de distribución
Geoestadístico	+++++	++++	En regiones con variabilidad desconocida. Cartografía de la distribución espacial de propiedades

Algunos diseños de muestreo de suelo y su evaluación por número de muestras, precisión, exactitud y sus aplicaciones

Muestreo aleatorio estratificado

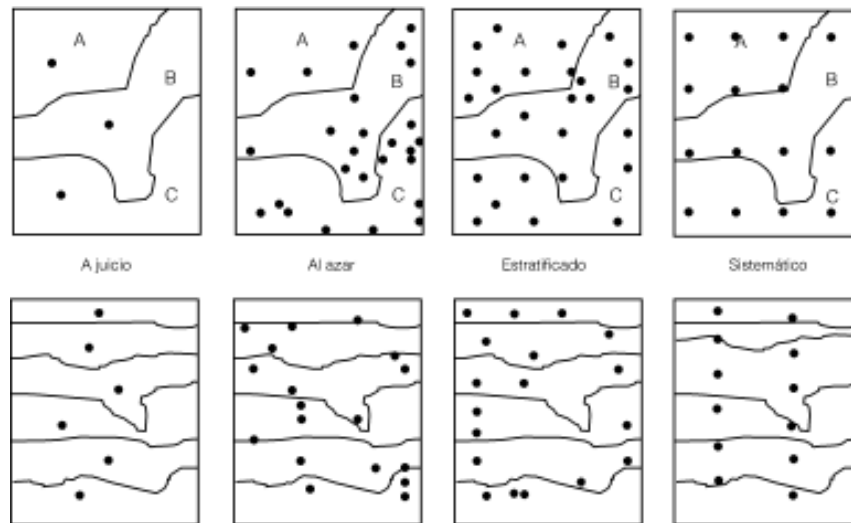
Este método se utiliza comúnmente en poblaciones heterogéneas, en el cual la población se subdivide en estratos (grupos, fases) más homogéneos y en cada estrato se lleva a cabo un muestreo aleatorio simple. Para la elección de estratos se utiliza información previa, como son el clima, la geomorfología, el tipo de suelo y la vegetación/uso del suelo de la zona de interés, entre otros.

Las principales razones por las que se utiliza este plan de muestreo son el obtener datos específicos para cada subpoblación y aumentar la precisión en los datos sobre la población.

Muestreo sistemático (en rejilla)

El muestreo sistemático consiste en la toma de muestras equidistantes con el fin de realizar una mejor caracterización de la población. Si se trata de muestras en espacios de dos dimensiones se trazan varias líneas paralelas y perpendiculares sobre la superficie. Sobre las intersecciones (que deben ser equidistantes) se toma la muestra, la separación entre líneas y por lo tanto el número de puntos depende del nivel de detalle deseado.

Figura 3



Ejemplos de los diseños de muestreo basado en el juicio del experto, aleatorio simple, aleatorio estratificado y sistemático en 1) un paisaje con tres tipos de suelo (A, B y C) y 2) en un perfil de suelo con 6 horizontes (Dijkerman, 1981).

Muestreo geoestadístico

La geoestadística incluye todos los métodos estadísticos para el análisis de datos correlacionados en el espacio, también se le conocen como la teoría de las variables regionalizadas (Einax *et al.*, 1997).

Estos métodos se desarrollaron por la necesidad de tomar muestras representativas en regiones geográficas que tienen una variabilidad significativa y desconocida. Se utilizan en gran medida para elaborar mapas de distribución de determinadas propiedades o características del suelo, por ejemplo, la distribución de metales en una región determinada, para ello se utiliza la interpolación geoestadística conocida como «kriging», la cual requiere del conocimiento del variograma o su equivalente (Webster y Oliver, 1990).

Para utilizar este método de la forma más efectiva, se sugiere determinar, en un muestreo preliminar, la escala de la variación espacial (muestreo en nido) y sobre esta base diseñar un muestreo en rejilla regular.

- a) Tipo de muestra y equipo de muestreo de suelos. En el Cuadro 2 se presentan los diferentes tipos de muestras que se manejan en el muestreo de suelos, su definición, su aplicación en edafología y las herramientas que se utilizan. Algunos de los criterios para la elección de las herramientas de muestreo son: tamaño de muestra que se necesita para el análisis, capacidad para tomar muestras en tipos de suelos diferentes (arcillosos, arenosos, orgánicos etc.), profundidad máxima a la que se va a tomar la muestra, capacidad para tomar muestras de suelo bajo diferentes regímenes de humedad, accesibilidad al sitio de muestreo y los requerimientos de personal para su manejo.
- b) Profundidad de muestreo. La profundidad de muestreo es la distancia en centímetros a partir de la superficie del suelo sin tomar en cuenta el horizonte orgánico (O). Esta profundidad dependerá nuevamente del objetivo del muestreo. Se muestran algunos ejemplos en el Cuadro 3 (Reichert y Roemer, 1995; ISO/DIS10381-1, 1995):

Cuadro 2

	Por horizontes	Muestras		Inalteradas
		Alteradas		
		Superficiales		
		Simples	Compuestas	
Definición	Horizontes del perfil del suelo diferenciados por procesos	Muestras de un sitio	Muestras de varios sitios que han sido mezcladas	Muestras que se colectan sin alterar la estructura
Aplicación	Levantamiento de suelos, análisis mineralógicos y fisicoquímicos y comportamiento de contaminantes	Conocimiento de la variabilidad superficial	En estudios de fertilidad y para el conocimiento de los valores medios en zonas homogéneas	Estudios de micromorfología y densidad aparente. También se utilizan en estudios con columnas de suelo
Toma de muestra	En calicatas, las muestras se colectan por horizontes	Muestreos de rejilla y transectos	Tomar 16 o más submuestras del mismo tamaño	De las paredes del perfil, de parte del perfil o del perfil completo
Herramientas y accesorios	Palas curvas y planas, picos, espátulas, barrenas de un metro de largo, GPS y cámara fotográfica	Barrenas de 5 cm de diámetro, el largo depende de los objetivos del estudio	Barrenas de 5 cm de diámetro el largo depende de los objetivos del estudio	Cajas de Kubiena, cuchillos, cilindros de PVC o acero inoxidable con bordes afilados, martillo

Tipos de muestras según sus aplicaciones

Muestra compuesta: Con la mezcla de la muestra se asume que en el análisis se obtiene una estimación válida de la superficie de estudio, que de otra forma se obtendría con la media de los análisis individuales de las muestras simples. Se utiliza en estudios a escala regional en los cuales la variabilidad de las muestras simples tomadas a distancias muy cortas meten ruido y opacan cualquier otro patrón más burdo (Fortunati *et al.*, 1994). Es muy importante que todas las submuestras de un área homogénea se tomen a la misma profundidad, ya que de lo contrario se producen considerables variaciones en algunos análisis. Para ello, es útil poner una marca en la barrena a la profundidad deseada.

Cuadro 3

Objetivo del muestreo	Profundidad de muestreo recomendada
Génesis y clasificación (cartografía)	Por horizontes
Diagnóstico de fertilidad	Espacio radicular, aprox. 0 – 30 cm
Riesgo de contaminación de acuíferos	Por horizontes
Riesgo a la salud: jardín de niños	Hasta 35 cm (0-5 , 5-15 y 15-35 cm)
Consumo de plantas	Espacio radicular
Afectación a microorganismos del suelo	Horizonte A
Comportamiento de contaminantes	Por horizontes

Profundidad del muestreo de acuerdo con objetivos

- a) Cantidad de muestra. La cantidad de muestra que se va a tomar se determina a partir del número y tipo de parámetros que se van a analizar. En el Cuadro 4 se indica la cantidad de muestra para cada tipo de análisis (Hildenbrand *et al.*, 1996). Es recomendable considerar la cantidad de muestra con base en los análisis que se realizarán, ya que una toma de muestra posterior puede ser costosa. Deben conservarse por separado la muestra sin tratamiento y la muestra molida finamente para el análisis. Actualmente, se recomienda coleccionar una menor cantidad de muestra como una forma de respeto a la naturaleza. En el mismo sentido, se recomienda que al tapar la calicata, el suelo se coloque de acuerdo con los horizontes respectivos.
- b) Época de muestreo La pregunta de cuando deben tomarse las muestras es importante sobre todo si el objetivo del estudio son propiedades del suelo que tienen altas tasas de cambio (potencial redox, nutrimentos, nitratos, contenido de humedad) (Varallyay, 1990), para ello, por ejemplo, será importante considerar en el diseño del muestreo: el régimen hídrico, el programa de las actividades agrícolas, las épocas del año, etc.

Reglas generales durante la toma de muestras

Las muestras se deben tomar de tal forma que el material de suelo sea representativo de toda la extensión o intervalo de profundidad que se quiera estudiar.

- Si se utiliza una pala o herramienta parecida, se debe evitar contaminar la muestra con material de otros puntos de muestreo, superficies u horizontes.
- Las herramientas de muestreo deben limpiarse antes de cada utilización, retirando todas las partículas adheridas.
- Hay que tener especial cuidado de que toda la muestra se deposite en el recipiente adecuado, elegido con base en las propiedades que se analizarán.

- En general, es prudente llevar al cabo el trabajo de campo entre dos personas o más, esto aumenta la seguridad en la información y facilita la recolección de datos.
- En el caso de perfiles, la muestra debe tomarse de los frentes. Antes de la toma de muestra deben limpiarse las caras del perfil, p. e. raspando con una pala. Las muestras deben tomarse siempre de abajo hacia arriba para evitar mezclar horizontes. La toma de muestra se realiza sacando la cantidad requerida en dirección horizontal.
- Si es posible deben documentarse los perfiles con fotografías a color o diapositivas. Las fotos deben tener indicado el número de fotografía y la identificación del perfil.

Fuentes de error en el muestreo

El error de muestreo se presenta cuando la muestra incluye solamente las unidades de muestreo seleccionadas y no a toda la población, es decir, no es representativa. Este error es causado por la inherente variación entre las unidades de la población, a continuación se consideran algunos de ellos (Peterson y Calvin, 1996; EPA/600/R-92/128, 1992; Einax *et al.*, 1997):

- Error de heterogeneidad. Por la variabilidad en la composición de cada partícula que conforma la unidad de muestra. El error se reduce moliendo el material.
- Error de agrupación. Por la forma en la que las distintas partículas se separan y distribuyen, este error se relaciona con la heterogeneidad en la composición de la muestra. El factor de agrupación refleja la probabilidad de que una partícula sea incluida en la muestra.
- Error de fluctuación. Por la heterogeneidad en el espacio (transectos) y en el tiempo (cambios estacionales).
- Error de delimitación y extracción. Por la definición incorrecta del volumen de material que debe ser extraído (núcleos, horizontes, profundidad) y es una de las principales fuentes de introducción de sesgo o error en el muestreo.

Identificación de las muestras

Cada muestra se identifica clara y duraderamente (por lo menos con localidad de muestreo, número de muestra, fecha, hora, profundidad y persona que tomó la

muestra) (Figura 4). La forma de la numeración debe unificarse e ir de acuerdo con la forma en que se toman las muestras.

Cuadro 4

Tipo de análisis	Peso en gramos
Caracterización química (pH, CIC, C, Ca, Mg, Na, K, N, P)	500
Caracterización física (textura, densidad)	500
Contaminantes inorgánicos	150
Hidrocarburos	250
Muestras de retención de humedad	1000

Cantidad de muestra recomendada según tipo de análisis

Las etiquetas deben colocarse dentro y en el exterior del recipiente en el que se coloca la muestra de suelo. Utilice tinta que no se disuelva en agua.

Preservación y transporte de muestras

Las formas de preservación y transporte dependerán del objetivo del muestreo de suelos, a continuación se mencionan algunos ejemplos (ASTM, 1997).

Figura 4

Número de muestra _____	Número de muestra _____
Fecha _____	Fecha _____
Tratamiento _____	Perfil _____
Profundidad _____	Profundidad _____
Colector _____	Horizonte _____
Proyecto _____	Colector _____
Responsable del proyecto _____	Proyecto _____
Localidad o sitio _____	Responsable del proyecto _____
	Localidad o sitio _____

Ejemplos de tipos de etiquetas

Las muestras que serán utilizadas para la caracterización física y química del suelo se depositan en bolsas de plástico previamente tal cual son tomadas en campo y se transportan en costales o cajas de cartón para evitar cualquier pérdida. Se recomienda utilizar dos bolsas por muestra con el fin de protegerla y evitar pérdidas.

Las muestras inalteradas para la determinación de parámetros físicos como densidad, permeabilidad porosidad y contenido de humedad se colocan en contenedores que deben ser lo suficientemente gruesos y estables para evitar rupturas y pérdida de material. Los tipos de contenedores pueden ser de PVC o acero inoxidable con tapas de plástico. Además se envuelven en papel aluminio o plástico y se colocan en otros contenedores como cubeta, cajón etc. para evitar que se muevan durante el transporte.

Las muestras para la determinación de contaminantes orgánicos se colocan en contenedores de vidrio con tapa metálica previamente enjuagados con un solvente. Las muestras deben de mantenerse a 4 °C desde que se toma la muestra hasta su análisis.

Las muestras para la determinación de contaminantes inorgánicos se colocan en contenedores no metálicos para evitar contaminación, generalmente se utilizan bolsas de plástico y se transportan sin pretratamiento, al menos que las especificaciones del proyecto indiquen lo contrario.

Documentación

Todo el proceso, desde el diseño del muestreo hasta la toma de muestras debe documentarse por la persona que lo lleva al cabo. La bitácora debe contener un conjunto mínimo de datos para poder identificar el sitio de muestreo con exactitud (coordenadas con el GPS, croquis del sitio, paisaje, uso del suelo etc.). En el caso de que se vaya a realizar un muestreo del suelo por horizontes es importante documentar además la información obtenida en la descripción de los perfiles (Siebe *et al.*, 1996).

Levantamientos de suelo

El objetivo del levantamiento de suelos es el conocimiento de su variabilidad, registrando las diferencias de un lugar a otro y como capturar en mapas esta información.

El ordenamiento de los suelos en el espacio es un sistema de cartografía que rompe la continuidad del suelo en unidades espaciales que tienen menos variabilidad en determinadas propiedades del suelo que el continuo o totalidad del suelo.

Al estudiar, clasificar y cartografiar suelos existe una inherente dependencia con la escala de observación. El clima generalmente influye sobre la variabilidad a gran escala determinando diferencias regionales (Brady, 1998), aunque en re-

giones montañosas la temperatura y la precipitación pueden variar a distancias muy cortas, por ejemplo los suelos en pendientes que miran al norte difieren de aquellos de pendientes que miran al sur en una misma localidad. También el material parental determina patrones a escala regional, pero puede haber diferencias a escala local, p.e. por depósitos coluviales al pie de una pendiente o aluviales a lo largo de un río.

A escala semiregional, la variabilidad de muchas propiedades del suelo está relacionada en primer plano, con diferencias en un factor formador del suelo, ésto se observa en litosecuencias, cronosecuencias y toposecuencias. A escala local, las variaciones se dan por pequeños cambios en la topografía y grosor de las capas del material parental o a los efectos de la cobertura vegetal, por ejemplo, la variabilidad en la fertilidad de una parcela.

En cartografía el investigador decide subjetivamente sobre la variación permitida en sus unidades cartográficas que dependen en gran medida del objetivo y con ello de la escala. En el Cuadro 5 se presenta un ejemplo de la relación entre el objetivo y la escala de observación, de ambos se deriva la estrategia de muestreo a seguir.

Cuadro 5

Levantamiento	Escala	Área por 1 cm ²	Observaciones	Linderos
Exploratorio	1:5000000	625 km ²	1/25 km ²	Inferidos
	1:500000	25 km ²	1/50 km ²	
Reconocimiento	1:250000	1 km ²	1/2 km ²	La mayoría inferidos
	1:100000			
Semidetallado	1:75000	6.25 ha	1/12.5 ha	Algunos comprobados
	1:25000			
Detallado	1:20000	1 ha	1/2 ha	La mayoría comprobados
	1:10000			
Intensivo	Mayor a 1:10000	Menos de una ha	Menos de 1/2 ha	Todos comprobados

Relación entre la intensidad, la escala y la exactitud en un levantamiento de suelos (FAO, 1979)

En todos los casos, es necesario el trabajo en gabinete de fotointerpretación y cartográfico, para identificar las unidades de mapeo. Para ello existen diferentes enfoques que manejan métodos y términos diferentes en la definición de las unidades de mapeo (Cuadro 6).

En cada uno de los enfoques varía el componente del paisaje o terreno en el cual se basa el levantamiento y muchas veces está en función de la formación profesional del personal dedicado a la evaluación (suelo, relieve, vegetación).

Sin embargo, el elemento que caracteriza a las unidades frecuentemente corresponde a formas del relieve reconocibles o apreciables a diferentes escalas.

La Figura 5 muestra la metodología a seguir en un levantamiento de suelos. En primer lugar tiene que definirse el objetivo del estudio, ya que éste a su vez determina la información que se requiere, la escala y por lo tanto el número de observaciones que se tienen que hacer en campo (FAO, 1979; Ortiz y Cuanalo 1981; Siebe *et al.*, 1996).

En el trabajo de campo, se sigue primero un diseño de muestreo a juicio identificando los tipos de suelos presentes en el área y la naturaleza general de su patrón de distribución. Este patrón se establece previamente como unidades de fotointerpretación en gabinete. A continuación se describen estos perfiles tipo y para realizar la cartografía se llevan al cabo transectos buscando la comprobación de los linderos de las diferentes unidades de suelos con un muestreo sistemático con barrenaciones y observaciones en cortes de carretera y perfiles a determinadas distancias. Aquí es donde se determina el número de observaciones que deben de llevarse a cabo dependiendo del objetivo del estudio y por lo tanto de la escala (Cuadro 5).

Cuadro 6

UACH Fisiográfico	CSIRO Fisiográfico	ITC-CIAF Holístico	ITC ¹ Geomorfológico	ITC ² Geomorfoedafológico	SEDUE Paisajístico	INEGI Fisiográfico	Nivel
Zona terrestre					Zona		General
División terrestre				Geoestructura			
Provincia terrestre						Provincia fisiográfica	
Región terrestre	Sistema de terreno complejo	Paisaje principal	Provincia de terreno	Ambiente morfogenético	Provincia ecológica	Subprovincia fisiográfica	
Subregión terrestre						Discontinuidad fisiográfica	
Sistema terrestre	Sistema de terreno	Sistema de terreno	Sistema de terreno	Paisaje geomorfológico	Sistema terrestre	Sistema de topofomas	
Faceta	Unidad de terreno	Faceta terrestre	Unidad de terreno	Relieve/modelado/litología/facies	Paisaje terrestre	Topofomas	
Elemento	Faceta de terreno	Ecotopo	Componente de terreno	Forma de relieve	Unidad de paisaje	Elemento de topofomas	Detallado

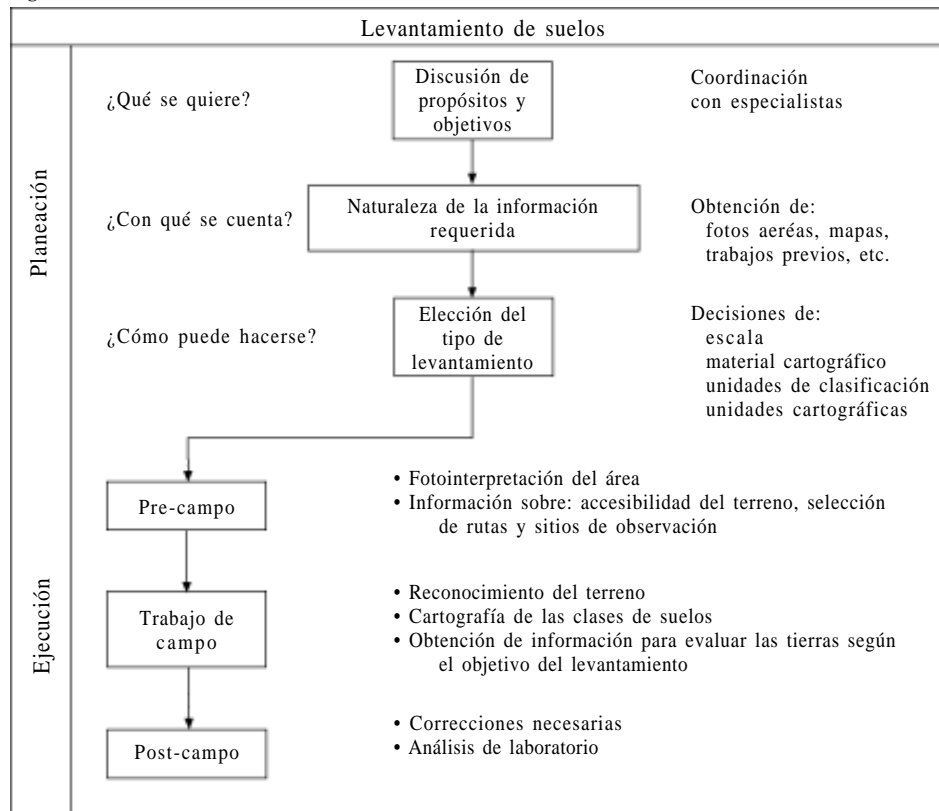
Tipología jerárquica del paisaje según diversas escuelas y corrientes (Mendoza y Bocco, 1998)

UACH= Ortiz y Cuanalo, 1978; CSIRO= Tchristian y Stewart en Tricart y Killian, 1982; ITC-CIAF= Zonneveld, 1979; ITC¹= Van Zuidan, 1986; ITC²= Zinck, 1988; SEDUE, 1988; INEGI= Quiñones, 1987.

Contaminación

La contaminación constituye un aspecto importante en la degradación del suelo. La calidad de un suelo, es decir, su capacidad para desarrollar una serie de funciones, puede verse afectada negativamente por la contaminación. La contaminación puede definirse como la concentración de un elemento o de un compuesto químico a partir de la cual se producen efectos desfavorables, que se traduce en una pérdida de aptitud para determinada función o hace inutilizable al suelo, a menos que se le someta a un tratamiento previo.

Figura 5



Representación esquemática de un levantamiento de suelos (Ortiz y Cuanalo, 1981)

La contaminación se asocia con la entrada de sustancias que son depositadas a través de diferentes vías, el suelo puede ser un receptor primario o secundario según sea una depositación directa (aplicación de plaguicidas, derrames etc.) o

indirecta (p.e. por depositación atmosférica) y sus efectos sobre las funciones que cumple un suelo en el ambiente dependerán en gran medida de la unidad de suelo en la cual sean depositadas, ya que los diferentes tipos de suelo difieren en su vulnerabilidad a ser degradados.

Algunos objetivos asociados a los estudios de contaminación pueden ser: a) La evaluación de la distribución espacial de un contaminante; b) El monitoreo del comportamiento temporal de un contaminante; y c) La identificación de fuentes

Cuando el objetivo de estudio es la evaluación de la distribución espacial de un contaminante, debe cubrirse el área de interés completamente. La información se utiliza para tomar decisiones acerca del uso del suelo o acciones de limpieza. El tipo de información que se necesita no es la concentración de contaminantes en sí, pero sí la de riesgo de exceder o no ciertos valores que son críticos para actuar o para decidir que tratamiento utilizar. Es importante considerar los “niveles de fondo” o “niveles naturales” dados por la génesis del suelo (Bautista, 1999).

Si el objetivo del estudio fuera el monitoreo del comportamiento temporal de un contaminante, se trataría de la identificación de tendencias de los contaminantes en el sentido de su comportamiento con el objeto de prevenir (*a priori*) o de controlar (*a posteriori*) la contaminación. La evaluación *a priori* significa predecir con base en escenarios o por extrapolación de tendencias. *A posteriori* involucra estudios repetidos a una determinada población. Se ejecutan para evaluar cambios en la contaminación de suelos causadas por una fuente o para evaluar la efectividad de medidas de control y saneamiento

La identificación de las fuentes de contaminación requiere información obtenida de un estudio de suelo, por ejemplo, si una fuente puede rastrearse sobre la base de la contaminación espacial a lo largo de transectos o vías de dispersión de los contaminantes. Aunque es igualmente importante la obtención de datos e información histórica sobre las actividades que probablemente tengan relación con las fuentes de emisión.

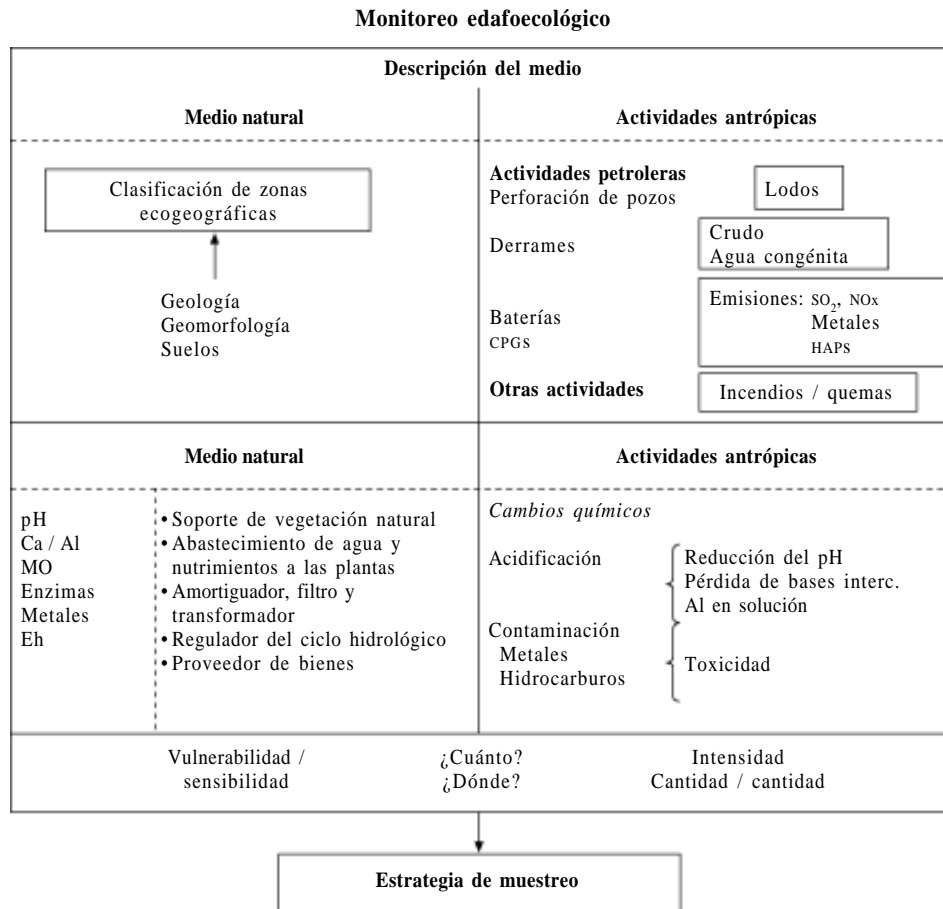
Cada uno de estos objetivos tiene sus propias implicaciones sobre la estrategia de muestreo a elegir, aunque en todos los estudios el objetivo implícito es el de estimar las características del patrón espacial de la contaminación del suelo en una región determinada.

En el monitoreo edafocológico (Siebe, 1999) primero se delimitan unidades ecogeográficas con características homogéneas, se identifican las probables causas de la contaminación y se establece cuales pueden ser los contaminantes que son emitidos, diferenciando por tipo de fuente y determinando sus probables rutas de acceso al suelo (Figura 6). Una vez identificados los contaminantes, se definen sus probables impactos sobre la calidad de los suelos, así como los procesos de degradación más factibles a ocurrir, y se seleccionan variables que pudieran ser indicadoras de dichos impactos y procesos.

El siguiente paso es el de establecer las zonas prioritarias para los estudios detallados (definición de la población) considerando a los suelos que puedan ser vulnerables a ese tipo de contaminación y considerando la elección de sitios control similares a los estudiados para determinar los niveles de fondo para la región. Estos niveles de fondo se refieren a las concentraciones que se encuentran en el suelo de forma natural, por ejemplo los metales heredados del material parental (Alloway, 1995) del cual se formó el suelo, o la presencia de determinados compuestos orgánicos que se producen por biosíntesis (Wang *et al.*, 1999).

La magnitud del impacto a escala local se evalúa realizando muestreos dirigidos partiendo de la fuente a lo largo de transectos, y a escala regional, comparan-

Figura 6



Monitoreo edafocológico para evaluar el efecto de las actividades petroleras.

do los valores medios obtenidos de los diferentes compuestos en zonas bajo influencia de los contaminantes, con valores medios obtenidos en zonas lejanas a actividades petroleras (zonas “control”). La severidad del impacto se determina seleccionando bioindicadores que se miden tanto en la zona de impacto como en las zonas control.

Schulin y colaboradores (1994) indican que la mejor estrategia es proceder en multietapas como se muestra en la Figura 7, que resume los pasos de las estrategias más apropiadas para la toma de muestras y con ello cumplir con los tres objetivos mencionados. El primer objetivo está relacionado con la elaboración de un inventario que cubra toda el área de interés o con el mapeo de contaminantes; el segundo con la evaluación de efectos y el tercero con el establecimiento de las causas. Estos dos últimos se engloban en el tipo de estudio “evaluaciones de efectos” ya que se relacionan entre sí, porque la detección de efectos se puede referir con respecto a las fuentes, a las vías de transferencia de contaminantes o su destino final. En todos los casos la señal que se debe detectar es la variación controlada por los efectos de la contaminación. La primera etapa es evaluar la información existente. Si el análisis de esta información es suficiente para tomar una decisión, entonces el estudio termina ahí, si no el estudio continúa y se elige la estrategia de muestreo, que se deriva del análisis del problema y de la formulación del objetivo.

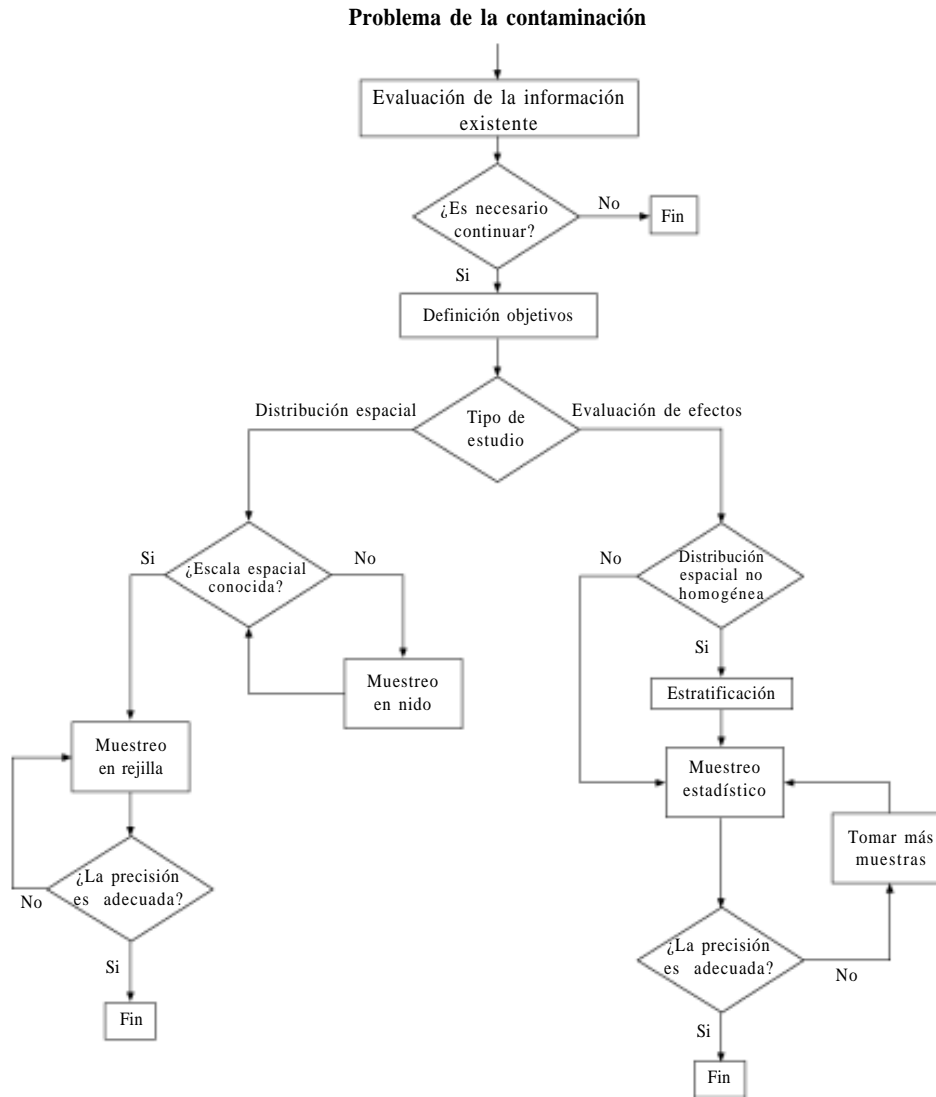
En el caso de la distribución espacial que implica la interpolación de valores medidos o estimados entre puntos, se recomienda la interpolación geoestadística o «kriging» (Webster y Oliver, 1990). En el kriging ordinario se asume que las medias y las varianzas de las diferencias entre puntos vecinos, dependen solamente de la separación en distancia y dirección, pero no de la posición absoluta. Si esta suposición es cierta, entonces el kriging provee interpolaciones o predicciones no sesgadas con una varianza mínima.

Si la varianza de las interpolaciones es muy grande para alguna de las partes de la región de muestreo, entonces el muestreo se puede intensificar para obtener la precisión deseada.

Para el kriging se requiere el uso de variogramas o su equivalente, la función de covarianza. Para minimizar costos en la estimación de variogramas se recomienda proceder en etapas:

- Llevar al cabo un muestreo preliminar en forma de nido, para obtener una visión general de la región y determinar la escala espacial de la variación, si es que no se conoce.
- Llevar al cabo un muestreo en rejilla regular diseñado sobre la base de la variación de la escala espacial.

Figura 7



Esquema general de los pasos a seguir en una investigación regional de contaminación de suelos.

La investigación y con ello el muestreo se termina cuando es suficientemente preciso, esto es, que la información obtenida permita tomar las decisiones con la precisión requerida, dependiendo de la escala de observación.

En el caso de la evaluación de los efectos de contaminantes con una distribución espacial no homogénea, en particular gradientes o discontinuidades, la región debe estratificarse de acuerdo al patrón de distribución esperado. Cada estrato se muestrea utilizando algún diseño de muestreo al azar para evitar sesgos. Los diferentes estratos pueden entonces compararse (p. e. análisis de varianza y regresión) para evaluar las tendencias.

Diagnóstico de la fertilidad

El diagnóstico de la fertilidad del suelo se realiza mediante el análisis químico de muestras de suelo y plantas. Por medio del análisis de suelo es posible conocer la cantidad de abastecimiento de nutrimentos que puede proporcionar el suelo a los cultivos. Un buen diagnóstico de la fertilidad del suelo es importante en la elaboración de programas de fertilización y manejo de las parcelas, lo cual redundará en la producción agrícola y en la conservación del ambiente.

Una vez teniendo claro el objetivo del estudio, se inicia la evaluación de la fertilidad con la delimitación de las áreas de estudio que se consideran homogéneas en función tanto de sus características climáticas, geológicas, morfológicas, topográficas, como las propias del perfil del suelo: coloración, humedad, nivel freático, textura y estructura, y las del cultivo, su desarrollo, forma de manejo (riego, labranza fertilización). Si se desconocen las características del suelo que se está trabajando, se recomienda además la descripción del perfil del área.

Estas áreas homogéneas pueden ser de distinto tamaño, desde unos metros cuadrados hasta varias hectáreas si el territorio es muy uniforme. En este sentido hay que recordar que la heterogeneidad del suelo, en función de sus contenidos nutritivos, se manifiesta en una superficie de un metro cuadrado tanto como en una hectárea.

Una vez que se establecieron las áreas homogéneas se procede a tomar una muestra compuesta y una réplica, de cada una de éstas áreas. Por la heterogeneidad del suelo, aun dentro del área homogénea, se sugiere la técnica de formar una sola muestra compuesta por un número comprendido entre 15 y 40 para obtener resultados confiables para toda el área muestreada (Cobertera, 1993; Ramírez, 1998). Webster y Oliver (1990) recomiendan formar una muestra compuesta con 16 submuestras, éstas se toman con un diseño estadístico.

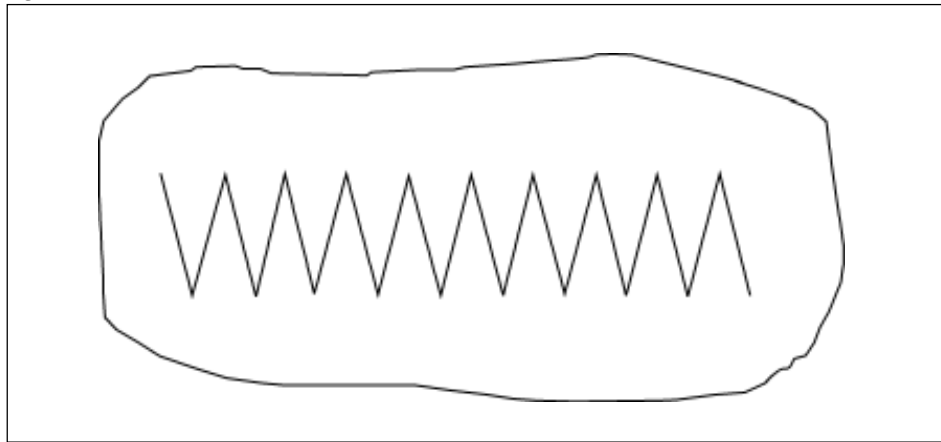
Se toman submuestras correspondientes a la capa arable (horizonte Ap), que es en donde principalmente tienen lugar todos los procesos responsables del nivel de

fertilidad de los suelos, a excepción del contenido de nitratos para lo cual es preciso tomar las submuestras a unos 60 cm de profundidad para obtener datos que se puedan correlacionar con la respuesta nitrogenada de las plantas (Cobertera, 1993).

Si el objetivo son cultivos de árboles se toman adicionalmente otras submuestras más profundas considerando los horizontes hasta alcanzar el horizonte C.

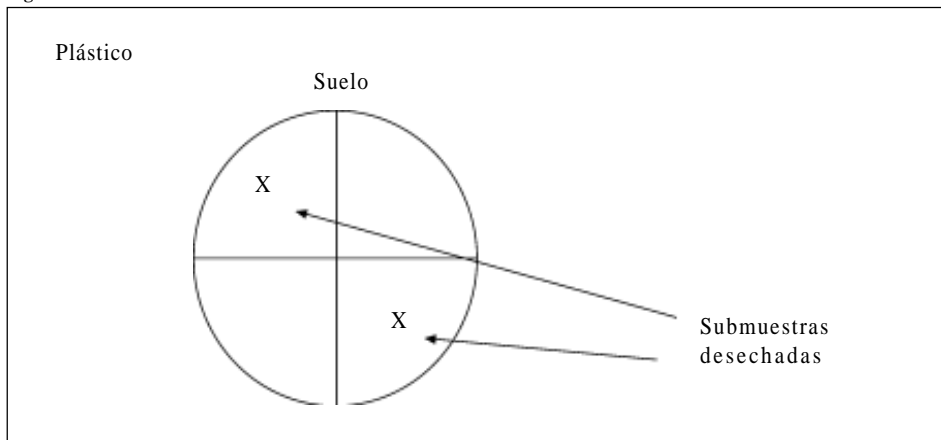
La forma más común de la toma de muestras es en forma sistemática en zig-zag, dentro de cada una de las áreas, con varios recorridos en zig-zag (Henríquez *et al.*, 1998) (Figura 8).

Figura 8



Toma de muestras en zig-zag en el cual se toma una submuestra por cada vértice.

Figura 9



Disminución del tamaño de la muestra compuesta por cuarteo

Las submuestras se van colocando dentro de un recipiente limpio (balde, cubeta, bote, saco o costal), al terminar la toma de muestras, se sacan las piedras y hojarasca (raíces grandes, tallos, etc.). Los terrones se desmenuzan con la mano y el suelo se mezcla. Posteriormente, se efectúa el cuarteo, que consiste en la colocación del suelo sobre un plástico dividiéndose en cuatro partes, de las cuales, dos de extremos opuestos son eliminadas. Las dos restantes, se vuelven a mezclar y cuartear, hasta reducir la muestra a un kilogramo (Henríquez *et al.*, 1998) (Figura 9).

La toma de muestras en experimentos de fertilidad se realiza al inicio del cultivo, aún cuando la planta no absorba todos los nutrientes asimilables es importante conocer el contenido potencial de iones disponibles para el cultivo.

En el supuesto caso de no contar con información sobre la parcela, en la identificación de las zonas homogéneas pueden utilizarse plantas que responden a las diversas calidades del suelo, como el maíz, los tubérculos, algunas leguminosas anuales. Las diferencias en la producción de esas plantas pueden ser indicadoras de diferencias a nivel de suelo y servirán para identificar las diversas áreas al interior de la parcela.

Otras plantas, como el pasto, algunas leguminosas y algunas arvenses responden al clima y a otros factores, lo cual impide utilizarlas como indicadoras de la heterogeneidad espacial del suelo, como por ejemplo, *Mucuna deerengianum* responde más intensamente al clima, esta planta puede crecer en suelos someros, pedregosos, rocosos, y en suelos profundos; en suelos ácidos, neutros y básicos, pero es muy sensible al contenido de precipitación pluvial, por ello, no sirve como planta indicadora de diferencias a nivel de suelo.

Evaluación de técnicas agrícolas

Las prácticas agrícolas, como la labranza, riego, fertilización, aplicaciones de abono, entre otras, modifican las propiedades del suelo. A menudo, se requiere evaluar su efecto tanto en el mismo suelo como en los cultivos.

Siendo tan diversas las prácticas agrícolas, solo se mencionarán algunas recomendaciones generales para la toma de muestras.

- Considerar la profundidad de influencia de la práctica agrícola de manejo de suelo. En suelos someros (menores de 30 cm) en los que no se realiza labranza ni ningún otro tipo de práctica agrícola que involucre el movimiento del suelo, debe considerarse la toma de muestra de los primeros 5 cm, debido a que es allí donde se presenta una gran cantidad de procesos biológicos que

ocasionan fuertes diferencias con el suelo de mayor profundidad. Si en el estudio de la influencia del cultivo de distintas plantas, se tomaran muestras de suelo de la “capa arable” a 20 ó 30 cm, se perdería información valiosa contenida entre 0 y 5 cm de profundidad ya que se “diluiría” el efecto con la mayor cantidad muestra mezclada.

- Identificación del disturbio (ceniza, compactación, mezcla de horizontes, salinización, etc.)
- Localización lateral del disturbio (sobre el surco, en la ladera del surco o en el canal del surco; efecto del riego, labranza, destronque, etc.)
- En el caso de parcelas agrícolas debe considerarse que las muestras sobre la cima, flanco y fondo del surco pueden ser diferentes entre si (Martínez, 1979 en: Etchevers, 1985) y muy diferentes entre las “calles” entre las “eras”.
- En experimentos con cultivos de cobertera el muestreo de suelos depende de la disposición de las plantas, de la labranza, de la posición en el surco, en este caso se recomienda un muestreo “a juicio”.
- Los suelos cercanos a los caminos, líneas eléctricas, carreteras, canales etc. deben evitarse debido a que están sujetos a contaminación y/o perturbación (Etchevers, 1985).
- La época de muestreo, es fuente de variación por muchas causas, entre ellas, lavado de elementos solubles; aumento en la descomposición de la hojarasca y por lo tanto en la generación de compuestos por la mineralización, actividad de la fauna edáfica, actividad de las plantas.

Referencias

- Alloway B. 1995. *Heavy metals in soils*. Blackie Academic y Professional, London, UK.
- Arnold R. 1990. Pedosphere. In: Arnold R., Szabolcs I. y Targulian V. (Eds.). *Global soil change*. IIASA-ISSS-UNEP, International Institute for Applied Systems Analysis. Laxenburg, Austria.
- Bautista-Zúñiga F. y Estrada-Medina H. 1998. Conservación y manejo del suelo. *Ciencias*, 50: 50-55.
- Bautista-Zúñiga F. 1999. *Introducción al estudio de la contaminación del suelo por metales pesados*. Universidad Autónoma de Yucatán. Yucatán, México.
- Brady N. y Weil R. 1998. *The nature and properties of soils*. Prentice Hall.
- Cobertera E. 1993. *Edafología aplicada*. Gráficas Rógar, España.
- Dijkerman J. C. 1981. Field description, morphology and sampling of soils. MSc. Course in soil science and water management. Agricultural University. Wageningen, the Netherlands.
- Einax J. W., Zwanziger H.W. y Geiss S. 1997. *Chemometrics in environmental analysis*. VCH-Wiley. EUA.

- EPA/600/R-92/128. 1992. *Preparation of soil sampling protocols: sampling techniques and strategies*. US Environmental Protection Agency. EUA.
- Etchevers J. D. 1985. *Análisis químico de suelos - el por qué de sus fallas*. Serie cuadernos de edafología 4. Centro de edafología, Colegio de Posgraduados, Chapingo, México.
- FAO. 1979. *A framework for land evaluation*. FAO Soils Bull. 42, FAO, Roma, Italia.
- Fortunati G., Banfi C. y Pasturenzi M. 1994. Soil sampling. *Fresenius J. Anal. Chem.*, 348: 86-100.
- Henríquez C., Bertsch F. y Salas R. 1998. *La fertilidad de suelos: manual de laboratorio*. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. Costa Rica.
- Hildenbrand E. y Thurian G. (Eds.). 1996. *Bodenprobenahme und Bewertung von Bodenkontaminationen*. Expert Verlag, Malsheim, Germany. Kontakt y Studium, Band 507.
- ISO/DIS 10381. 1995. Soil quality –Sampling.
- ISO 11074-1. 4. 1996. Soil quality - Vocabulary.
- Mendoza M. y Bocco G. 1998. *La regionalización geomorfológica como base geográfica para el ordenamiento del territorio: una revisión bibliográfica*. Serie Varia, Instituto de Geografía, UNAM, México. 17: 25-55.
- Ortiz-Solorio C. y Cuanalo de la Cerda H. 1981. *Introducción a los levantamientos de suelos*. Colegio de Posgraduados, Chapingo, México.
- Peterson R. J. y Calvin L. D. 1996. Sampling. In: Sparks (Ed.). *Methods of soil analysis*. Part 3. SSSA, Wisconsin, EUA.
- Ramírez F. 1998. *Muestreo de suelos para diagnóstico de fertilidad*. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. Costa Rica.
- Reichert K. y Roemer M. 1995. Probenahme und Untersuchungsmethoden. In: Fachgruppe Wasserchemie der GDCh. VCH, Weinheim. (ed.). *Chemie und Biologie der Altlasten*.
- Schulin R., Webster R. y Meuli R. 1994. *Regional soil contamination surveying*. Federal Office of Environment, Forests and Landscape (FOEFL) Environ. Docum. 25. Bern, Switzerland.
- Siebe Ch., Jahn, R. y Stahr K. 1996. *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo*. Publicación especial No. 4. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México.
- Siebe Ch. 1999: Monitoreo edafoecológico multiescalar. In: Siebe C., Rodarte H., Toledo G., Etchevers J. y Olechko C. (Eds.). *Conservación y Restauración de Suelos*. PUMA, UNAM, México.
- SSSA. Soil Science Society of America. 1997. Glossary of soil science terms. SSSA, Wisconsin, EUA.
- Tan K. 1996. *Soil sampling, preparation and analysis*. Marcel Dekker, New York, EUA.
- Varallyay G. 1990. Types of soil processes and changes. In: Arnold R., Szabolcs I. y Targulian V. (Eds.). *Global soil change*. IIASA-ISSS-UNEP, International Institute for Applied Systems Analysis. Laxenburg, Austria.
- Wang Z., Fingas M. y Page D. 1999. Oil spill identification. *J. Chromath.*, 843: 369-411.
- Webster R. y Oliver M. A. 1990. *Statistical methods in soil and land resource survey*. Oxford University Press. Oxford, Inglaterra.

3

MONOLITOS DE SUELOS

Rafael Más-Martínez*, I. Fernández-Denis*, Rafael Villegas*
y Francisco Bautista-Zúñiga**

Introducción

La degradación de las tierras agrícolas amenaza la capacidad del mundo para producir alimento, estando ya afectadas el 40% de ellas y ocasionando una disminución de la productividad en un 16% de las tierras agrícolas del mundo (PNUD *et al.*, 2001).

En América Latina el 16% del suelo se encuentra afectado por alguna forma de degradación (FAO, 2001). El impacto es mayor en Mesoamérica alcanza el 26% subregional, incluyendo el 74% de la tierra cultivada, al igual que el 11% de los pastos permanentes y un 38% de los bosques. En América del Sur, la degradación afecta el 14% del territorio: un 45% de la tierra cultivada, un 14% de los pastos permanentes y un 13% de los bosques.

La degradación de suelos es como una crisis silenciosa que está avanzando tan rápidamente en América Latina, que pocos países tienen la esperanza de alcanzar una agricultura sostenible en un futuro próximo. Es un problema que, a pesar de estar amenazando la subsistencia de millones de personas en la región, tiende a ser ignorado por los gobiernos y la población en general. Esto se debe a la escasa información que hay del recurso y a la mala economía de los países en cuestión.

En el territorio mexicano el 60% está afectado por la erosión que va de severo a extremo, la pérdida de la fertilidad se encuentra en el 80% de la superficie, los distritos de riego en los que se localizan las mejores tierras agrícolas presentan

* Instituto Nacional de Investigación en Caña de Azúcar, La Habana, Cuba

** Departamento de "Manejo y conservación de recursos naturales tropicales", FMVZ, Universidad Autónoma de Yucatán. México

problemas de salinidad del suelo, asimismo, se cuenta con una gran cantidad de superficie ocupada por zonas áridas y semiáridas en las que avanza la desertificación.

Por otro lado, en México, aún no se cuenta con los mapas de suelos a nivel de reconocimiento a escala 1:250000. La nomenclatura utilizada es una adaptación a la FAO de 1977 que no contiene los nuevos avances en la materia, generados durante los últimos 30 años. La información contenida en estos mapas es una referencia poco detallada para la mayoría de las aplicaciones actuales (SEMARNAP, 2000).

En resumen, los tomadores de decisiones que participan en la administración del espacio físico de la región, así como los productores agrícolas, forestales y pecuarios, nunca han contado con la suficiente información (en cantidad y calidad) que les permita tener los elementos de juicio suficiente para fundamentar la toma de decisiones.

Más aún, en el México no se cuenta con una colección de monolitos de suelos, ni mucho menos con un museo que contenga la información básica sobre este recurso natural no renovable.

Esta situación de dispersión de la información y el escaso conocimiento de los suelos, se presenta, entre otras razones, por el alto costo de los estudios pedogénicos (Ortíz, 1990; Zinck, 1990; Valenzuela y Zinck, 1994) y por la escasa cantidad de profesionistas que trabajen en el área, lo cual ha ocasionado que las prácticas de manejo agrícola del suelo se realicen sin el conocimiento de sus propiedades, así como de los procesos que en él operan, lo cual origina: la presencia de problemas de degradación edáfica; sobreuso de insumos agrícolas y deficiente disposición de desechos que pudieran llegar a generar problemas de degradación del suelo y contaminación de los cuerpos de agua aledaños.

Por los problemas arriba mencionados, se hace necesaria la elaboración de colecciones de suelos (monolitos) en la que se muestren los perfiles con sus horizontes, producto de los procesos de formación influenciados por los factores formadores del suelo, lo cual sería de mucha utilidad en investigación, docencia y divulgación sobre el manejo y conservación del suelo, tal como se tiene en otros países (Jamagne *et al.*, 1994; Chang *et al.*, 1994).

En particular, la elaboración de colecciones de monolitos de suelos es de gran importancia en la generación de una mejor conciencia de la población en general sobre el manejo y conservación de dicho recurso. Son de indudable valor didáctico para estudiantes de todos los niveles escolares.

En cuestiones de uso práctico, los productores agropecuarios pueden utilizar la información generada con y contenida en los monolitos para la toma de decisiones.

Una colección de monolitos es una herramienta de investigación de fácil consulta y acceso, que permite y facilita la actualización de la información de las

bases de datos de suelo en cuestiones de clasificación y génesis de suelos, así como en aspectos de investigación agrícola, pecuaria, forestal, ambiental y en el ordenamiento del territorio en general.

En este documento se describe la técnica de preparación de monolitos de suelo basado en el trabajo de Van Barren y Bommer (1982), en la experiencia del “Centro internacional de referencia y datos sobre suelos” (ISRIC), en la experiencia del “Centro de referencia de suelos de Cuba” y en la experiencia de la “Colección de monolitos de suelos y bases de datos de la Península de Yucatán”.

Los objetivos son: 1) Informar sobre la importancia de los levantamientos de suelo; y 2) Describir la técnica de preparación de monolitos, ambas ideas con la idea de que sirvan de guía para la formación de colecciones científicas de suelos en México.

Selección del sitio

La primera actividad consiste en la selección del sitio en el que se abrirá la calicata.(o cavidad que se realiza en el suelo para la observación y descripción del perfil). Para ello, es necesario tomar como información de base, los levantamientos de suelos ya realizados o, en caso contrario, analizar la cartografía existente, así como las fotografías aéreas, modelos digitales del terreno y demás información cartográfica con el fin de identificar las unidades de mapeo y la selección de los sitios de muestreo que sean representativos del área en estudio. En el caso de que la colección de monolitos se realice a la par de un levantamiento de suelos, se recomienda seguir la estrategia descrita en la Figura 1.

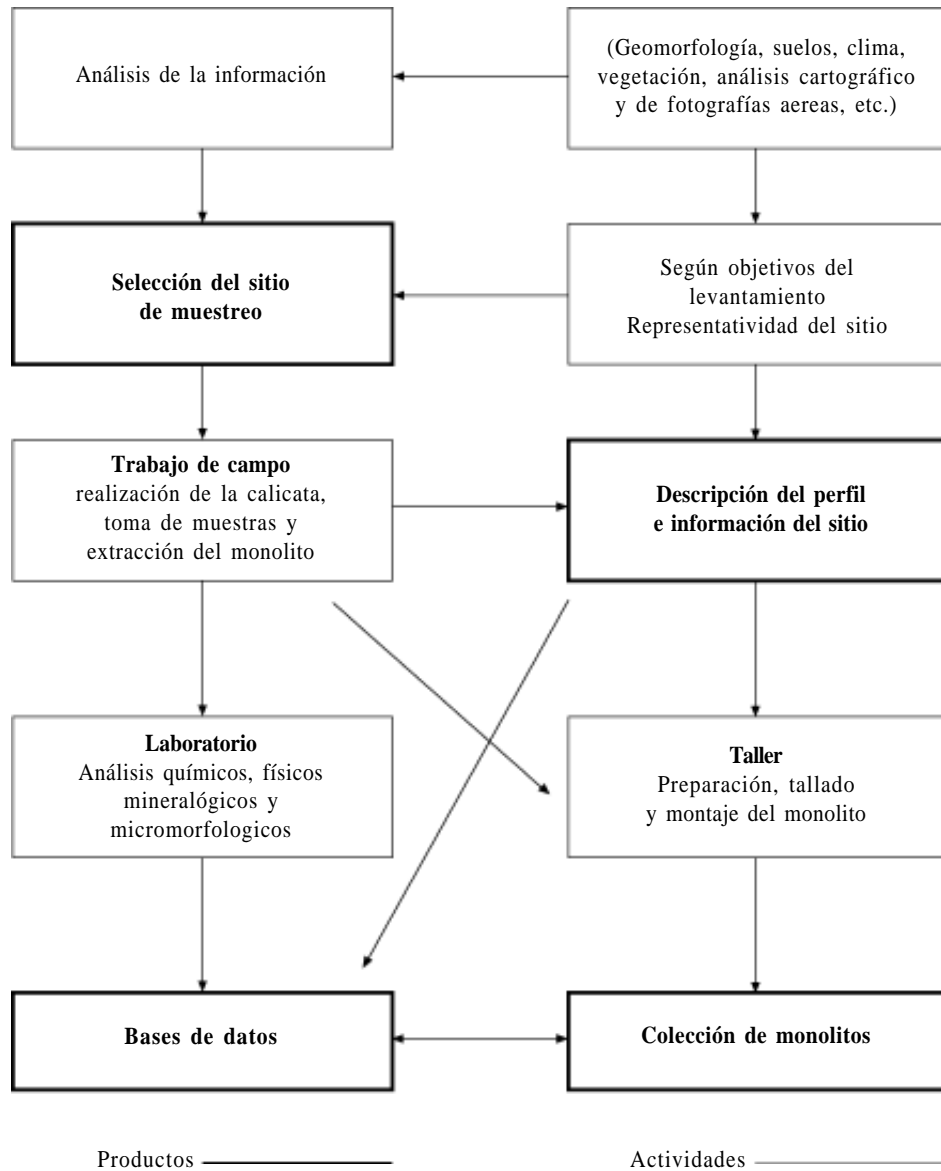
Se recomienda que la selección de los sitios de muestreo se encuentren lo menos perturbado posible, preferentemente que sean zonas vírgenes. Los sitios de muestreo deberán localizarse geográficamente con un geoposicionador.

Trabajo de campo

Elaboración de la calicata

Para el estudio de la morfología del perfil es necesario realizar una calicata en los suelos representativos de la unidad de mapeo. Para ello, se dibuja un rectángulo de 1.5 de ancho por 3 m de largo sobre la superficie del suelo, tratando de que uno de los lados de 1.5 m quede expuesto al sol al término de la calicata, tanto para la descripción del perfil como para la extracción del monolito.

Figura 1



Metodología general para la elaboración de una colección de monolitos

En cuanto a la profundidad de la calicata, se recomienda que sea de un máximo de 1.5 m de profundidad, cuando esto fuera posible. En suelos someros la calicata debe realizarse hasta donde se considere suficiente para la clasificación del suelo, recordando que la profundidad efectiva es una característica importante en la clasificación de tierras.

Se recomienda contar con cajas de tres tamaños de largo, como 1.5 m, 1.0 m y 0.5 m. En la realización de la calicata se recomienda utilizar palas rectas, curvas y picos (Anexo 1). La pala recta se utiliza para realizar cortes en las paredes de la calicata de manera que las paredes queden rectas o lisas, además, la pala recta sirve para sacar bloques de suelo enteros en suelos arcillosos. Los bloques de suelo se sacan a manera de escalones, es decir, primero se introduce la pala de manera recta hacia abajo, posteriormente se introduce la pala de manera tangencial al primer corte. Se debe tener el cuidado de que el tamaño de la calicata no disminuya conforme se avanza en la excavación.

La descripción del perfil del suelo se realiza de acuerdo a la guía para la descripción y codificación de datos de suelo (Van Warveren y Bos, 1987; Siebe *et al.*, 1996). En la identificación de los horizontes, se recomienda tener en cuenta los cambios en el color, consistencia, textura, estructura, presencia de concreciones, raíces y tipo de minerales y demás rasgos pedológicos.

Los cambios en color pueden indicar la presencia de algunos minerales como los óxidos de hierro y manganeso, la cantidad de materia orgánica y el drenaje.

Otros minerales como el carbonato de calcio, sulfato de calcio, micas, y alofano pueden identificarse de manera visual y con análisis sencillos de campo como el uso de HCl 10% en el caso del carbonato de calcio y NaF en el caso del alofano; sin embargo, la identificación de otros minerales requiere de estudios especiales.

La densidad aparente indica la presencia de capas endurecidas, materiales amorfos, cantidad relativa de materia orgánica y procesos de intemperismo

Los cambios en la textura pueden estar relacionados con cambios en la capacidad de intercambio de cationes, tipos de erodabilidad y en la dinámica del agua.

La estructura del suelo se encuentra relacionada con la dinámica del agua y con el uso de arado.

Los cambios en el valor de pH pueden estar asociados a los minerales secundarios y a la actividad biológica.

Los invertebrados edafícolas están asociados al proceso de descomposición y al transporte de materiales en el perfil.

Se realiza un registro fotográfico del paisaje, en el que se incluye la calicata, perfil, detalle de los rasgos pedológicos, vegetación y cultivos, que será expuesta junto con el monolito.

Las muestras de suelo se toman de los horizontes inferiores a los superiores, para evitar la posible contaminación de los horizontes y deben estar bien identificadas.

Las muestras de suelo por cada horizonte, son enviadas al laboratorio para su caracterización analítica, mediante análisis químicos, físicos, micromorfológicos y mineralógicos, lo más completa posible, tal y como lo recomienda la “Base mundial de referencia del recurso suelo” (WRBSR, 1999). Se recomienda, en caso de existencia, la inclusión de otro tipo de clasificaciones locales o autóctonas, ya que en la actualidad están siendo revaloradas y se ha reconocido su importancia en cuestiones de manejo del suelo. Esta información deberá incluirse en una base de datos digital para ser procesada y enviada a la colección de monolitos.

Extracción del monolito

Para la toma del monolito primeramente se alisa bien la cara de la calicata donde se va a moldear la columna de suelo y se marcan, con un cuchillo, las dimensiones exteriores de la caja sobre la superficie lisa usando su tapa.

Posteriormente se comienza a cortar el suelo con cuchillo, espátula, cincel y piqueta de geólogo, quitando cuidadosamente el suelo de su alrededor, hasta lograr tallar una columna, la que sobresale claramente del perfil (Figura 2).

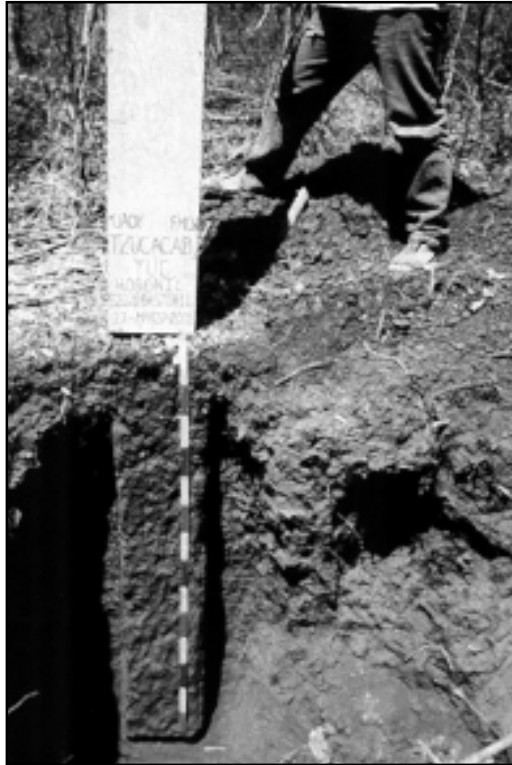
Las raíces se deben cortar con tijeras podadoras, luego se traza sobre la columna de suelo las dimensiones interiores de la caja y se procede a moldearla y ajustar, las dimensiones de la columna, rebanando sus caras laterales con un cuchillo o espátula, la columna terminada permanece unida al perfil y su espesor supera en algunos centímetros la profundidad de la caja a usar.

Si el material de suelo presenta suficiente cohesión se puede seccionar también la base de la columna, la cual debe caber ajustadamente en la caja. Esta se empuja suave y lentamente contra la columna, quedando el monolito en su interior. Si el suelo es demasiado suelto hay que evitar cortar la columna en su base pues hay riesgo de que se caiga.

La caja se forra por dentro con plástico, para proteger el suelo de desecamiento durante su transporte y almacenaje, al mismo tiempo evita que el monolito se adhiera a las paredes de la caja durante la impregnación.

La caja debe mantenerse firmemente en posición vertical, sosteniéndola en la base con un cincel largo y empujándola contra la columna mediante una barreta. La separación del suelo se realiza comenzando por la parte superior, se debe tener cuidado de no dañar la columna. En la medida en que el suelo es removido detrás de la columna, el monolito y la caja deben ser inmediatamente envueltos con vendas de tela o gasa. Dichas vendas tienen la función de evitar que el monolito

Figura 2



Monolito de un Luvisol unido al perfil y separado de la base

se fragmente al separarlo del suelo. A partir de la mitad de la columna es, muchas veces posible continuar y concluir la operación de excavación y separación de la columna del suelo mediante el uso de una espada o barreta. El monolito resultante tiene aproximadamente de 25-30 cm de espesor.

En suelos compactados se recomienda humedecer el suelo para facilitar la excavación al rededor del monolito.

Una vez separado del suelo, se retira la barreta y el monolito se traslada hacia el exterior de la calicata y se coloca en posición horizontal y se procede a quitar las vendas y el material innecesario, de forma tal que el suelo quede al ras de la caja utilizando cuchillos, machetes y espátulas. En el caso de que la caja fuera más grande, los espacios vacíos se rellenan con bolsas de suelo o poliespuma para que la caja esté completamente llena y no de lugar a movimiento del monolito y a su posible fragmentación (se debe tener cuidado de no mezclar horizontes

del perfil) Después que ha sido convenientemente alisado, se cubre el perfil con un plástico y luego se atornilla la tapa. Se recomienda tomar dos monolitos por cada suelo.

El monolito se transporta dentro de su caja con mucho cuidado utilizando colchonetas. Un monolito de 1.5 m de largo por 0.15 m de ancho y 0.10 m de grosor pesa al rededor de 50 kg, que puede ser cargado por una o dos personas. En las condiciones arriba mencionadas, el monolito puede ser transportado por aire, mar y tierra, teniendo cuidado de evitar la vibración brusca y continua de la caja.

Trabajo de taller

Preparación, tallado y montaje

Una vez en el taller, los monolitos se ponen a secar, colocándolos de manera vertical con una ligera inclinación y recargados en alguna pared (Figura 3).

Se deja secar el suelo hasta que aparecen pequeñas grietas, favoreciendo así la penetración de la laca. Por el hecho de que muchas lacas se “blanquean” cuando se aplican a un suelo demasiado húmedo, se debería realizar un pequeño ensayo antes de someter todo el perfil a tratamiento. El secado tarda algunos días dependiendo del clima (humedad y temperatura de la atmósfera) y la capacidad de retención de humedad del suelo. La viscosidad y tiempo de endurecimiento son también dependientes de la temperatura.

Para mejorar la profundidad del agente preservante es conveniente perforar el material arcilloso con un pequeño taladro con el que se abren orificios (1-2 cm²) de 0.5–1 mm de diámetro y de 15–20 mm de profundidad. Este procedimiento incrementa considerablemente el área superficial a través de la cual penetra el impregnante al suelo hasta la profundidad deseada. Además, las perforaciones evitan la formación de grietas grandes (que dificultan el tallado) y favorecen la formación de muchas grietas pequeñas.

Se preparan disoluciones de laca en thinner de diferentes concentraciones (en dependencia de la textura y porosidad del suelo) y se aplican al suelo con un pulverizador o vertiéndola directamente una o más veces, hasta que el suelo se cubre de una película muy fina del impregnante lo cual suele requerir de algunos días. La dilución de la laca disminuye con las aplicaciones consecutivas (Cuadro 1).

La última aplicación consiste en laca sin diluir. La laca es un producto tóxico que debe ser utilizado con mucho cuidado, se recomienda el uso de equipo de seguridad como máscaras contra gases, cubre bocas y lentes, así como trabajar en lugares ventilados.

Inmediatamente después de la aplicación de la laca concentrada (100%) y en esa misma cara del monolito, se coloca una tela de yute de igual dimensión externa que el monolito (25 cm de ancho y de largo tanto como la profundidad del suelo), con la finalidad de aumentar la superficie de contacto entre el suelo y la tabla de madera (soporte). Sobre el yute se repite la aplicación de laca sin diluir o de cola (de secado rápido) y se adhiere una tabla de madera con un centímetro de grueso, que tiene la misma dimensión que el monolito. El monolito se prensa utilizando de ocho a doce prensas por ejemplar, según su tamaño y se deja secar. El prensado tiene por objeto pegar la tabla, el yute y el monolito.

Al cabo de unos días (hasta el endurecimiento completo de la cola y la laca), se retiran las prensas y se invierte la caja, sirviendo ahora la madera antes pegada como base de soporte del monolito. La tapa es desatornillada y junto con el marco lateral es retirada, quedando el monolito al descubierto. Se coloca horizontalmente sobre el carro con ruedas en el que se transportará o sobre el banco en el que se tallará y preparará. El secado, la impregnación con laca y el prensado dura alrededor de 30 días, aunque en ocasiones se prolonga un poco más dependiendo de los factores climáticos y de suelo anteriormente señalados.

Con la ayuda de un compresor de aire se eliminan las partículas más finas y con los instrumentos de dentista se quitan algunos agregados del suelo para dejar al descubierto los detalles del monolito, como la estructura, la porosidad estructural, los cutanes, concreciones, raíces, túneles de lombrices, etc. con la finalidad de apreciar un monolito en todo su esplendor. El material de suelo no impregnado puede ser removido y eliminado o conservado, para reparar eventuales daños posteriores.

Al final, para consolidar la superficie visible de la forma más natural se impregna el monolito con una solución diluida de un agente transparente (que no brille). El poli-metilacrylato es muy usado para este propósito.

Cuadro 1

Suelos	Primera aplicación	Segunda aplicación	Tercera aplicación	Cuarta aplicación
Textura arcillosa	2 : 8	3 : 7	5 : 5	Laca sin diluir
Textura gruesa	3 : 7	5 : 5	Laca sin diluir	

Relación laca/solvente por aplicación según textura del suelo

El tiempo de tallado y acabado es de cinco días. Durante el acabado, se puede perder gran cantidad de suelo, quedando el monolito de un grosor de alrededor de cuatro centímetros. El tallado se realiza con instrumentos de dentista, la idea es la de exponer los rasgos morfológicos del perfil de manera que se vean lo más natural posible (Figuras 4 y 5).

El monolito con su soporte es colocado en la parte lateral de un panel o tabla de triplay de 150 cm de largo, 25 cm de ancho y de 1 a 1.5 cm de grosor. El triplay debe estar previamente pintado de color negro mate. El monolito es fijado con seis tornillos por la parte posterior, los cuales penetran aproximadamente 1 cm (durante esta operación debe presionarse el monolito contra el panel, para que los tornillos no levanten el bloque compacto de suelo).

Cerca del monolito se coloca una regla que tiene por objetivo la observación del espesor de los horizontes. El resto de la superficie del panel es ocupado por fotografías del perfil, paisaje y algún otro detalle que se desee mostrar por ejemplo, acercamientos de los horizontes con los colores al momento de la realización de la calicata (Figura 6).

En la misma tabla se monta la información sobre las clasificaciones del suelo (internacionales, nacionales y locales), breve descripción del perfil, datos climáticos (climograma), la caracterización analítica, así como la interpretación de la misma, haciendo énfasis en los factores limitantes para el uso del suelo. También se recomienda la colocación de un mapa en el que se indique la localización del suelo representado en el monolito (Figura 7).

Figura 3



Monolitos en etapa de secado. Nótese la inclinación de las cajas

Figura 4



Tallado del monolito en el taller

Figura 5



Descubriendo los razgos pedológicos del detalle

Figura 6



Monolito montado y en exposición utilizando material didáctico

Exposición

Es deseable que se coloque un diagrama del perfil con los horizontes e información analítica en el mismo nivel, principalmente la referente a las propiedades diagnósticas necesarias para la clasificación.

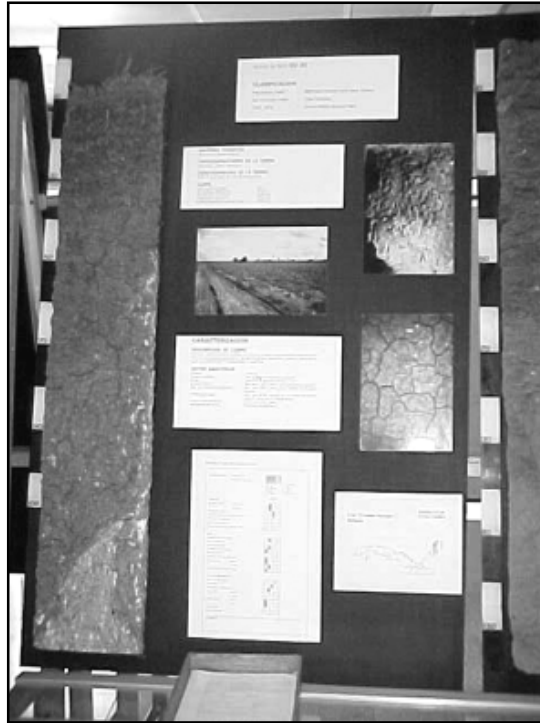
A menudo, se utiliza un diagrama con el que se indica la calidad de la tierra, con base en el clima, el suelo y el manejo de la tierra, como el del siguiente ejemplo del cuadro 2.

La tabla de triplay con la información, se coloca sobre estantería de aluminio con una altura de 70 cm y del diseño acorde con la infraestructura de cada lugar, como en la Figura 10.

La exposición de la colección de monolitos se acompaña de información impresa de los datos analíticos, evaluaciones técnicas y mapas (Figuras 8 y 9).

La colección de monolitos de China se expone con los monolitos dentro de su caja de extracción, únicamente recargados o inclinados en una pared, en la posición de secado. Esto permite alargar la vida útil de los monolitos debido a que está mejor protegido; sin embargo, se dificulta el manejo y la exposición.

Figura 7



Exposición de un monolito, conteniendo mapa, fotografías con rasgos pedológicos de detalle, diagrama de evaluación de tierras, fotografía del paisaje y descripción del perfil

Figura 8



Exposición de monolitos dentro de su caja. Colección China

Figura 9



Monolitos en exposición con información impresa adicional

Figura 10



Exposición de la colección de suelos de Cuba

Cuadro 2

Disponibilidad	ma	a	m	b	mb
Riesgo/ Limitación	np	l	m	s	ms

ma= muy alto; a= alto; medio; b= bajo; mb= muy bajo; np= no presente; l= ligero; m= medio; s= severo; ms= muy severo.

Diagramas para la evaluación del suelo/calidad de tierra

Evaluación del clima

Radiación total					
Largo del día					
Régimen de temperatura					
Riesgos climáticos					
Tamaño de la temporada de lluvias					
Riesgos durante la temporada de lluvias					

Evaluación del suelo

Humedad del suelo potencial total					
Disponibilidad de oxígeno					
Disponibilidad de nutrientes					
Capacidad de retención de nutrientes					
Condiciones de enraizamiento					
Condiciones que afecten la germinación					
Exceso de sales					
Exceso de sales de sodio					
Toxicidad del suelo (p.e. sat de Al)					

Evaluación del manejo de la tierra

Preparación inicial de la tierra					
Trabajo invertido					
Potencial para mecanización					
Facilidad de acceso actual					
Facilidad de acceso potencial					
Riesgo de erosión por agua					
Riesgo de erosión por viento					
Riesgo de inundación					
Enfermedades y plagas					

Referencias

Chang R, Villegas R., Kauffman S., Marin R., Balmaseda C., Arcia F. y Ponce de León D. 1994. Establishment in Cuba of the National soil collection and its database within NASREC Programme. Symposium A world reference base for soil resource. Volume 6b. Word Congress of soil science. Acapulco, Gro., México.

FAO. 2001. El enfoque de planificación participativa para enfrentar la degradación de tierras en América Latina. <http://www.fao.org/WF/FS/s/img/protec-s>

Jamagne M., King D., Le Bas C., Daroussin J., Vossen P. y Burrill A. 1994. Elaboration and use of the european soil geographical data base. Symposium Soil data need for expressing land qualities at different scales. Volume 6b. Word Congress of soil science. Acapulco, Gro., México.

Ortíz C. A., Pájaro D. y Ordáz V. M. 1990. *Manual para la cartografía de clases de tierras campesinas*. Serie cuadernos de edafología 15. Centro de edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México, México.

PNUD, PNUMA, Banco Mundial y WRI, 2001. Estudio Global Revela Nuevas Señales de Peligro. http://www.wri.org/press/goodsoil_spa.html

SEMARNAP. 2000. Proyecto norma oficial mexicana PROY-NOM-023-RECNAT-2000, que establece las especificaciones técnicas que deberá contener la cartografía y la clasificación para la elaboración de suelos. SEMARNAP, México DF, México.

Siebe Ch., Jahn, R. y Stahr K. 1996. *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo*. Publicación especial No. 4. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México.

- Valenzuela C.R. y Zinck A.J. 1994. Information technology requiring soil data. Symposium: Utilization of soil information in systems modeling for sustainable agriculture and global climate change. 15th World congress of soil science. Acapulco, México.
- Van Waveren E.J. y Bos A. B. 1987. Guidelines for the description and coding of soil data. Technical paper. International Soil Reference and Information Centre. Wageningen, The Netherlands.
- Van Baren J. H. V. y Bomer W. 1982. Procedimientos para la Colección y Preservación de Perfiles de Suelo. Publicación Técnica No. 1. ISRIC, Wageningen. The Netherlands.
- ISSS, ISRIC and FAO. 1999. World reference base for soil resources. Informes sobre recursos mundiales de suelos 84. FAO, ISRIC and ISSS. Roma, Italia.
- Zinck A. 1990. Soil survey epistemology of a vital discipline. International Institute for aerospace survey and earth science. Enchede, Países Bajos.

Anexo 1. Materiales para la construcción de monolitos

1. Cajas de madera para monolitos (1.5 m de largo, 0.25 m de ancho, 0.1 m de alto) unidas por tornillos. Considere la posibilidad de tener cajas de 1.0 m y 0.5 m de largo para los suelos con menor profundidad.

En el caso de que el suelo sea poco cohesivo o muy blando, como el Arenosol o Gleysol e Histosol, respectivamente, conviene tener cajas de lámina de hierro para insertar la caja completa empujándola y así facilitar el trabajo y coleccionar el monolito completo.

2. Caja de herramientas (juego de desarmadores, trinchas, espátulas, cinceles para madera, martillo de geólogo, sierra de mano, taladro eléctrico y barrenas finas, guantes de goma, prensas pequeñas)
3. Vendas gruesas
4. Tela de felpa o tela de Yute
5. Gasas quirúrgicas
6. Colchonetas para el transporte de monolitos
7. Cintas métricas de costurera (10 de 1.5 m de largo)
8. Carro con ruedas para transporte de monolitos
9. Compresor, pistola de aire, pistola de pintar.
10. Laca (base nitrocelulosa)
11. Cola blanca o acetato
12. Dermoplast o conservante
13. Thiner o acetona para disolver la laca
14. Pintura negra para los tableros
15. Equipo de dentista
16. Tiras de triplay de 1.5 m por lado
17. Cámara fotográfica
18. Geoposicionador (GPS).
19. Pinceles
20. Equipo de seguridad (careta para gases, lentes, etc.)
21. Soportes de aluminio (3 m largo, 2.1 alto, 0.7 m de frente)
22. Bolsas de polietileno (para la toma de muestras de suelo)

4

CUERPOS DE AGUA SUPERFICIALES

Luna Pabello Víctor *, Alejandro Alva Martínez ** y Arturo Bernal Becerra ***

Introducción

El agua es un elemento indispensable para la vida en el planeta. La distribución del agua, a nivel mundial, puede apreciarse en el cuadro 1. Considerando esos valores, resulta sorprendente notar el relativamente poco volumen como agua dulce superficial disponible (Berner y Berner, 1987; Shiklomanov, 1993). Debido a las diversas actividades humanas, el ciclo biogeoquímico del agua, se ha visto afectado significativamente (Odum, 1998), no sólo por el volumen utilizado, sino también por el grado de contaminación con que son retornadas a los cuerpos receptores como ríos y lagos, entre otros (Ryding y Rast, 1989; Suess, 1982). En este sentido, en México, existen Leyes y Normas que regulan las descargas de aguas residuales a cuerpos de agua y bienes nacionales. Al respecto, la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua (LFDMA) establece lo siguiente (CNA, 1998):

ARTÍCULO 278 A.- Los cuerpos de propiedad nacional, receptores de las descargas de aguas residuales, se considerarán como de tipo A, a excepción hecha de los que se señalan como de tipo B o C; todos los Embalses Naturales o Artificiales, se considerarán como tipo B a excepción de los que se señalan como tipo C (según el listado de la propia LFDMA); todos los Estuarios y Humedales Naturales, se considerarán como tipo B. Es importante señalar que cada categoría implica un costo

Por otra parte, la NOM-001-ECOL-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y

* Facultad de Química, UNAM, México

** Pista Olímpica de remo y canotaje. México D.F., México

*** Universidad Autónoma Metropolitana, México

bienes nacionales (DOF, 1997), indica precisamente la concentración de máxima que, de ciertos contaminantes, puede ser vertida en función del tipo de cuerpo receptor. La información al respecto puede consultarse en los cuadros 2 y 3.

De manera complementaria, debe señalarse que el valor de las sanciones económicas por exceder el nivel de contaminación establecido, dependen del tipo de contaminante en cuestión y de la zona o región en donde el cuerpo receptor este ubicado.

Lo anterior, aunado a la importancia *per se* que tiene el conocer la calidad de los cuerpos de agua naturales receptores, hace que resulte importante describir el mecanismo seguido para determinar la calidad de agua prevaleciente en los mismos (Lind, 1974; Mason, 1987). En ese sentido, el presente trabajo se orientó hacia los aspectos relativos a las técnicas de muestreo de las aguas contenidas en cuerpos lóticos (ríos y arroyos) y lénticos (estanques y lagos) epicontinentales. Por tal motivo, se considera importante tener en cuenta lo estipulado en la NMX-AA-003-1980 Aguas residuales.- Muestreo (DOF, 1980) ya que constituye un procedimiento con validez oficial vigente. Asimismo, se consideraron los procedimientos avalados por la American Public Health Association (APHA, 1995).

El objetivo de este capítulo es el de introducir al lector a los principales aspectos relacionados con el muestreo de ríos y lagos, así como del manejo de las muestras colectadas.

Marco de referencia

Como se mencionó, es importante saber que existen procedimientos reconocidos oficialmente, a nivel nacional, que son aplicables a la toma de muestras (NMX-AA-003-1980) (DOF, 1980). Sin embargo, es importante consultar literatura especializada sobre el tema, a efecto de estar actualizados sobre las diferentes técnicas y procedimientos usados a nivel mundial, tanto para ríos como para lagos (Bartram y Ballance, 1992; Chapman, 1992; Muñoz, 1996). Al respecto, debe hacerse notar que en todos los casos, la toma de muestras debe ser representativa y confiable que proporcione información útil para la interpretación de la calidad del cuerpo de agua de donde procede y poder llegar a la correcta extrapolación de los datos obtenidos.

La toma de una muestra, está asociada con la información que se espera obtener de ella, por tal motivo, debe tenerse cuidado en la selección del tipo de recipiente que se empleará para su colecta, así como el tipo de conservador que permita disminuir cambios significativos en la muestra hasta que sea analizada. Ambos aspectos se detallan en los incisos subsecuentes. Es importante resaltar que de la

Cuadro 1

Ubicación	Volumen (10 ³ km ²)	Porcentaje total de agua dulce	Porcentaje total de agua
Océanos	1,338,000.00	96.5000	-
Agua dulce subterránea	33,946.50	2.4610	30.15
Glaciares	42,428.10	3.5010	69.56
Lagos de agua dulce	91.00	0.0070	0.26
Lagos de agua salina	85.40	0.0060	-
Agua en pantanos	11.47	0.0008	0.03
Ríos	2.12	0.0002	0.006
Agua en seres vivos	1.12	0.0001	0.003
Agua atmosférica	12.9	0.0010	0.04
Total de agua	1,385,984.00	100	-
Total de agua dulce	35,029.00	2.53	100

Reservas de agua en el planeta (fuente: Shiklomanov, 1993)

correcta toma y conservación de la muestra, depende la factibilidad de realizar los análisis fisicoquímicos y microbiológicos de interés.

Toma de muestras

La recolección de las muestras depende de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de interés y de los objetivos del estudio.

El objetivo del muestreo es obtener una parte representativa del material bajo estudio (volumen de agua) al cual se le determinarán las variables fisicoquímicas y microbiológicas previstas. El volumen de agua colectado deberá ser transportado hasta el lugar de almacenamiento (cuarto frío, refrigerador, nevera, etc.), para luego ser transferido al laboratorio para su análisis, momento en el cual la muestra debe conservar las características del material original. Para lograr el objetivo se requiere que la muestra conserve las concentraciones relativas de todos los componentes presentes en el material original y que no hayan ocurrido cambios significativos en su composición antes de su análisis (APHA, 1995).

En algunos casos, el objetivo del muestreo es demostrar que se cumplen las normas especificadas por la legislación (resoluciones de las autoridades ambientales). Las muestras ingresan al laboratorio para determinaciones específicas, sin embargo, la responsabilidad de las condiciones y validez de las mismas debe ser asumida por las personas responsables del muestreo, de la conservación y el transporte de las muestras, lo cual por su importancia se detallará más adelante. Las técnicas de recolección y preservación de las muestras tienen una gran importancia, debido a la necesidad de verificar la precisión, exactitud y representatividad

de los datos que resulten de los análisis. Los aspectos anteriores se describen con más detalle en el inciso relativo a manejo y conservación de muestras.

A continuación se indican los principales criterios establecidos para la selección de los puntos de muestreo y aforo de cuerpos de agua lóticos (ríos y arroyos) y lénticos (estanques y lagos).

Criterios generales

Criterios para la selección de puntos de muestreo

Dado que un muestreo de agua implica un intento por establecer, a partir de muestras representativas, la calidad fisicoquímica y microbiológica predominante en un determinado volumen, es necesario la realización de este tipo de toma de muestras de acuerdo con procedimientos estandarizados y avalados por la autoridad competente. De no ser así, se corre el riesgo de obtener datos no útiles.

Para la realización de este tipo de actividades comúnmente se tiene que equilibrar entre lo necesario, lo deseable; lo económicamente viable y lo técnicamente factible. En consecuencia, la definición de los puntos requeridos para tal efecto requiere de contar con la suficiente claridad de lo que se está buscando obtener de esa actividad y los recursos (tiempo, dinero y esfuerzo) programados para ello.

Puntos de muestreo indispensables

La determinación de este tipo de puntos de muestreo se realiza pensando en los puntos mínimos indispensables requeridos para establecer la calidad de agua en estudio. En este sentido, es importante contemplar la(s) entrada(s) y salida(s) de agua. También deben seleccionarse aquellos puntos afluentes que por su volumen y/o contenido de contaminantes resulten importantes de cuantificar. Como es de esperar, esta actividad implica el reconocimiento previo de la zona de estudio, o el contar con antecedentes documentales al respecto. En todo caso, es altamente recomendable realizar una valoración global del área de interés (muestreo preliminar), para contar con mayor información en el momento de efectuar la selección de aquellos puntos de mayor utilidad.

CUERPOS DE AGUA SUPERFICIALES

Cuadro 2

	Parámetros (en mg L ⁻¹ , excepto cuando se especifique)	Ríos						
		Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 1998	NOM-001 ECOL 1996 Uso en riego agrícola (A)		NOM-001 ECOL 1996 Uso público urbano (B)		NOM-001 ECOL 1996 Protección de la vida acuática (C)	
		PM	PM	PD	PM	PD	PM	PD
Contaminantes básicos	Temperatura (°C) (1)	CNCR + 2.5	NA	NA	40	40	40	40
	pH (unidades)	5-10	5-10					
	Grasas y aceites (2)	15	15	25	15	25	15	25
	Sólidos suspendidos totales	75	150	200	75	125	40	60
	DBO ₅	75	150	200	75	150	30	60
	Nitrógeno total	40	40	60	40	60	15	25
	Materia flotante (3)	Ausente						
	Fósforo total	20	20	30	20	30	5	10
	Sólidos sedimentables (mL/L)	1	1	2	1	2	1	2
Metales pesados y cianuros totales	Arsénico	0.1	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2
	Cadmio	0.1	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2
	Cianuros	1	2	3	1	2	1	2
	Cobre	4	4	6	4	6	4	6
	Cromo	0.5	1	1.5	0.5	1	0.5	1
	Mercurio	0.005	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01
	Níquel	2	2	4	2	4	2	4
	Plomo	0.2	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4
	Zinc	10	10	20	10	20	10	20

Relación de parámetros requeridos por las autoridades competentes en materia de contaminación de agua

NOTA: PM= promedio mensual; PD= promedio diario; CNCR = condiciones naturales del cuerpo receptor; (B) y (C) = Tipo de cuerpo receptor según la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua - = No es aplicable; (1) = Instantáneo; (2) = Muestra simple promedio ponderado; (3) = Ausente según el método de prueba definido en la NMX-AA-006. Para determinar la contaminación por patógenos se tomará como indicador a los coliformes fecales. El límite máximo permisible para las descargas de aguas residuales vertidas a aguas y bienes nacionales, así como las descargas vertidas a suelo (riego agrícola) es de 1000 y 2000 como número más probable (NMP) de coliformes fecales por cada 100 mL para el promedio mensual y diario, respectivamente. Para determinar la concentración por parásitos, se tomará como indicador los huevos de helminto. El límite máximo permisible para las descargas vertidas a suelo (uso en riego agrícola), es de un huevo de helminto por litro para riego restringido, y de cinco huevos de helminto para riego no restringido, lo cual se llevará a cabo de acuerdo a la técnica establecida en el anexo de la norma NOM-001-ECOL-1996.

Puntos deseables

Para el conocimiento detallado de un determinado cuerpo de agua, es necesario efectuar un muestreo y análisis detallado de su calidad. Usualmente se establece la determinación de toma de muestra en aquellas partes que, de manera lógica, implican una transformación de la calidad del agua dentro de una serie o secuencia de aportes. Normalmente, dicho muestreo incluye la toma de muestras en múltiples puntos, mediante los cuales se busca obtener la mayor información posible a lo largo, a lo ancho y profundo del cuerpo de agua en estudio. De manera práctica, lo anterior se traduce, en primer término, en la inclusión de abundantes muestras tanto en las partes distales, como en puntos intermedios de interés en los cuales exista la posible mezcla de corrientes.

Aunque este tipo de muestreo resulta útil para la detección de posibles aportes tanto de aguas limpias, como de aguas contaminadas, es necesario que se realice cuidadosamente a efecto de no caer en aspectos poco prácticos y costosos, de los cuales la información obtenida no justifique su aplicación.

Frecuencia en el muestreo

La frecuencia para la toma de muestras esta estrechamente asociada con la propia naturaleza del embalse, es decir, en la medida que dicho cuerpo de agua sea poco cambiante (estable) el número de muestras requeridas para conocer su calidad a lo largo del tiempo resulta menor y viceversa. Por consiguiente, es necesario o, por lo menos deseable, contar con datos históricos sobre el cuerpo de agua en estudio, los perfiles de altura, el volumen transportado y los datos de calidad existentes. De no ser esto posible, la frecuencia de muestreo se establece únicamente en función del tiempo disponible para la realización del estudio, pudiéndose fraccionar arbitrariamente de manera azarosa o dirigida. Es importante indicar que la frecuencia debe, preferentemente, cubrir diferentes fechas a lo largo del año para poder obtener datos de, por lo menos, las estaciones de lluvias y de secas.

Criterios adoptados para la selección de puntos de aforo

Debido a la dificultad que implica la medición del agua contenida en un determinado cuerpo (río o lago), surge la necesidad de estimar ésta mediante el uso de técnicas de aforo. Existen diferentes procedimientos para su realización teniendo como puntos comunes la ponderación del volumen en un determinado

Cuadro 3

	Parámetros (en mg L ⁻¹ , excepto cuando se especifique)	Embalses naturales y artificiales				
		LFDMA 1998	NOM-001 1996. Uso en riego agrícola (B)		NOM-001 ECOL 1996. Uso público urbano (C)	
		PM	PM	PD	PM	PD
Contaminantes básicos	Temperatura (°C) (1)	CNCR + 2.5	40	40	40	40
	pH (unidades)	5-10	5-10			
	Grasas y aceites (2)	15	15	25	15	25
	Sólidos suspendidos totales	75	75	125	40	60
	DBO ₅	75	75	150	30	60
	Nitrógeno total	40	40	60	15	25
	Materia flotante (3)	-	Ausente			
	Fósforo total	20	20	30	5	10
	Sólidos sedimentables (mL/L)	1	1	2	1	2
Metales pesados y cianuros totales	Arsénico	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2
	Cadmio	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2
	Cianuros	1	1	2	1	2
	Cobre	4	4	6	4	6
	Cromo	0.5	0.5	1	0.5	1
	Mercurio	0.005	0.005	0.01	0.005	0.01
	Níquel	2	2	4	2	4
	Plomo	0.2	0.2	0.4	0.2	0.4
	Zinc	10	10	20	10	20

Límites máximos permisibles para contaminantes básicos, metales pesados y cianuros para embalses naturales y artificiales

LFDMA= Ley federal de derechos en materia de agua. Nota: PM= promedio mensual; PD= promedio diario; CNCR = condiciones naturales del cuerpo receptor; (B) y (C) = Tipo de cuerpo receptor según la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua - = No es aplicable; (1) = Instantáneo; (2) = Muestra simple promedio ponderado; (3) = Ausente según el método de prueba definido en la NMX-AA-006.

tiempo. Entre los principales procedimientos aplicables se encuentran, para el caso de ríos y arroyos, el uso de equipos de ultrasonido, sección-velocidad, área hidráulica velocidad, directo por llenado, molinetes y medidores totalizadores. En el caso de estanques y lagos, es necesario obtener los datos batimétricos del cuerpo de agua, a partir de los cuales se podrá calcular su volumen total en un tiempo dado.

Al igual que en el punto anterior, la realización de este tipo de actividades deben ser definir las de manera acertada.

Puntos de aforo indispensables. La determinación de este tipo de puntos se lleva al cabo pensando en los puntos mínimos indispensables requeridos para conocer el volumen total del agua. En este sentido, frecuentemente se contemplan la(s) entrada(s) y salida(s) de agua en un determinado tiempo, así como el cambio en el nivel de profundidad de dichos cuerpos. Este tipo de actividades implica el reconocimiento previo de la zona de estudio y/o el contar con antecedentes documentales al respecto.

Puntos de aforo deseables. Para el conocimiento detallado del flujo de agua dentro de un determinado ecosistema acuático, es deseable efectuar un muestreo y análisis cuidadoso de la calidad de agua. Por tal motivo, los puntos de muestreo a establecer deben ubicarse en todas aquellas partes que, de manera lógica, implican un cambio en el volumen del agua que entra o sale del cuerpo acuático en estudio. En algunos casos, dicho muestreo requiere de mucho ingenio para poder obtener datos útiles. De manera práctica, lo anterior se traduce, en el empleo de suficiente personal para la toma manual de aforos con una periodicidad tal que permita evaluar los posibles cambios de volumen a diferentes horas del día, en cada día de la semana, a lo largo de los doce meses del año. Dado lo ardua que sería esta labor, frecuentemente se opta por el empleo de equipos automatizados, lo cual resulta oneroso.

Frecuencia

La frecuencia para la medición de aforos esta estrechamente asociada con el propio cuerpo que se desee estudiar. En el caso de ríos, algunas variables de interés son su nivel de profundidad y anchura en la sección seleccionada para aforo. En el caso de lagos, su profundidad, así como el flujo de entrada y salida de agua, son variables de interés. Es decir, en la medida que sea poco cambiante, el número de muestras requeridas para conocer su calidad y volumen o flujo, a lo largo del tiempo, resulta menor y viceversa. Por consiguiente, es importante contar con datos históricos al respecto. De no ser esto posible, la frecuencia de los aforos se establece en función de los recursos económicos y materiales disponibles, tomando en cuenta para ello los puntos de aforo considerados como indispensables.

Criterios para la selección de parámetros analíticos

Dado lo poco práctico que resulta la medición de la totalidad de los posibles parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de una determinada muestra de agua,

comúnmente se determinan solo aquellos que de manera lógica influyan directamente sobre el cuerpo de agua muestreado, o bien, sean especificados por el cliente o autoridad competente. Al respecto, es necesario llevar acabo su determinación mediante los procedimientos establecidos oficialmente en las Normas Mexicanas (NMX) aplicables, las cuales se encuentran indicadas en la Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996. Dichos procedimientos son los legalmente considerados en la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua, para el establecimiento de sanciones por descargas y/o restricciones para su uso (CNA, 1998).

De manera convencional se ha establecido una clasificación de los parámetros fisicoquímicos y biológicos útiles de conocer en una determinada muestra de agua, dividiéndolos en parámetros de campo (p.e. temperatura, pH y oxígeno disuelto) y parámetros de laboratorio (sólidos en sus diferentes formas, demanda bioquímica de oxígeno, metales y coliformes totales o fecales) (Eckblad, 1978; Lind, 1974; Ros, 1979; Tortorelli y Hernández, 1995). Dicha división obedece, por un lado a la impostergabilidad de su realización y, por otro, a la facilidad para llevarla al cabo.

De no efectuarse con este tipo de procedimientos, los datos obtenidos dejarían de ser útiles (confiables y legalmente aceptables) y no podrían ser empleados para avalar la detección de posibles fallas o puntos de mejora y, en segundo término, el establecimiento del nivel real de contaminantes presentes en el agua tomada como suministro, presente en diferentes partes del proceso, o bien, en la descargada como agua residual (Tortorelli y Hernández, 1995).

Al igual que en los puntos anteriores, la realización de este tipo de actividades requieren comúnmente equilibrarse entre lo necesario, lo deseable, lo económicamente viable y lo técnicamente factible. En consecuencia la definición del tipo de parámetros requeridos dependerá de los objetivos y recursos programados para ello.

Métodos de muestreo

Muestreo manual

En la toma manual de muestras se supone que no se utiliza equipo alguno o en caso de ser necesario dicho equipo resulta mínimo. Este procedimiento puede ser demasiado costoso en tiempo y dinero, así como de manejo dispendioso cuando se emplea en programas de toma rutinaria de muestras o en muestreos a gran escala.

Muestreo automático

Mediante la toma automática de muestras se pueden eliminar los errores humanos inherentes a la toma de muestras, se reducen los costos laborales y se posibilita la toma de muestras con mayor frecuencia, por lo que su uso está cada vez más extendido. Es preciso comprobar que el aparato automático no contamine la muestra. Al respecto, es necesario consultar al fabricante del equipo a efecto de contar con la información de las posibles incompatibilidades. Los aparatos automáticos se programan de acuerdo con las necesidades específicas. Es necesario controlar con precisión la velocidad de bombeo y el tamaño de los tubos según el tipo de muestra que se desee recoger.

Envases de las muestras

El tipo de envase a utilizar es de suma importancia. En general, los envases están hechos de vidrio o plástico (Cuadro 4). El uso de uno u otro depende de cada caso. Por ejemplo, el sílice y el sodio pueden lixivarse en el vidrio pero no en el plástico; los metales pueden dejar residuos adsorbidos en las paredes de los envases de vidrio. Existen algunas recomendaciones como las siguientes:

Para muestras que contienen compuestos orgánicos, resulta conveniente evitar los envases plásticos, salvo los fabricados con polímeros fluorados como el politetrafluoretileno (PTFE).

Cuadro 4

Determinación	Recipiente	Volumen mínimo	Preservación	Almacenamiento máximo
Acidez	P, V	100	Refrigerar	14 d
Alcalinidad	P, V	200	Refrigerar	14 d
Boro	P, V	100	No requiere	6 meses
Bromuro	P, V	100	No requiere	28 d
Carbono orgánico total	P, V	100	Análisis inmediato o refrigerar y agregar H_3PO_4 o H_2SO_4 hasta $pH < 2$	28 d
Cianuro total	P, V	500	Agregar NaOH hasta $pH < 12$ refrigerar	

Recomendaciones para el muestreo y preservación de muestras (tomado de APHA, 1995; Suess, 1982)

Cuadro 4 (continuación)

Determinación	Recipiente	Volumen mínimo	Preservación	Almacenamiento máximo
Cianuro clorable	P, V	500	Agregar 100 mg $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3/\text{L}$	14 d
Cloro residual	P, V	500	Análisis inmediato	0.5 h/ inmediato
Clorofila	P, V	500	30 días en oscuridad	30 d
Cloruro	P, V	50	No requiere	28 d
Color	P, V	500	Refrigerar	48 h
Compuestos orgánicos				
Substancias activas al azul de metileno	P, V	250	Refrigerar	48 h
Plaguicidas	P, V	1000	Refrigerar; agregar 1g ácido ascórbico/L si hay cloro	7 días hasta la extracción
Fenoles	P, V	500	Refrigerar; agregar H_2SO_4 hasta $\text{pH} < 2$	40 días después de extraer
DBO	P, V	500	Refrigerar	48 h
DQO	P, V	100	Analizarlo refrigerar y agregar H_2SO_4 hasta $\text{pH} < 2$	28 días
Conductividad	P, V	500	Refrigerar	28 d
Dióxido de carbono	P, V	100	Análisis inmediato	-
Dióxido de cloro	P, V	500	Análisis inmediato	-
Dureza	P, V	100	Agregar HNO_3 hasta $\text{pH} < 2$	6 meses
Fluoruro	P	300	No requiere	28 d
Fosfato	V(A)	100	Para fosfato disuelto filtrar inmediatamente; refrigerar	48 h
Grasas y aceites	V boca ancha, calibrado	1000	Agregar HCl hasta $\text{pH} < 2$, refrigerar	28 d
Metales en general	P(A), V(A)	500	Filtrar, agregar HNO_3 hasta $\text{pH} < 2$	6 meses
Cromo VI	P(A), V(A)	300	Refrigerar	24 h

Recomendaciones para el muestreo y preservación de muestras (tomado de APHA, 1995; Suess, 1982)

Cuadro 4 (continuación)

Determinación	Recipiente	Volumen mínimo	Preservación	Almacenamiento máximo
Cobre, colorimetría	P(A), V(A)	500	Agregar HNO ₃ hasta pH < 2, 4°C, refrigerar	28 d
Mercurio	P(A), V(A)	500	Agregar HNO ₃ hasta pH < 2, 4°C, refrigerar	28 d
Nitrógeno				
Amoníaco	P, V	500	Agregar H ₂ SO ₄ hasta pH < 2, refrigerar	28 d
Nitrato	P, V	100	Analizar lo más pronto posible o refrigerar	48 h (28 d para muestras cloradas)
Nitrato + nitrito	P, V	200	Agregar H ₂ SO ₄ hasta pH < 2, refrigerar	28 d
Nitrito	P, V	500	Analizar lo más pronto posible o refrigerar	48 h
Orgánico Kjeldhal	P, V	500	Agregar H ₂ SO ₄ hasta pH < 2, refrigerar	28 d
Olor	V	500	Analizar lo más pronto posible o refrigerar	-
Oxígeno disuelto				
Electrodo	V	300	Analizar inmediatamente	-
Winkler	V	300	Puede retrasarse la titulación después de la acidificación	8 h
Ozono			Análisis inmediato	-
pH			Análisis inmediato	-
Sabor	V	500	Analizar lo más pronto posible o refrigerar	-
Salinidad	V, sello de cera	240	Análisis de inmediato o usar sello de cera	-

Recomendaciones para el muestreo y preservación de muestras (tomado de APHA, 1995; Suess, 1982)

Cuadro 4 (continuación)

Determinación	Recipiente	Volumen mínimo	Preservación	Almacenamiento máximo
Sílica	P	200	Refrigerar, no congelar	28 d
Sólidos	P, V	200	Refrigerar	2 – 7 d
Sulfatos	P, V	100	Refrigerar	28 d
Sulfuro	P, V	10	Refrigerar	7 d
Temperatura	P, V	-	Análisis inmediato	-
Turbidez	P, V	100	Analizar el mismo día. Para más de 24 h guardar en oscuridad; refrigerar	48 h
Yodo	P, V	500	Análisis inmediato	-

Recomendaciones para el muestreo y preservación de muestras (tomado de APHA, 1995; Suess, 1982)

NOTA: P= Plástico (polietileno o equivalente); P(A)= Plástico enjuagado con HNO₃; V= Vidrio; V(A)= vidrio enjuagado con HNO₃.

Para muestras que contienen compuestos orgánicos volátiles, COVs, semivolátiles, plaguicidas, PCB's, aceites y grasas, es preferible la utilización de envases de vidrio, ya que los envases de plástico pueden resultar porosos para este tipo de compuestos. Como resultado del contacto, los COVs pueden disolverse en las paredes del envase plástico o incluso lixiviar sustancias de este material, provocado que eventualmente se degraden o se rompan. Cabe señalar que existen ciertos plásticos que pueden ser compatibles con algunos COVs, no obstante se requiere revisar las instrucciones del fabricante. En cuanto a los tapones de los envases, cuando son de plástico pueden originar problemas por lo cual se recomienda el uso de tapones de metal o de PTFE. Para situaciones críticas, es adecuada la inclusión de un blanco del recipiente para demostrar la ausencia de interferencias.

Precauciones generales

Uno de los requerimientos básicos en el programa de muestreo es una manipulación ausente de procesos de deterioro o de contaminación antes de iniciar los análisis en el laboratorio. En el muestreo de aguas, antes de coleccionar la muestra es necesario

purgar el recipiente dos o tres veces, a menos que contenga agentes preservativos (APHA, 1995). Dependiendo del tipo de determinación, el recipiente se llena completamente (ésto para la mayoría de las determinaciones de compuestos orgánicos), o se deja un espacio para aireación o mezcla (por ejemplo en análisis microbiológicos); si el recipiente contiene preservativos no puede ser rebosado, ya que ocasionaría una pérdida por dilución. Excepto cuando el muestreo tiene como objetivo el análisis de compuestos orgánicos, se debe dejar un espacio de aire equivalente a aproximadamente 1% del volumen del recipiente, para permitir la expansión térmica durante su transporte.

Cuando las muestras colectadas contienen compuestos orgánicos o metales traza, se requieren precauciones especiales, debido a que muchos constituyentes están presentes en concentraciones de unos pocos miligramos por litro y se puede correr el riesgo de una pérdida total o parcial, si el muestreo no se ejecuta con los procedimientos precisos para la adecuada preservación.

Colecta de muestras de agua superficial

En este inciso, se describirán algunos de los aspectos más relevantes sobre el muestreo relacionado con cuerpos de agua superficial. Al respecto, resulta sumamente útil, en la colecta de muestras representativas de ríos, arroyos, estanques y lagos, considerar las siguientes reglas generales:

1. Tener cuidado de posibles inundaciones repentinas. Si un evento de inundación es probable, pero es necesario obtener la muestra, tome las medidas de seguridad necesarias, incluida la de hacerse acompañar de por lo menos otra persona, así como de ubicar una ruta fácil de escape.
2. Seleccione una localización de muestreo en o cerca de una estación de aforo para que se pueda relacionar la descarga del río con la muestra de la calidad del agua: Si no existe una estación de aforo, mida la velocidad de flujo en la hora de muestreo.
3. Ubique un canal derecho y uniforme para muestrear.
4. A menos que se especifique en el plan de muestreo, evite localizaciones de muestreo al lado de confluencias o fuentes “punto” de contaminación.
5. Use puentes o botes para ríos y lagos profundos en donde andar en el agua resulte peligroso o no práctico.
6. No colecte muestras a lo largo de las orillas, a menos que el plan de muestreo lo especifique, ya que de lo contrario las muestras pueden no ser representativas de todo el cuerpo de agua.
7. Use guantes apropiados para la colecta de la muestra.

Muestreo de ríos y arroyos

La colecta en ríos y arroyos involucra el transporte de todos los artículos necesarios para la estimación de la calidad de agua, la colecta de apuntes de campo, instalación de instrumentación y equipo de filtración, envases de muestreo y utensilios para el lavado de material y equipo cerca del canal.

El primer paso es medir los parámetros de campo y luego el flujo del río o arroyo. Después de la colecta y preservación de las muestras (en frascos previamente etiquetados), lave y guarde el equipo empleado.

- a. Parámetros de campo. Mida y anote los valores correspondientes a las lecturas de temperatura, pH, conductividad y oxígeno disuelto, en una sección de río o arroyo no perturbada. Si desea, puede medir parámetros adicionales.
- b. Aforo de ríos y arroyos. Mida la velocidad de flujo de agua en el punto previamente seleccionado. Ese parámetro permitirá estimar la carga de contaminación y otros impactos.

El procedimiento normalmente seguido consiste en ubicar una sección transversal, a manera de un canal derecho, uniforme y relativamente libre de rocas y vegetación, de tal manera que el flujo sea uniforme, libre de remolinos, aguas lentas y turbulencia excesiva.

Después de haber ubicado la sección transversal, determine el ancho y la profundidad del río o arroyo. La medición de la velocidad de flujo se hace en varios puntos a lo largo de la sección seleccionada. Para ello, primero se mide a 0.8 m y luego a 0.2 m de la distancia de la superficie y se obtiene el promedio para ese punto. Para los puntos subsecuentes, río abajo, se sigue el mismo procedimiento. Una vez que la velocidad, profundidad y distancia de la sección transversal hayan sido determinadas, se puede utilizar el método de “sección mediana” para determinar el flujo total y poder establecer así el valor del flujo en litros por segundo.

- c. Muestreo compuesto. El muestreo compuesto tiene como objetivo el producir una muestra representativa de la calidad del agua del flujo total en la estación de muestreo. Al respecto, debe recordarse que es posible obtener la muestra de manera manual o automática, según convenga.
- d. Muestreo simple instantáneo. El muestreo simple instantáneo se realiza cuando la mezcla uniforme del canal del río o arroyo hace el muestreo compuesto innecesario; cuando se desean muestras de punto; cuando la pérdida de los gases de la muestra es posible, o cuando el agua no es demasiado profunda para usar el muestreo compuesto.

Muestreo de estanques y lagos

La determinación representativa de la calidad de agua en embalses a veces requiere que se tomen muestras en más de una localidad. Estas ubicaciones dependerán de los objetivos del programa de muestreo, el impacto de las fuentes locales de contaminación, y el tamaño del cuerpo de agua (Murgel, 1984; Ryding y Rast, 1989).

Parámetros de campo. Se determinan los mismos parámetros establecidos para ríos y arroyos con objeto de evaluar la variabilidad y estratificación tridimensional de la calidad de agua en estanques, lagos y manantiales grandes. En caso de contar con una barca o lancha, es importante medir el cambio de los parámetros de campo a todo lo largo de la columna de agua, tomando nota de la profundidad a la que se haga cada lectura. En caso de que el cuerpo de agua esté estratificado, debe anotarse la profundidad y espesor de la capa de arriba (epilimnion), la zona de transición (metalimnion), y la capa de abajo (hipolimnion). En caso de no contar con una lancha o barca, como última opción se deben tomar muestras en puntos accesibles a lo largo de la orilla.

- a. Muestreo en los bordes de lagos. Cuando no hay bote o lancha disponible, la muestra se colecta de la superficie de la orilla de los lagos empleando para ello frascos (limpios) de vidrio de 500 mL, el cual deberá estar etiquetado o etiquetarse una vez tomada la muestra.
- b. Muestreo a distancia de los bordes. Se pueden obtener muestras de agua de lagos y estanques mediante el uso de botellas de Van Dor. También es posible, utilizar bombas peristálticas con mangueras adaptadas para la profundidad deseada. En este sentido, es importante considerar el tipo de materiales del que están fabricadas a efecto de emplear materiales compatibles con los parámetros que se van a analizar. No obstante, que los muestreadores estén limpios, es recomendable enjuagarlos con agua del cuerpo de agua a muestrear. Es ampliamente recomendable empezar por la zona de más baja contaminación y terminar por la de más alta contaminación (por ejemplo, tomar primero muestras de la superficie y al último las del fondo). En caso de tomar muestras de clorofila, no debe lavarse el recipiente empleado para el muestreo con ácido, ya que el ácido destruye rápidamente la clorofila (Ryding y Rast, 1989; Bartram y Ballance, 19962).

En lagos poco profundos en donde presumiblemente la concentración de oxígeno está moderadamente uniforme con la profundidad, es recomendable sacar la muestra de la parte central y una profundidad de 30 centímetros.

En lagos profundos, en los que es altamente probable una estratificación, deben obtenerse un mínimo de tres muestras a diferentes profundidades: a 30 centímetros por debajo de la superficie; arriba del hipolimnion, y otra en la base del hipolimnion, aproximadamente 1 metro arriba del fondo. En esta última muestra es necesario tomar precauciones para evitar mezclar el sedimento con la muestra (Lind, 1974; Murgel, 1984).

No olvidar hacer las anotaciones pertinentes tanto en las etiquetas como en la libreta de campo, tales como valores de parámetros fisicoquímicos, ubicación, y profundidad de cada una de las muestras.

Tiempo de muestreo

El tiempo del muestreo dependerá de diversos factores tales como el objetivo del muestreo y las características particulares del cuerpo de agua.

Tipos de muestras

Considerando que para un cuerpo de agua, una muestra representa una porción de su totalidad, es posible entonces, cuando la muestra es representativa, conocer la composición de ese cuerpo de agua original para un determinado tiempo y bajo las circunstancias particulares en las que se realizó su captación. Cuando se requiere conocer con mayor detalle el comportamiento de un cuerpo de agua, es necesario saber información antecedente que permita ubicarlo como un cuerpo relativamente constante o cambiante, esto a efecto de seleccionar más adecuadamente el tipo de muestra a obtener (APHA, 1995). En este sentido, es posible dividir el tipo de muestras a obtener en tres: Simples, compuestas e integradas.

Muestras simples

Las muestras simples, conocidas también como puntuales, consisten en obtener una muestra continua que refleje cualitativa y cuantitativamente la calidad del cuerpo de agua muestreado. Se recomienda su obtención cuando la composición de la fuente es relativamente constante a través de un tiempo prolongado o a lo largo de distancias considerables en todas las direcciones. Esta característica permite suponer que la muestra obtenida bajo tales circunstancias, representa un

intervalo de tiempo o un volumen más extenso. En este contexto, un cuerpo de agua puede estar adecuadamente representado por muestras simples, como en el caso de aguas superficiales y aguas de suministro, pocas veces de efluentes residuales.

Cuando se sabe que un cuerpo de agua varía con el tiempo, las muestras simples tomadas a intervalos de tiempo precisados, y analizadas por separado, deben registrar la extensión, frecuencia y duración de las variaciones. Es necesario escoger los intervalos de muestreo de acuerdo con la frecuencia esperada de los cambios, que pueden variar desde tiempos tan cortos como 5 minutos, hasta 1 hora o más. Las variaciones estacionales en sistemas naturales pueden necesitar muestreos de varios meses. Cuando la composición de las fuentes varía en el espacio más que en el tiempo, se requiere tomar las muestras en los sitios apropiados.

Muestras compuestas

En la mayoría de los casos, el término “muestra compuesta”, se refiere a una combinación de muestras simples o puntuales tomadas en el mismo sitio durante diferentes tiempos. La mayor parte de las muestras compuestas, se emplean para conocer las concentraciones promedio, usadas para calcular las respectivas cargas o la eficiencia de una planta de tratamiento de aguas residuales. El uso de muestras compuestas representa un ahorro sustancial en costo y esfuerzo, comparativamente con el análisis por separado de un gran número de muestras y su consecuente cálculo de promedios.

Para éstos propósitos, la mayoría de determinaciones se considera estándar una muestra compuesta que representa un período de 24 horas. Sin embargo, bajo otras circunstancias puede ser preferible una muestra compuesta que represente un cambio, o un menor lapso, o un ciclo completo de una operación periódica. Para evaluar los efectos de descargas y operaciones variables o irregulares, se requiere tomar muestras compuestas que representen el periodo durante el cual ocurren tales descargas.

No se deben emplear muestras compuestas para la determinación de componentes o características sujetas a cambios significativos e inevitables durante el almacenamiento. Tales determinaciones deben hacerse en muestras individuales, lo más pronto posible después de la toma y preferiblemente en el sitio de muestreo. Ejemplos de este tipo de determinaciones son: gases disueltos, cloro residual, sulfuros solubles, temperatura y pH. Los cambios en componentes como algunos constituyentes inorgánicos, tales como el hierro, manganeso, alcalinidad o dureza pueden ser analizados en muestras compuestas. Las muestras compuestas en el tiempo se

pueden usar para determinar solamente los componentes que permanecen sin alteraciones bajo las condiciones de toma de muestra, preservación y almacenamiento.

Es posible tomar porciones individuales del cuerpo de agua en estudio en botellas de boca ancha cada hora (en algunos casos cada media hora o incluso cada 5 minutos) y mezclarlas al final del periodo de muestreo, o combinarlas en una sola botella, de tal manera que todas las proporciones de la composición sean preservadas tan pronto como se recolectan. Algunas veces es necesario el análisis de muestras individuales.

Es deseable, y a menudo esencial, combinar las muestras individuales en volúmenes proporcionales al caudal. Para el análisis de aguas residuales y efluentes, por lo general es suficiente un volumen final de muestras de 2 a 3 L. Para este propósito existen muestreadores automáticos, que no deben ser empleados a menos que la muestra sea preservada. Es conveniente limpiar los equipos y las botellas diariamente, para eliminar el crecimiento biológico y cualquier otro depósito.

Muestras integradas

Para ciertos propósitos, es mejor analizar mezclas puntuales tomadas simultáneamente en diferentes puntos (muestreo en espacio), o lo más cercanas posibles. Un ejemplo de la necesidad de muestreo integrado ocurre en ríos o corrientes que varían en composición a lo ancho y profundo de su cauce. Para evaluar la composición promedio o la carga total, se usa una mezcla de muestras que representan varios puntos de la sección transversal, en proporción a sus flujos relativos. La necesidad de muestras integradas también se puede presentar si se propone un tratamiento combinado para varios efluentes residuales separados, cuya interacción puede tener un efecto significativo en la tratabilidad o en la composición. La predicción matemática puede ser inexacta o imposible, mientras que la evaluación de una muestra integrada puede dar información más útil.

Los lagos naturales y artificiales muestran variaciones de composición según la localización horizontal y la profundidad; sin embargo, éstas son condiciones bajo las cuales las variaciones locales son más importantes mientras que los resultados promedio y totales son especialmente útiles. En tales casos se deben examinar las muestras separadamente antes que integrarlas.

La preparación de muestras integradas requiere generalmente de equipos diseñados para tomar muestras de una profundidad determinada sin que se contaminen con la columna de agua superior. Generalmente se requiere conocer el volumen, movimiento, y composición, de varias partes del cuerpo de agua a ser

estudiado. La toma de muestras integradas es un proceso complicado y especializado que se debe describir adecuadamente en el plan de muestreo.

Número y cantidad de muestra

Las muestras representativas se pueden obtener sólo colectando muestras compuestas en períodos predeterminados o en diferentes puntos de muestreo; las condiciones de recolección varían con las localidades y no existen recomendaciones específicas que puedan ser aplicables en forma general. Algunas veces es más informativo analizar varias muestras en forma separada en lugar de obtener una muestra compuesta, ya que es posible observar su variabilidad, los valores máximos y mínimos (APHA, 1995).

Como se mencionó anteriormente, en términos generales, la muestra colectada debe asegurar que los resultados analíticos obtenidos representan la composición actual de la misma. Los siguientes factores afectan los resultados: Presencia de material suspendido o turbidez; el método seleccionado para su remoción; los cambios fisicoquímicos en el almacenamiento o por aireación. Por consiguiente, es necesario disponer de los procedimientos detallados (como filtración, sedimentación, etc.) a los que se van a someter las muestras antes de ser analizadas, especialmente si se trata de metales traza o compuestos orgánicos en concentraciones traza. En algunas determinaciones como los análisis para plomo, éstos pueden ser invalidados por la contaminación que se puede presentar en tales procesos. Cada muestra debe ser tratada de forma individual, teniendo en cuenta las sustancias que se van a determinar, la cantidad y naturaleza de la turbidez presente y cualquier otra condición que pueda influenciar los resultados.

La selección de la técnica para recolectar una muestra homogénea debe ser definida en el plan de muestreo. Generalmente, se separa cualquier cantidad significativa de material suspendido por decantación, centrifugación o un procedimiento de filtración adecuado. Para el análisis de metales la muestra puede ser filtrada o no, o bien, aplicar ambas si lo que se busca es diferenciar el total de metales de aquellos que solamente están presentes en la matriz de forma disuelta.

Número de muestras

Teniendo en cuenta las variaciones aleatorias, tanto de los procedimientos analíticos, como en la presencia de componentes en el lugar de la toma de muestra, una sola de ellas puede resultar insuficiente para alcanzar el nivel de certidumbre deseado. Si se conoce la desviación estándar global, el número necesario de muestras puede calcularse con la siguiente fórmula.

Curvas como las presentadas en la Figura 1, ayudan a hacer el cálculo del número de muestras requerido. Por ejemplo, si $s = 0.5$ mg/L, $U = \pm 0.2$ mg/L y se desea un nivel de confianza del 95%, es necesario tomar de 25 a 30 muestras (Wilson, 1982; APHA, 1995).

$$N = \frac{ts^2}{U}$$

Donde:

N = Número de muestras

t = t de Student para un nivel de confianza determinado

s = desviación global estándar, y

U = nivel de incertidumbre aceptable

Al respecto, es necesario recordar que el volumen de muestra a coleccionar debe ser suficiente y en el recipiente adecuado, de tal manera que permita hacer las mediciones previstas de acuerdo con los requerimientos de manejo, almacenamiento y preservación. En el cuadro 4, se muestran los volúmenes habituales necesarios para análisis. Debe precisarse que no debe usarse la misma muestra para estudios químicos (orgánicos e inorgánicos), bacteriológicos y microscópicos, pues los métodos de toma y manipulación de las mismas son distintos.

Manejo y conservación de muestras

Cadena de custodia

El proceso de control y vigilancia del muestreo, preservación y análisis (procedimiento de cadena de custodia), es esencial para asegurar la integridad de la muestra desde su recolección hasta el reporte de los resultados. Incluye la actividad de seguir o monitorear las condiciones de toma de muestra, preservación, codificación, transporte y su posterior análisis. Este proceso es básico e importante para demostrar el control y confiabilidad de la muestra no sólo cuando hay un litigio involucrado, sino también para el control de rutina de las muestras. Se considera que una muestra está bajo la custodia de una persona, si está bajo su posesión física individual, a su vista, y en un sitio seguro. Los siguientes procedimientos resumen los principales aspectos de control y vigilancia de las muestras (Lind, 1974; DOF, 1980; APHA, 1995; Muñoz, 1996).

Etiquetas. Para prevenir confusiones en la identificación de las muestras, pegar al frasco de la muestra antes de o en el momento del muestreo, papel engomado o etiquetas adhesivas en las que se anote, con tinta a prueba de agua, por lo menos la siguiente información: número de muestra, nombre del recolector, fecha, hora y lugar de su recolección, y preservación realizada.

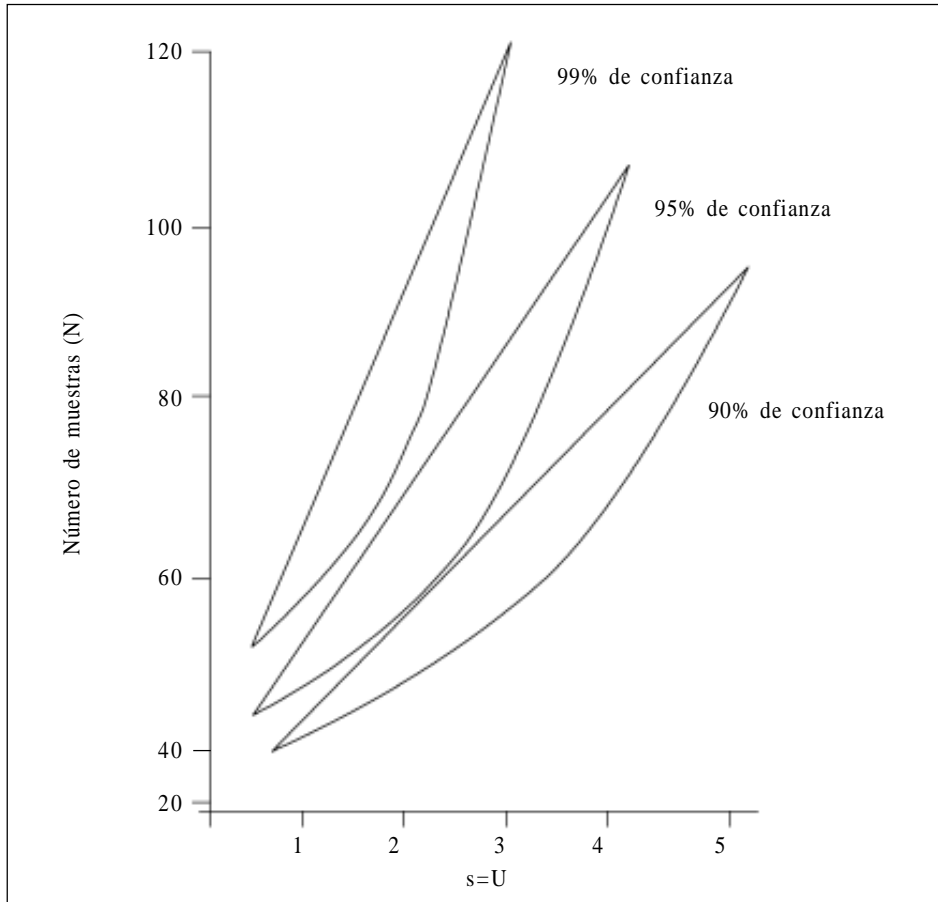
Sellos. Para evitar o detectar adulteraciones de las muestras. Sellar los recipientes con papel autoadhesivo, en los que se incluya por lo menos la siguiente información: Número de muestra, (idéntico al número de etiqueta), nombre del recolector, fecha y hora del muestreo; también son útiles los sellos de plástico encogible. Adherir el sello de tal manera que sea necesario romperlo para abrir el recipiente de la muestra, después de que el personal que tomó la muestra ceda la custodia o vigilancia.

Libro de campo. Es un libro o carpeta exclusiva para el registro de toda la información pertinente a observaciones de campo o de muestreo, la cual debe guardarse siempre en un lugar seguro. Los registros deben incluir mínimamente lo siguiente: Propósito del muestreo, localización de la estación de muestreo, o del punto de muestreo si se trata de un efluente industrial, en cuyo caso se debe anotar la ubicación y responsables de la descarga. Es importante registrar el tipo de muestra obtenida y el método de preservación empleado, cuando proceda. También se requiere describir el punto de muestreo y del método de muestreo; fecha y hora de recolección; números de identificación de los recolectores de la muestra; distribución y método de transporte de la muestra; referencias tales como mapas o fotografías del sitio de muestreo; observaciones y condiciones de campo; y firmas del personal responsable de las observaciones. Debido a que las situaciones de muestreo varían ampliamente, es esencial registrar la información suficiente de tal manera que se pueda reconstruir el evento del muestreo sin tener que confiar en la memoria de los encargados.

Registro del control y vigilancia de la muestra: Revisar el formato de control y vigilancia de cada una de las muestras o grupo de muestras, las cuales deben estar acompañadas de este formato. En el que se incluye la siguiente información: Número(s) de la(s) muestra(s); firma del recolector responsable; fecha, hora y sitio de muestreo; tipo de muestra; firmas del personal participante en el proceso de control, vigilancia y posesión de las muestras y las fechas correspondientes.

Formato de solicitud de análisis. La muestra debe llegar al laboratorio acompañada de una solicitud de análisis; el recolector completa la parte del formato correspondiente a la información de campo anotada en el libro de campo. La parte del formato correspondiente al laboratorio la completa el personal del laboratorio, e incluye: nombre de la persona que recibe la muestra, número de muestra en el laboratorio, fecha de recepción, y las determinaciones a ser realizadas.

Figura 1



Número aproximado de muestras requeridas para estimar una concentración media

Entrega de la muestra en el laboratorio. Las muestras se deben entregar en el laboratorio lo más pronto que sea posible después del muestreo. Dependiendo del tipo de análisis a realizar, existe un tiempo máximo para que se lleve a cabo el análisis y los valores obtenidos sean de utilidad. Al respecto puede consultarse el cuadro 4, con los tiempos recomendados por los métodos estándar americanos (APHA, 1995). Por tal motivo es necesario contar con un plan de almacenamiento y preservación que permita la entrega oportuna de las muestras en el laboratorio. En caso de que las muestras sea enviadas por correo a través de una empresa responsable, se debe incluir el formato de la compañía transportadora dentro de la documentación del control y vigilancia de la muestra. La solicitud del análisis

debe estar acompañada por el registro completo del proceso de control y vigilancia de la muestra. Entregar la muestra a la oficina de recepción en el laboratorio; el recepcionista a su vez debe firmar el formato de vigilancia y control, incluyendo la fecha y hora de entrega.

Recepción y registro de la muestra. En el laboratorio, el recepcionista inspecciona la condición y el sello de la muestra, compara la información de la etiqueta y el sello con el registro o formato del 'proceso de control y vigilancia, le asigna un número o código para su entrada al laboratorio, la registra en el libro del laboratorio, y la guarda en el cuarto o cabina de almacenamiento hasta que le sea asignada a un analista.

Asignación de la muestra para análisis. El coordinador del laboratorio asigna la muestra para su análisis, quedando el analista como responsable del procesamiento, cuidado y vigilancia de la muestra. Los resultados obtenidos se entregarán mediante su respectivo reporte al solicitante.

Conservación de muestras

Dada la naturaleza intrínseca de las muestras de aguas residuales domésticas e industriales, resulta prácticamente imposible su conservación de manera completa e inequívoca. La composición fisicoquímica y microbiológica de dichas muestras impide la completa estabilidad de sus constituyentes. Por tal motivo, en el mejor de los casos, solamente pueden retardarse los cambios químicos y biológicos que, inevitablemente, continúan después de retirar la muestra de su fuente. Algunos puntos de interés a considerar son los siguientes (APHA, 1995):

Naturaleza de los cambios en la muestra.

Los cambios químicos son función de las condiciones físicas y suceden en la estructura de ciertos constituyentes. Por ejemplo, la precipitación de cationes metálicos al formar sus hidróxidos; la formación de complejos; su adsorción en los recipientes que contienen la muestra o su disolución o volatilización conforme pasa el tiempo.

Los cambios biológicos pueden inducir la alteración de la muestra al cambiar la valencia de un elemento o radical. Asimismo, puede haber adsorción de compuestos orgánicos e inorgánicos a estructuras celulares, o bien, la liberación de ese tipo de elementos al presentarse lisis celular. Los cambios más representativos originados por la actividad microbiológica son el incremento o decremento

de valores de demanda bioquímica de oxígeno, cambio en la concentración de compuestos nitrogenados y la reducción de sulfato a sulfuro, entre otros.

Tiempo entre la toma y el análisis de la muestra

Con objeto de que los resultados sean más exactos, es altamente recomendable que el tiempo transcurrido, entre la toma y el análisis de una muestra, sea el mínimo posible. Lo anterior cobra mayor relevancia cuando la concentración del elemento o compuesto a analizar se encuentra presumiblemente en bajas concentraciones ($\mu\text{g/L}$). Cabe señalar que existen algunos constituyentes y parámetros físicos que requieren ser analizados *in situ* como es el caso de la temperatura, pH y oxígeno disuelto. Para muestras compuestas, se debe registrar el tiempo en el momento de finalizar la composición. Es posible retardar los cambios provocados por el crecimiento de los organismos mediante el almacenamiento de las muestras en obscuridad y a baja temperatura (< de 4°C pero sin congelar). Debe recordarse que es importante registrar el tiempo transcurrido hasta el momento del análisis de la muestra, así como la técnica de preservación empleada.

Técnicas de conservación o preservación

Los principales métodos de conservación de muestras incluyen su acidificación o basificación; la adición de compuestos que permitan estabilizar un determinado tipo de constituyente; el empleo de botellas ambar y opacas; refrigeración; filtración y congelamiento. Lo anterior con alguno de los siguientes objetivos: retardar la acción biológica, la hidrólisis de compuestos químicos, la reducción de la volatilidad o adsorción de los constituyentes. Es importante resaltar que comúnmente para hacer diferentes determinaciones en una muestra, es necesario tomar diferentes porciones y preservarlas por separado, debido a que el método de preservación puede interferir con otra determinación. Es decir que no existe un preservador universal.

Consideraciones finales

Como se ha mencionado a lo largo del presente trabajo, la toma y manejo de muestras de aguas superficiales procedentes de ríos, arroyos, estanques y lagos

requiere seguir procedimientos estandarizados apegados en la medida de lo posible a la normatividad nacional aplicable existente, a efecto de que tengan validez legal en caso de así requerirse.

Por otra parte, resulta importante que eventualmente se aborden aspectos relacionados con el muestreo y manejo de muestras de otro tipo de cuerpos de agua de interés regional como serían los esteros, pantanos lagunas costeras y zonas marítimas.

Referencias

- APHA. 1995. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control federation. Nueva York, EUA.
- Bartram J. y Ballance R. 1992. *Water Quality Monitoring. A practical guide to the design and implementation freshwater quality studies and monitoring programmes*. UNEP, WHO y E & FN SPON. Londres, Inglaterra.
- Chapman D. 1992. *Water Quality Assessments*. UNESCO, WHO y UNEP. Chapman & Hall. Londres, Inglaterra.
- CNA. 1998. Ley Federal de Derechos en Materia de Agua. Comisión Nacional del Agua. México D. F. México.
- DOF. 1980. Norma Mexicana NMX-AA-003-1980, Aguas residuales.- Muestreo. Residual Waters Sampling. Diario Oficial de la Federación del 25 de marzo de 1980.
- DOF. 1997. Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. Diario Oficial de la Federación del 6 de enero de 1997.
- Eckblad J. W. 1978. *Laboratory Manual of Aquatic Biology*. WCB. EUA.
- Lind O. T. 1974. *Handbook of common methods in Limnology*. Kendall, EUA.
- Mason C. F. 1987. *Biología de la contaminación del agua dulce*. Alhambra. Madrid, España.
- Muñoz R. A. C. 1996. Guía de técnicas de análisis de agua para campo y laboratorio en hidrobiología. Informe de servicio Social. Universidad Autónoma Metropolitana. Xochimilco. México D. F. México.
- Murgel B. S. 1984. Limnología sanitaria, estudio de la polución de aguas continentales. Serie de Biología. Monografía no. 28. Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos. Programa Regional de desarrollo Científico y Tecnológico. Washington DC, EUA.
- Ros J. 1979. *Prácticas de Ecología*. Ediciones Omega. Barcelona, España.
- Ryding S. y Rast W. 1989. *The Control of Eutrophication of Lakes and Reservoirs*. Vol. 1 UNESCO y The Parthenon Publishing Group. París, Francia.

- Suess M. J. 1982. *Examination of Water for Pollution Control*. Vol. 1 WHO/E y Pergamon Press. Londres, Inglaterra.
- Tortorelli M. y Hernández D. 1995. Calidad de agua de un ambiente acuático sometido a efluentes contaminantes. In: Lopretto E. y Tell G. (Eds.). *Ecosistemas de aguas continentales. Metodologías para su estudio*. Ediciones Sur. Argentina.
- Wilson A. L. 1982. Design of sampling programmes. In: Suess M. J. (Ed.). *Examination of water for pollution control*. Pergamon Press. Londres, Inglaterra.

5

CLIMA

Roger Orellana Lanza* y María Engracia Hernández Cerda**

Introducción

Dos herramientas importantes en las investigaciones en ecología y recursos naturales son la climatología y la meteorología. Ambas disciplinas estudian respectivamente el clima y el estado del tiempo. Es innegable la influencia que la atmósfera ejerce sobre los organismos y cómo moldea las comunidades, los ecosistemas y los biomas. En las características climáticas de una región, se encuentran intrínsecas las posibilidades de desarrollo de las interacciones entre organismos. Estas interacciones se pueden entender a partir de los dos principales elementos del tiempo y el clima: la temperatura del aire y la precipitación pluvial. Lo anterior motiva y hace necesario incluir en los estudios mencionados, a la climatología y la meteorología. Es importante incorporar en los métodos de campo las lecturas de variables atmosféricas que dan luces sobre el comportamiento de los organismos, como son las fases fenológicas o bien sobre las potencialidades de los recursos naturales desde la perspectiva climatológica (disponibilidad de agua, biotemperaturas, influencia del viento, etc.).

El clima es el estado más frecuente o promedio de la atmósfera; este varía de un sitio a otro. Cuando nos referimos al clima estamos tomando como referencia el promedio de algunas variables climáticas registradas por muchos años (García 1989, Oliver 1973). La Organización Meteorológica Mundial (OMM) recomendó en 1935 un período uniforme de treinta años para hacer válido este concepto. Posteriormente fue actualizado, como se puede ver en el cuadro 1, donde se encuentran los períodos óptimos para distintas características y regiones.

* Unidad de Recursos Naturales. Centro de Investigación Científica de Yucatán. orellana@cicy.mx

** Departamento de Geografía Física. Instituto de Geografía, UNAM. mehc@servidor.unam.mx

Las variables que comúnmente se utilizan son la temperatura media del aire y la humedad, expresada en cantidad de precipitación pluvial. Estadísticamente se ha considerado que veinte años de lecturas son suficientes para que se tenga un promedio estandarizado (al que se le denomina normal climatológica). La climatología estudia pues como se ha comportado la atmósfera durante un tiempo prolongado. Sin embargo, el clima puede cambiar aunque estos cambios a veces son imperceptibles por los seres humanos. Los elementos del clima son la resultante de la interacción de los factores climáticos: latitud, altitud, orografía, circulación atmosférica, reparto de océanos y continentes y corrientes marinas. Los elementos del clima, son los componentes que lo definen y son, así mismo, las variables a través de las cuales se manifiesta la influencia del clima sobre los demás elementos del medio natural.

Como variables climáticas, los elementos nos permiten definir y caracterizar el clima de una zona y determinar los mecanismos que lo condicionan; como variable ambiental, los elementos climáticos son considerados como recursos o limitantes.

Cuadro 1

Elemento	Islas	Costas	Llanuras	Montañas
Temperatura	10	15	15	25
Humedad	3	6	5	10
Nubosidad	4	4	8	12
Visibilidad	5	5	5	8
Precipitación	25	40	40	50

Periodo óptimo de años de lecturas recomendado por la OMM (tomado de MOPT 1992)

Los elementos o variables climáticas y temporales presentan diversas características, entre las que sobresalen la variabilidad espacial y temporal y la manifestación conjunta e interrelacionada.

La variabilidad espacial explica las diferencias regionales de los climas sobre la superficie terrestre. Esta variabilidad está determinada por la influencia de los factores astronómicos, como la latitud y los geográficos. Los primeros condicionan los rasgos climáticos dominantes en grandes áreas geográficas, los segundos los modifican. Aparece así lo que algunos autores han denominado “el mosaico climático del globo” organizado en climas zonales, regionales, locales o microclimas.

La variabilidad temporal en periodos de tiempo limitados como un día, un mes o un año o en intervalos de tiempo más largos. Esta variabilidad temporal se relaciona con los factores cósmicos: movimientos de rotación y traslación de la Tierra y posición de ésta respecto al sol; balanceo estacional de los grandes sistemas de presión y flujos de aire, entre otros. A ellos se asocian los regímenes

térmicos y pluviométricos diarios, mensuales o estacionales, comunes a grandes zonas de la Tierra. Los factores locales modifican estos rasgos generales y adquieren más importancia cuanto menor es la escala de trabajo. La información acerca de estos elementos sólo es posible mediante el uso de instrumentos de medida concretos y las series han de tener una longitud relativamente alta para que podamos definir con cierta precisión lo que durante mucho tiempo se ha denominado “normales climáticas”.

Los diferentes elementos climáticos se manifiestan de forma conjunta e interrelacionada. El estudio de alguno de ellos aisladamente es suficiente para definir los rasgos generales del clima de una zona y los mecanismos que lo explican; sin embargo, en una climatología aplicada se impone el análisis conjunto de varios de ellos. Por ejemplo, las temperaturas extremas o la suma acumulada de temperaturas por encima de un determinado umbral son utilizadas como indicadores bioclimáticos. La sequía se define por la ausencia de precipitaciones o por una cantidad inferior a la normal, pero la disponibilidad de agua o la sequía fisiológica sólo pueden determinarse teniendo en cuenta la cantidad de agua evaporada y esta última depende de otras variables climáticas como la temperatura, la humedad del aire y la velocidad del viento, que actúan conjuntamente. Igual ocurre con la sensación de calor o frío, que no sólo depende de la temperatura, sino también de la humedad y la velocidad del viento.

Los elementos del clima resultantes son:

- *Radiación solar e insolación.* El sol es casi la única fuente de energía que entra al planeta. La forma de entrada de esta energía es por medio de la radiación solar en forma de rayos de diferentes longitudes de onda. Esta varía con la latitud, la época del año y la transparencia de la atmósfera. La insolación es la cantidad de calor o energía que se recibe por unidad de área y tiempo.
- *Temperatura.* Es la medida indirecta de la energía cinética de las moléculas que componen el aire y por ende las diferentes capas de la atmósfera. La temperatura desciende conforme se eleva en altitud. Las temperaturas altas se encuentran en sitios de baja altitud y latitud.
- *Presión atmosférica.* Esta es la fuerza ejercida por unidad de área, de la columna de aire que forma la atmósfera. A mayor altitud, se tiene menor presión atmosférica y viceversa. La presión atmosférica depende de la energía de las moléculas del aire, por lo que una masa de aire excitada tenderá a expandirse y ejercerá mayor presión. Esto formará al final de cuentas el movimiento del aire en sentido horizontal y vertical.

- *Viento dominante y corrientes.* Es el movimiento del aire de la alta presión a la baja, al que se le denomina advección. Si el gradiente es muy marcado, es decir, la distancia entre la alta y la baja presión es menor, entonces será mayor la velocidad del viento. El mismo principio se aplica en el sentido vertical, lo cual forma las corrientes de aire; este movimiento se le denomina convección.
- *Humedad y precipitación.* Cualquier tipo de manifestación de la presencia de agua en las masas de aire que conforman la atmósfera son necesarias de medir o estimar, ya que eso representa al final de cuentas la potencialidad de presentarse la precipitación en sus diferentes tipos: lluvia, escarcha, nieve, granizo, rocío. Las nubes son masas de aire en la que existen diminutas gotas de agua, en torno a partículas microscópicas higroscópicas. Dependiendo de las características de estas nubes, podrá o no presentarse precipitación.
- *Visibilidad dominante.* La atmósfera difiere en su transparencia de un sitio a otro. Esto depende de la composición puntual de gases y de las partículas sólidas que se encuentren suspendidas como puede ser polvo, carbono, polen, gotitas de agua. Una atmósfera limpia y no contaminada cuenta con una aceptable transparencia.
- *Nubosidad.* Las capas medias y altas de la troposfera son ocupadas por masa de aire que pueden estar saturadas de agua en forma de nubes. Estas son pequeñas gotas, en torno a núcleos sólidos que son partículas higroscópicas. La nubosidad puede filtrar los rayos solares y la radiación recibida dependerá de la nubosidad. Por lo tanto es un elemento del clima importante de considerar.

El tiempo o “estado del tiempo” se refiere a las condiciones instantáneas de la atmósfera. El estado del tiempo varía de un momento a otro. La meteorología o estudio del tiempo (*weather* en inglés), hace predicciones a partir del conocimiento del comportamiento de la atmósfera a través de los patrones de circulación de ésta en plazos muy cortos. Las predicciones del estado del tiempo se pueden llevar a cabo en un periodo de pocas semanas. A este respecto, la consideración más importante es que de año en año las condiciones atmosféricas tienden a repetirse en la misma época o estación; con esta información y con la utilización de algunos modelos matemáticos pueden predecirse condiciones que a veces inclusive resultan desfavorables para las actividades humanas, como la presencia de heladas, tempestades, huracanes, incendios forestales, etc. El estado del tiempo se estima con los mismos parámetros o elementos que el clima. Las escalas pueden ser las mismas o diferentes (García 1989, Mc Gregor y Niewolt 1998).

Es así como puede concebirse al clima como el promedio de un número infinitesimal de estados del tiempo. El estado del tiempo varía de un instante a otro, mientras que el clima varía de un espacio a otro. El tiempo y el clima se analizan con algunas variables físicas de la atmósfera que son mensurables por medio de algunos aparatos. Los estudios de climatología y meteorología se han realizado a partir del acopio de datos tomados por observadores. Hay dos tipos de sitios de observación: las estaciones meteorológicas y los observatorios. Los tipos de aparatos y las formas de lecturas están dadas de forma convencional en todo el mundo de acuerdo con la OMM.

La atmósfera de nuestro planeta la tierra, es distinta en composición de gases y su concentración, a las atmósferas de los otros planetas. La parte baja de la atmósfera terrestre o troposfera es en la que se han formado las condiciones propicias para la vida. De ahí surge el concepto de biosfera, que se entiende como la interfase entre océanos, continentes y atmósfera donde se dan los procesos biológicos. En este nivel es importante considerar las distintas escalas en la que se puede estudiar el clima.

- *Macroclima*. Este es el clima a gran nivel, es decir a escala planetaria. En este se comparan las propiedades atmosféricas de nuestro planeta respecto a otros. De esta manera se puede conocer qué tan favorables son las condiciones para el desarrollo de la vida en otros planetas.
- *Mesoclima*. Es el clima a escala de franjas latitudinales. Las variaciones climáticas a una misma latitud varían de acuerdo con la distribución de océanos y continentes, así como la orografía y en la distribución de los seres vivos corresponde a los biomas. El mesoclima se identifica en cuanto a escala a la clasificación climática de Köppen.
- *Mesomicroclima o clima regional*. Es el clima resultante de la interacción de las condiciones regionales de latitud, altitud, relieve y continentalidad. El mesoclima se corresponde con la distribución de los tipos de vegetación.
- *Clima local*. Este nivel abarca una escala de clima aún menor a la de mesomicroclima y depende de la exposición en relación con el microrrelieve. Corresponde a las asociaciones vegetales de enclaves en concreto.
- *Microclima*. Con este se abarca las condiciones resultantes de la microtopografía, iluminación (exposición), las propiedades físicas de los materiales que componen el sistema y la evapotranspiración. Corresponde a las características climáticas muy propias en gradientes de metros, centímetros y milímetros.

Estaciones meteorológicas

La única fuente de información directa con la que cuenta la climatología es la observación de los diferentes parámetros meteorológicos. La cantidad y la calidad de los datos disponibles condicionan la representatividad de los estudios climáticos. La información disponible en la actualidad procede de *observatorios* situados sobre la superficie terrestre y la obtenida por *sensores remotos* instalados sobre satélites o aviones.

Las observaciones procedentes de la red superficial se caracterizan por: 1) El carácter local, relacionado con la localización del observatorio u estación; 2) Generalmente son series temporales largas, que admiten un análisis estadístico más o menos complejo, suficiente para definir los rasgos esenciales del clima, tanto los denominados valores normales, como la variabilidad y la frecuencia de casos extremos; 3) Se utilizan instrumentos convencionales de características técnicas similares, situación parecida a fin de poder comparar las mediciones entre puntos distantes; 4) En algunas de ellas se obtienen además datos de la temperatura, humedad, viento, etc., a distintos niveles altitudinales, mediante sondeos; y 5) Recientemente se han introducido importantes modificaciones como la automatización de la red y el uso de los radares, lo que ha contribuido a mejorar sustancialmente la información.

Con la actividad de las estaciones meteorológicas se conforma una amplia red en las regiones, provincias, estados y países. A partir de los datos suministrados por estas redes se pueden definir los mecanismos que gobiernan el clima de una zona y evaluar la incidencia de los factores astronómicos y geográficos. La finalidad con la que fueron establecidas estas redes permite describir y caracterizar con bastante aproximación los climas regionales, pero presentan dificultades importantes para escalas de mayor detalle.

La información recabada es la que se utiliza para hacer predicciones y prevenir posibles desastres. Estas deben estar generalmente en sitios despejados y fuera de la influencia de árboles o edificaciones en un radio al menos de 30 m. En el centro de un círculo imaginario está instalada la estación, generalmente en un cuadro cerrado y con puerta de acceso de 4 x 4 m. Por lo general, las lecturas se realizan a las ocho de la mañana, aunque en algunas estaciones muy seleccionadas se realizan dos lecturas en el ciclo de 24 horas, por la mañana después de la salida del sol y por la tarde justo cuando se oculta.

En la actualidad existen tres tipos de estaciones y aparecen clasificadas en tres categorías de acuerdo con la información que registran, los instrumentos con los que cuentan y la formación técnica del personal encargado de los mismos.

Las estaciones de primer orden o estaciones completas, son las que efectúan observaciones de todos los elementos climáticos y están dotadas de aparatos de

precisión y registradores. Las estaciones de segundo orden o termopluiométricas, sólo tienen termómetros, higrómetros o psicrómetros y pluviómetros. Se realizan tres observaciones diarias, aunque en la mayoría son sólo dos. Las estaciones de tercer orden o pluviométricas, sólo cuentan con un pluviómetro y miden la precipitación cada 24 horas.

En la actualidad existen tres tipos de estaciones, los observatorios, las estaciones automatizadas y las estaciones meteorológicas convencionales.

Los observatorios. Son estaciones muy completas y que cuentan con sistemas de telecomunicaciones de tal forma, que en éstas se lanzan diariamente globos de radiosondeo, que se enlazan con una red mundial. En nuestro país existen 77 observatorios funcionado y supeditados al Servicio Meteorológico Nacional.

Las estaciones automatizadas. Consisten en una serie de aparatos que están controlados por una computadora y los sensores que registran los elementos climáticos ya mencionados lo hacen a través de *dataloggers*. Los datos son almacenados en la computadora y se puede acceder a éstos. Además toda la información generada es enviada por vía telefónica o por satélite al Observatorio Nacional en la Ciudad de México. Debido al alto costo de este tipo de infraestructura, lo delicado de su mantenimiento y la necesidad que haya corriente eléctrica en el sitio, en la actualidad solamente se cuenta con 60 estaciones automatizadas registradas por el Servicio Meteorológico Nacional, aunque existen muchas más de forma particular y dependientes de centros de investigación y universidades

Las estaciones meteorológicas convencionales. Forman una red de 5300 en todo el país. A partir de una depuración llevada a cabo desde 1985 se ha llegado a contar en la actualidad con aproximadamente 3500 estaciones en buen estado; la densidad en la localización de dichas estaciones depende del desarrollo económico regional.

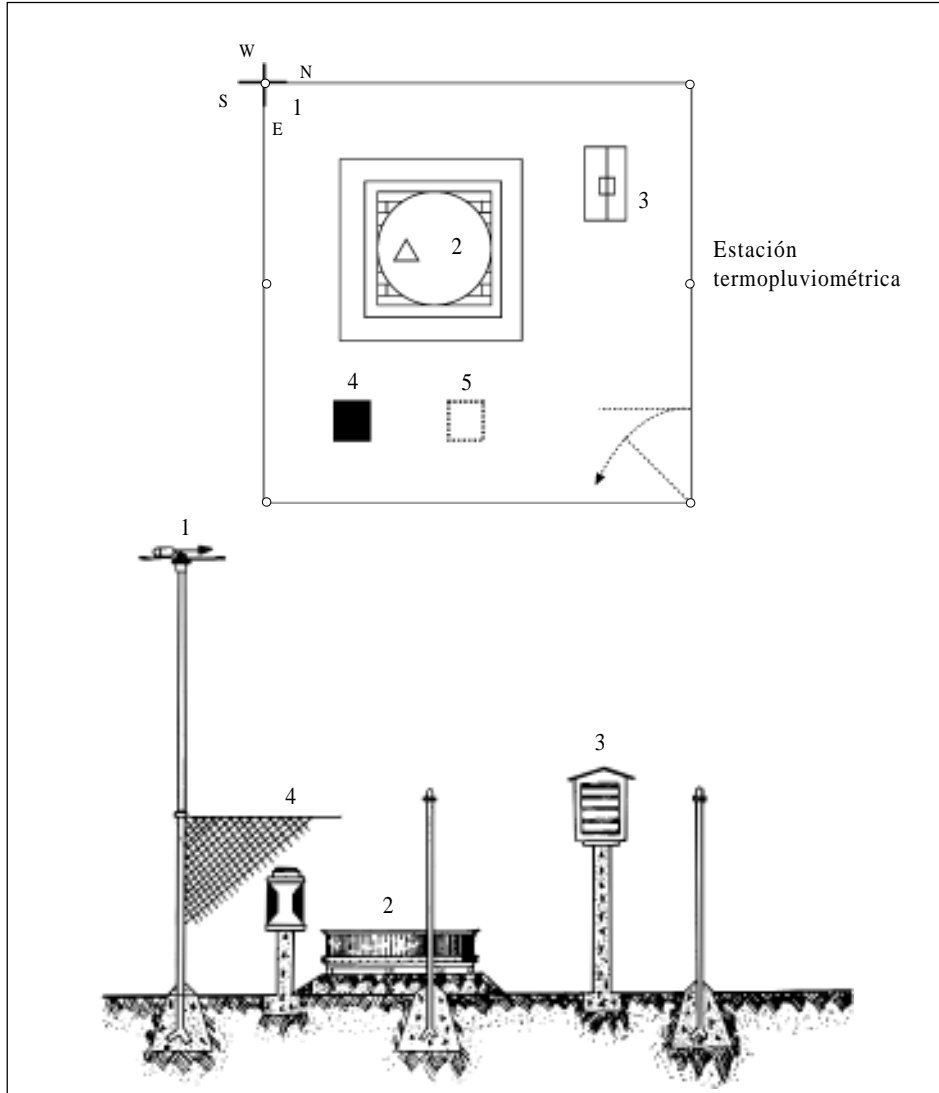
Una estación meteorológica típica consta de los siguientes aparatos (Figura 1) (Ayllón y Gutiérrez, 1983, Ayllón 1996, Torres 1995 , Torres 1997, Burroughs *et al.*, 1998):

- *Pluviómetro*. Con éste se mide la cantidad de lluvia que cae por evento o en un ciclo de 24 horas. El pluviómetro consta de una cubeta de metal (aluminio o lámina de hierro galvanizado) de 30 cm de diámetro y con una altura de 45 cm, que puede estar al ras del suelo o hasta 1 m de altura dentro de la que se encuentra centrada una probeta graduada del mismo material. El embudo también de metal consta de una tapa con una trampa que impide la entrada de basura u hojas que son arrastradas por el viento. Los eventos lluviosos durante un día pueden ser varios por lo que la cantidad suele ser acumulada. En México la lluvia se reporta en mm. Un milímetro de lluvia representa una

lámina de agua de 1 X 1m con una altura de 1 mm, lo cual equivale a un litro. En Europa la lluvia se reporta en metros, lo que equivale a los mm que nosotros entendemos. Con los datos de lluvia se puede evaluar una región por su grado de humedad o sequía: En los extremos de estas calificaciones tenemos los climas áridos *versus* los climas tórridos.

- *Pluviógrafo*. Algunas estaciones meteorológicas cuentan con este tipo de aparato. Es un registrador de lluvia por medio del movimiento de un sistema de trampas o balancines, que mueven una aguja que a su vez registra la cantidad de lluvia en un papel milimetrado hecho *ex profeso*.
- *Evaporómetro*. Este es un tanque cilíndrico con 1.22 m de diámetro y altura de 26 cm y con una cantidad conocida de agua. En la parte superficial cuenta con una llave con un tornillo micrométrico cuya punta toca la superficie del agua en el momento de su calibración; 24 horas después se mide la distancia que dista entre la punta del tornillo y el agua y esa es la cantidad perdida por evaporación. La evaporación depende de la radiación solar y de la intensidad del viento. La sencilla resta de precipitación menos evaporación, indica el balance de agua en un sitio. La evaporación se mide en México en mm de lluvia. Las lecturas se realizan cada 24 horas y los datos resultantes son las sumas acumuladas del mes.
- *Garita o Caseta*. Consiste de una caja de madera a una altura de 1.5 m con paredes con doble pared de ventilas y pintada de blanco por dentro y por fuera de aproximadamente 30 x 50 cm. En ésta se alojan los siguientes instrumentos:
- *Termómetros*. Cada estación meteorológica cuenta con un juego de termómetros para diversos fines:
- *Termómetro al ambiente*. Este contiene generalmente una columna de mercurio y mide la temperatura a la intemperie. Por lo general se encuentra colocado entre 20 y 30 cm por encima del suelo sobre un soporte u horquilla de madera, preferentemente a la sombra. La lectura del termómetro a la intemperie será la del instante de la lectura
- *Termómetro de máximas y mínimas o SIX*. Este aparato tiene forma de U con un bulbo a cada extremo. La columna, que es de mercurio o alcohol teñido de rojo, se desplazará hacia arriba en el bulbo de máximas y hacia abajo en el de mínimas, dejando la marca al quedar fijada una varilla de hierro. Cada día este termómetro deberá calibrarse al topar las varillas de hierro con la columna en ambos extremos, con la ayuda de un imán. Cada 24 horas se obtendrán las temperaturas máximas y mínimas alcanzadas.
- *Psicrómetro*. Con este aparato se mide la humedad relativa de aire en porciento. Consiste de dos termómetros juntos, uno está cubierto con una

Figura 1



Esquema de una estación meteorológica convencional (tomado de Ayllón y Gutiérrez 1983).

camisa de muselina, la cual debe humedecerse con agua destilada. Una vez mojada, se le hace pasar una corriente de aire por medio de un ventilador o bien, si es el modelo de cuerda, se gira un minuto. De esta manera ambos termómetros marcarán diferentes temperaturas, siendo más baja la del bulbo

húmedo. Existen tablas en las que se tienen conocidas las humedades relativas correspondientes a la diferencia entre bulbo seco y bulbo húmedo. En algunas estaciones se tiene el higrotermógrafo de tambor, que mide la humedad relativa y la temperatura. El inconveniente de este aparato, es que periódicamente se tiene que cambiar el papel milimétrico.

- *Barómetro de mercurio y/o barómetro aneroide (de vacío con cápsula de Vidi)*. Con ambos instrumentos se miden la presión atmosférica. Con los datos de presión se puede conocer las características del aire. Por ejemplo ante la proximidad de la lluvia se tiene presión baja. El gradiente barométrico se expresa de forma vertical y horizontal y es muy útil contar con este tipo de instrumento ya que puede ser buen auxiliar para prevenir eventos tales como ciclones o sequías intensas.
- *Veleta y Anemómetro*. Por encima de la caseta y a más de 3m de altura, fuera de la influencia de vegetación o edificios, se colocan estos instrumentos. La veleta mide la dirección del viento que puede ser los distintos componentes entre norte, sur, este y oeste, o bien calma (sin viento). El anemómetro más común de cazuelas, marca la velocidad del viento. Existe un sinnúmero de modelos de anemómetros y los más elementales que son los que están colocados en las estaciones meteorológicas convencionales solamente giran y dan idea de la velocidad del viento. Para resolver esto, se recomienda utilizar la escala de Beaufort (Cuadro 2), que aunque es subjetiva, algunos autores la han equivalido a movimientos en tierra y sobre la superficie de cuerpos de agua como lagos o el mar.

Mediciones y acopio de datos

Las lecturas de los aparatos en cada tipo de estaciones se realizan con distintas frecuencias. En términos generales, en los observatorios las lecturas se llevan a cabo cada hora. En el observatorio nacional, localizado en Tacubaya, ciudad de México, de la misma manera se reciben los datos de cada uno de los otros 76 observatorios. Cada año, se recibe en pliegos especialmente diseñados, la información meteorológica resumida de todas y cada una las estaciones del país que estén en funciones (Figura 2).

Cuadro 2

Núm. de Beaufort	Velocidad	(km/h)	Equivalencia en tierra
0	Calma	0	Humo se eleva verticalmente
1	Aire ligero	1-5	Humo a la deriva
2	Brisa ligera	6-11	Viento golpea la cara, hojas de los árboles se mueven
3	Brisa suave	12-19	Se mueven hojas y pequeñas ramas constantemente
4	Brisa moderada	20-28	Levantamiento de polvo, se mueven hojas, pequeñas ramas y ramas
5	Brisa fresca	29-38	Vibración de pequeños árboles, se arrancan algunas hojas
6	Brisa fuerte	39-49	Movimiento de ramas gruesas y pesadas, movimientos de postes
7	Viento moderado	50-61	Movimiento total de árboles, resistencia del viento a caminantes
8	Viento fresco	62-74	Se quiebran pequeñas ramas, no se puede caminar
9	Viento fuerte	75-88	Se arrancan tejados y chimeneas y ramas gruesas
10	Viento fortísimo	89-102	Se arrancan árboles completos
11	Tempestad	103-117	Daños generalizados
12	Huracán	118-133	Daños generalizados, falta de visibilidad

Escala de vientos de Beaufort.

Escala numérica utilizada en meteorología que describe la velocidad del viento, asignándole números que van del 0 (calma) al 12 (huracán). Fue ideada por el Almirante Beaufort en el siglo XIX (Tomado de Oliver 1973, Ortiz Solorio 1987 y Torres 1997).

La información se suministra en forma de fichas mensuales o diarias, según el tipo de observatorio, y recientemente en ficheros informatizados. Las estaciones completas disponen de información automatizada en archivos. La distribución espacial de las estaciones conforma una malla formada por tres redes superpuestas de amplitud variable:

Las estaciones automatizadas de igual forma pueden ser programadas a la frecuencia deseada, dependiendo de los intereses de los usuarios. De igual forma los requisitos de las estaciones de este tipo oficiales realizan lecturas cada hora y envían la señal al observatorio nacional de inmediato.

En las estaciones convencionales se mide la cantidad de agua recibida en el pluviómetro y la pérdida de agua en el evaporómetro, se registra el dato de ese instante del termómetro al ambiente, las temperaturas máximas y mínimas de las últimas 24 horas, se activa el psicrómetro. Se llevan a cabo las observaciones de los que se llaman fenómenos varios en las últimas 24 horas: cobertura nubosa en

el firmamento (nublado, medio nublado, despejado), presencia de granizo, neblina, rocío, helada, escarcha, nieve, tormentas eléctricas, visibilidad dominante (teniendo como referencia un punto en el horizonte a 10 km de distancia). Asimismo se toma la dirección del viento y su velocidad (al menos en la escala de Beaufort). Todos estos datos son apuntados por el observador en una libreta de bolsillo diseñada especialmente.

Posteriormente esta información es transcrita a los pliegos especiales en el renglón correspondiente a la fecha. Al final del mes el observador hará el resumen o en su caso el promedio (por ejemplo de la temperatura media), los datos extremos: temperatura máxima, temperatura mínima, lluvia máxima en 24 horas las sumas de precipitación pluvial y de evaporación correspondientes al mes los 30 días.

En cuanto a los fenómenos, hará la suma del número de días: con lluvia apreciable (de 0.1mm en adelante, con lluvia inapreciable, con tempestad eléctrica, niebla, heladas, rocío, nevada, granizo, cielo despejado, medio nublado, nublado. Además se sacará el resumen del viento dominante del mes y de la visibilidad dominante. Sin embargo no todas las estaciones convencionales en la actualidad toman nota de los fenómenos, por lo que ya no se pueden emprender trabajos de análisis con esta información más que los históricos.

Previsión del tiempo y reportes diarios

Este tipo de información solamente se puede solicitar en los observatorios. Debido a la infraestructura en instrumentación con que cuentan y a que están enlazados en tiempo real se puede consultar la trayectoria de algún tipo de fenómeno que esté afectando o pueda afectar la zona de interés. Tal sucede con las perturbaciones tropicales (huracanes), los frentes fríos o “nortes”, o bien si se está en la costa, las marejadas. La información se puede solicitar por vía telefónica, por FAX, correo electrónico, o bien consultando las siguientes páginas WEB de la Comisión Nacional del Agua- Servicio Meteorológico Nacional, de la Comisión Federal de Electricidad y del Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática: www.smn.cna.gob.mx; www.cfe.gob.mx; www.inegi.gob.mx; Algunas direcciones internacionales que proporcionan información sobre pronóstico de tiempo, como frentes, huracanes e información de otros países: www.weather.com; www.nhc.noaa.gov; www.ssd.noaa.gov; www.hpmoc.navy.mil; Sobre cambio climático y fenómenos como El Niño www.cdc.noaa.gov; www.igbp.kva.se

Las tarjetas de “parámetros climatológicos” se conforman en juegos de todas las variables o parámetros climatológicos y están almacenadas por estación. Los parámetros que se pueden solicitar son los siguientes: Temperatura media; temperatura máxima extrema; temperatura mínima extrema; promedio de temperaturas máximas diarias; promedio de temperaturas mínimas diarias; oscilación de la temperatura; precipitación total en mm; lluvia máxima en 24 horas; evaporación total en mm; días con lluvia apreciable (de 0.1 mm en adelante); días con lluvia inapreciable; días con tempestad eléctrica; número de días de rocío; días con granizo; días con heladas; días con nevadas; días con niebla o neblina; días despejados; días seminublados; días nublados; vientos dominantes (dirección y velocidad); y visibilidad dominante. Adicionalmente a esta información en los observatorios se puede solicitar la información de radiación solar, insolación, presión atmosférica, velocidad del viento en m/seg, humedad relativa, temperatura superficial (al ambiente), frecuencia de rayos.

En las tarjetas están contenidos los promedios o sumas mensuales de enero a diciembre de cada año de cada variable. Cada lado de la tarjeta contiene una década, comenzando por el año 1 al 10. Por ejemplo si una estación cuenta con registros del dato que nos interese (como temperatura media) desde 1921, contaremos con una tarjeta que tenga información de enero a diciembre y la anual de 1921 a 1930; en la parte trasera datos de 1931 a 1940; la siguiente tarjeta de 1941 a 1950 y al reverso de 1951 a 1960 y así sucesivamente hasta terminar con el año 2000. En la actualidad se estaría llenando una tarjeta que contendría la información de 2001 a 2010. La ventaja de contar con este tipo de tarjetas para ser consultadas es que regularmente los estudios climatológicos se realizan contando con los datos mensuales. Solamente para estudios muy detalladas se debe recurrir a los datos diarios de los expedientes. Por lo general en las oficinas del Servicio Meteorológico, se puede solicitar el fotocopiado de estas tarjetas y posteriormente poder así capturarlas en computadoras en las oficinas o laboratorios, para los fines que se requieran de investigación.

El Servicio Meteorológico Nacional ha publicado de forma eventual los resúmenes y promedios de acuerdo con los lineamientos de la OMM. Si se desea contar con esta información se puede recurrir a las bibliotecas especializadas, donde se encuentran depositados estos libros. Por lo general las normales que pueden ser de 1940 a 1980 se utilizan como punto de referencia para comparaciones con décadas o valores de algún año en particular. Las anomalías son los valores por encima o por debajo de las normales y sirven para determinar si un año es seco o húmedo y si es caliente o es frío de forma comparativa.

La Comisión Nacional del Agua elaboró una base de datos con los resúmenes mensuales de todas las estaciones climatológicas del país en funciones (*CLICOM*).

Figura 3

SERVICIO METEOROLÓGICO MEXICANO													
CHENALHO, CHIS. OSCILACION DE TEMPERATURAS Forma T-9.													
AÑOS	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	ANUAL
1951	13.5	13.1	12.8	12.4	12.1	11.2	10.9	11.3	10.4	10.4	11.2	10.7	11.0
52	13.6	13.9	14.3	12.6	11.3	10.5	10.5	11.6	10.5	9.6	11.5	12.4	10.7
53	13.6	13.1	13.6	13.7	12.0	10.5	10.4	11.1	9.9	10.3	10.6	12.1	11.7
54	10.2	9.4	10.5	9.6	8.5	8.0	9.1	9.3	8.6	8.3	9.6	7.5	9.3
55	10.4	9.4	10.4	10.1	9.7	9.8	9.7	10.1	9.3	10.6	10.9	10.4	
56	10.4	10.8	10.7	12.3	10.0	9.7	10.3	10.5	9.0	9.7			
57	10.3	10.7	11.0	10.9	11.2	10.0	8.9	8.9	9.2	9.6	10.2	10.5	
58	10.9	10.8	11.4	11.3	10.9	9.5	10.0	10.2	9.8	9.9	9.7	9.1	
59	9.5	10.0	10.4	13.2	12.7	11.6	12.3	11.7	11.1	10.3	11.1	12.6	
60	11.4	12.3	13.6	13.6	13.6	11.1	11.3	11.1	9.9	10.6	11.5	11.2	

Tarjeta de información resumida o promediada mensual típica de alguna estación climatológica

Esta base de datos es una modificación de la hoja de cálculo Excell y proporciona los promedios. Esta base de datos incluye el periodo 1961- a la fecha de las variables temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura media, precipitación pluvial, evaporación y días con precipitación apreciable. Generalmente se puede solicitar en las oficinas de las gerencias estatales o regionales de la CNA, mediante un oficio y por intercambio de diskette. El hecho que la información esté en una base de datos, tiene como ventajas que se puede representar gráficamente con facilidad y se procesa en muy poco tiempo.

Hace poco tiempo el Servicio Meteorológico Nacional y la Comisión Nacional del Agua (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua) publicaron una base de información conteniendo los datos diarios de la mayor parte de las estaciones climatológicas de todo el país (ERIC I y ERIC II). Los parámetros que se reportan son temperatura al ambiente, temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación, evaporación, cobertura del cielo (nublado, despejado, seminublado), niebla, granizo y tormentas eléctricas. Esta base de datos contiene la información depurada en parte de las estaciones antiguas, de tal manera que se incluye información desde 1948 hasta 1998 para las estaciones históricas. Para las estaciones con menos años tiene la información diaria desde su inicio y hasta 1998 o hasta que haya sido suspendida. Contiene, adicionalmente las coordenadas geográficas y altitud de la estación municipio al que pertenece y la clave numérica asignada

por el Sistema Meteorológico Nacional (SMN). Esta base de datos se vende en formato de disco compacto y se puede abrir en el programa *Excell*, con lo que fácilmente se pueden elaborar los promedios mensuales, información ya susceptible para trabajarse de forma convencional.

La base de datos Sistema de Consulta DAT322 parecida a ERIC, en la que se han seleccionado algunas estaciones de cada estado del país, con una gran cantidad de datos. Contiene la información diaria de la temperatura ambiente, temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación, evaporación, condición de cielo (nublado, despejado, seminublado), niebla, granizo y tormentas. Dentro del mismo programa y base de datos se pueden calcular los promedios y sumas mensuales y se puede exportar la información a *Lotus* o *Excell*. Contiene además un mapa de distribución de las estaciones que se reportan en la República Mexicana.

La información se solicita de manera oficial. Si el solicitante es un estudiante, por lo general solamente se requiere que muestre su credencial. En ocasiones el usuario no cuenta con recursos económicos para el pago de fotocopias de la información o carece de diskette. En ese caso, tendrá que transcribir la información a mano. Para esto se recomienda recurrir con papel con rayas verticales y horizontales en el que exista en espacio probable, suficiente para poder transcribir con claridad.

En el caso que la información sea proporcionada en forma electrónica (Diskette o CD), se recomienda que los programas que se utilicen posteriormente para realizar los cálculos sean compatibles con la versión de la base de procedencia. Es importante destacar que la información meteorológica y climatológica no solamente se puede obtener en la CNA y el SMN, sino en otras dependencias gubernamentales o bien directamente con los observadores (las personas que toman los datos diariamente) si eso pudiera ser posible.

Análisis de la información e interpretación

La información obtenida, en primera instancia debe ser procesada para poder ser utilizada o comparada. A continuación se describen los pasos recomendados para trabajar con dichos datos.

Se recomienda recopilar la mayor cantidad de años posibles de lecturas que tenga(n) la(s) estación(es) que se trabajen y que sean las más cercanas al sitio de estudio. Es importante señalar de todos los datos climáticos a los que se puede tener acceso, la temperatura media y la precipitación pluvial son los que dan la mejor idea de la descripción climática de un lugar.

El primer tratamiento a los datos, es que una vez que se tenga toda la información por variable reunida, se observe si existen o no espacios vacíos, es decir

carentes de información. Si en un año existen más de seis meses faltantes de información, se sugiere no considerar ese año. Es necesario llenar los espacios con la finalidad de uniformar la información. Comúnmente los espacios vacíos se rellenan con el promedio de 10 años del mismo mes, considerando en lo posible que sean de 5 años antes y cinco años después del faltante. Una vez depurados los años y completada la información, se procede a calcular las medias aritméticas, ya que la climatología convencional está basada en los promedios de muchos años. Hace algunos años surgió una corriente dentro de la climatología en la que se comenzó a utilizar la moda o el valor más frecuente. Sin embargo se vio que para poder emprender una climatología basada en la moda estadística, sería necesario el contar con información climatológica de muchos años, muy completa y de excelente calidad. Como esta es una meta muy difícil de alcanzar se ha optado por continuar utilizando los promedios como puntos de descripción. El Cuadro 3 ejemplifica el cálculo de promedios de temperaturas medias en un periodo de 10 años. Puede observarse que el promedio anual es el promedio de promedios de todos los meses de todos los años de lecturas.

Cuadro 3

Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual
1991	25.0	24.2	27.6	30.5	30.4	29.8	29.3	29.0	28.3	26.7	24.0	24.2	27.4
1992	23.5	23.8	27.2	27.8	27.3	30.8	28.8	28.9	28.6	27.0	25.8	23.9	27.0
1993	24.4	24.0	24.8	27.8	29.2	28.7	29.1	29.2	28.9	28.0	25.8	23.5	27.0
1994	23.9	25.8	25.9	29.2	29.8	29.1	29.7	29.6	28.9	28.4	25.3	24.3	27.5
1995	24.3	25.0	26.6	29.6	32.5	30.6	29.5	29.6	29.7	27.0	25.5	24.1	27.8
1996	22.3	24.1	24.6	28.4	29.9	29.2	29.6	28.0	30.1	27.4	25.1	23.7	26.9
1997	23.5	25.8	28.0	29.4	29.3	29.4	29.0	29.3	28.6	26.8	25.6	23.0	27.3
1998	23.7	25.2	25.6	29.0	30.8	31.2	29.5	29.9	30.0	28.0	25.4	23.6	27.7
1999	23.3	25.2	27.0	29.7	31.0	28.8	28.0	29.1	29.0	26.2	23.1	22.5	26.9
2000	22.5	23.5	27.0	27.9	29.4	27.3	29.0	27.9	28.3	25.5	25.1	23.6	26.4
Promedio	23.6	24.7	26.4	28.9	30.0	29.5	29.2	29.1	29.0	27.1	25.1	23.6	27.2

Promedios de temperaturas de una estación climatológica

El Cuadro 4 ejemplifica los cálculos que se realizan con la precipitación total. Se aprecia que con ésta se suman las cantidades recibidas diario y en el mes se da el total. En el total del periodo de lecturas se realiza el promedio por mes; sin embargo, la anual es la suma de los promedios de todos los meses.

Los datos y los promedios presentados en los Cuadros 3 y 4 son reales, corresponden a una estación climatológica del estado de Yucatán. Se puede apreciar que la temperatura media no varía tanto en el mismo mes de distintos años, como

sí sucede con la precipitación. Es precisamente la alta variabilidad de la lluvia lo que ha conducido a los climatólogos que, para caracterizar el clima de un sitio, es necesario contar con un número considerable de años de lecturas, mayor de 20.

Cuadro 4

Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual
1991	71.3	47.2	2.2	0.0	43.5	115.0	118.4	227.0	188.3	89.7	22.4	165.6	1090.6
1992	22.6	23.2	37.5	115.2	14.0	118.8	158.2	175.3	210.2	47.7	238.4	22.3	1183.4
1993	198.3	2.2	11.3	21.8	114.1	230.1	184.9	73.0	291.6	112.0	26.3	15.8	1281.4
1994	85.4	31.7	8.4	143.4	33.8	318.4	67.8	203.0	159.0	129.9	33.6	33.4	1247.8
1995	35.7	0.0	22.1	14.0	21.8	139.1	180.9	270.2	209.9	359.8	19.8	105.5	1378.8
1996	17.8	5.2	37.5	28.6	37.8	121.3	195.1	146.0	68.0	131.8	3.1	62.3	854.5
1997	0.0	54.8	2.7	59.7	271.1	157.3	194.6	163.0	107.5	169.7	33.4	25.9	1239.7
1998	81.7	3.8	10.1	29.4	39.8	124.2	174.8	174.2	208.6	176.7	83.1	26.6	1133.0
1999	8.5	5.4	53.8	4.2	166.4	222.8	131.3	227.2	71.1	222.6	29.7	45.9	1188.9
2000	0.8	2.7	12.6	1.2	81.1	279.5	77.0	179.3	81.8	99.5	54.4	55.9	925.8
Promedio	52.2	17.6	19.8	41.8	82.3	182.7	148.3	183.8	159.6	153.9	54.4	55.9	1152.4

Promedios y suma total de promedios de precipitación pluvial

Los datos tales como “número de días”.... se procesarán de forma similar a la precipitación. En la casilla de cada mes aparecerá el total correspondiente, la anual será la suma de los totales de todos los meses. El promedio de un periodo se hará promediando las casillas de cada mes y la suma de los promedios será la anual.

La temperatura del aire es, con la humedad, el carácter climatológico más importante. Por su influencia en todas las actividades del hombre, en la vegetación, fauna, etc., entra a formar parte de las clasificaciones climáticas, desde el macroclima hasta el microclima. Los parámetros de la temperatura más comúnmente utilizados en las clasificaciones climáticas y en los estudios del régimen térmico de una localidad son las siguientes:

Los valores absolutos son: temperatura máxima diaria; temperatura mínima diaria; las temperaturas máxima y mínima anuales; y temperaturas máxima y mínima mensuales.

Los valores medios son: a) Temperatura media diaria, que puede tomarse como el promedio de observaciones realizadas cada hora, como el promedio de lecturas realizadas a las 7.00, 14.00 y 21.00 horas (esta última contada dos veces), o simplemente como media aritmética de la máxima y mínima diarias, b) Temperatura media mensual, media aritmética de las medias diarias del mes correspondiente; c) Temperatura media mensual de las máximas; d) Temperatura media mensual de las mínimas; e) Intervalo diario de temperatura o diferencia en

grados centígrados entre la máxima y la mínima diaria; y f) Intervalo anual de temperatura, diferencia entre la media del mes más cálido y del mes más frío.

Otros parámetros son: a) Período libre de heladas: número de días en que la temperatura es continuamente superior a cero grados centígrados; b) Estación media libre de heladas: número de días desde la fecha media de la última helada de primavera hasta la fecha media de la primera helada de otoño; c) Temperatura nocturna efectiva: media mensual de las mínimas, más un cuarto (intervalo medio mensual); y d) Temperatura diurna efectiva: media mensual de las máximas, menos un cuarto (intervalo medio mensual).

La temperatura experimenta variaciones que es conveniente conocer cuando se trata de realizar un análisis climático completo. En un mismo lugar la temperatura presenta variaciones diarias y estacionales; dentro de una zona de alguna extensión pueden darse variaciones con la altitud (verticales), con la latitud (horizontales) o debidas a otros factores (relieve, masas de aguas próximas). En los estudios del medio físico son las variaciones de un lugar a otro las que interesan más, en cuanto pueden definir meso o microclimas; el conocimiento de modo de variación es particularmente importante, ya que permite deducir valores de la temperatura, para un lugar donde no se recogen directamente, a partir de datos conocidos de otro lugar. El caso más frecuente es el de las variaciones altitudinales: se admite que el gradiente vertical de temperatura se sitúa entre 10.8 y 0.8° C y que su valor medio es de 0.55° C .

La precipitación se define como el agua que cae sobre la superficie de la tierra tanto en forma líquida como sólida. La precipitación viene siempre precedida por los fenómenos de condensación y sublimación o por una combinación de los dos. La precipitación es uno de los caracteres del clima más definitorios. Es también factor controlador principal del ciclo hidrológico en una región, así como de la ecología, del paisaje y de los usos del suelo (García, 1989; Henderson-Sellers y Robinson 1996; Mc Gregor y Niewolt 1998).

Según su origen, pueden distinguirse en: a) Precipitaciones *ciclónicas* o de *frentes*; b) Precipitaciones *convectivas*; y c) Precipitaciones *orográficas*.

Según la forma en que se presenta, la precipitación recibe los nombres de: a) Lluvia. Gotas líquidas de diámetro comprendido entre 0.05 mm y 3 mm, que llegan al suelo con velocidad mayor a 3 m/seg y menor a 7 m/seg; b) Llovizna, gotas líquidas de diámetro inferior a 0.5 mm, muy numerosas, que caen con velocidad inferior a 3 m/seg y casi siempre superior a 1 m/seg; c) Chubasco, gotas grandes más o menos dispersas, de diámetro superior a 3 mm que caen con velocidad superior a 7 m/seg; d) Nevada, copos constituidos por cristales hexagonales de hielo, microscópicos, que caen con poca velocidad y forman en el suelo capas de estructura esponjosa; e) Nieve granulada, granos esféricos de nieve cristalina,

de 3 a 5 mm, de diámetro, frágiles, que rebotan al tocar el suelo; y f) Granizo, granos de hielo redondeados, de estructura concrecionada, en los que alternan ordinariamente capas amorfas y capas cristalinas, de tamaño variable desde 1 mm en adelante.

En los registros climatológicos no se consideran por separado las distintas formas y orígenes, excepto la nieve y el granizo, ya que los efectos de estos últimos presentan una significación especial. En concreto, es interesante conocer la frecuencia de granizo en una determinada localidad para el desarrollo de actividades agrícolas, o la acumulación de nieve para el abastecimiento de agua.

Hay una serie de datos de precipitación que se observan y registran en las estaciones climatológicas, y otros que se pueden deducir como variables a partir de los primeros. En los registros climatológicos suelen anotarse los siguientes datos: Número de días y cantidad de lluvia, nieve y granizo, por separado; Número de días de precipitación; Datos de duración y forma de la precipitación; Valores extremos (máximos o Mínimos) de precipitación (mensuales o anuales); Precipitación máxima registrada en veinticuatro horas; y Totales anuales, mensuales y diarios.

A partir de los datos observados y registrados se obtienen otros parámetros que se utilizan para caracterizar el régimen de precipitaciones de un determinado lugar o para aspectos concretos en relación con el medio físico. Por ejemplo, los promedios definidos por la media aritmética de los valores de precipitación anuales de una serie de años, que la OMM ha fijado en treinta años, como por ejemplo: (media mensual, media anual, media de las máximas y mínimas, número medio mensual de días de lluvia, número medio anual de días de lluvia y precipitación anual o media.

Cuando la distribución de las estaciones no es uniforme y la variación entre estaciones es relativamente grande se utiliza el método de Thiessen (Oliver 1973; Griffiths 1976). Se basa en el criterio de la asignación a cada punto de la cuenca de la precipitación registrada en el pluviómetro más cercano. Para su aplicación se unen mediante líneas de trazo discontinuo las estaciones adyacentes, resultando una serie de triángulos. Luego se dibujan, con líneas de trazo continuo, las mediatrices de cada lado de los triángulos. Las intersecciones de estas mediatrices definen un conjunto de polígonos. A cada polígono se le asigna la precipitación correspondiente a la estación que está en su interior. Se mide el área de cada polígono y se expresa como una fracción decimal del área total de la cuenca. Es decir, que si las áreas de los polígonos son $S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$, y las precipitaciones respectivas son $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$; la "precipitación media" P sobre la superficie total considerada S se calcula así (Ortiz-Solorio 1987):

$$P = \frac{S_1}{S} P_1 + \frac{S_2}{S} P_2 + \dots + \frac{S_n}{S} P_n$$

Es necesario considerar que los avances de la climatología se han dado en dos vertientes: En el conocimiento de la física de la atmósfera y en las aplicaciones de la estadística simple y compleja. Para los fines de este escrito solamente se dedicará espacio a la mención de algunos métodos estadísticos que se aplican en climatología. Como se ha visto en párrafos anteriores, lo más común en climatología es la utilización de las medias aritméticas de los datos obtenidos a partir de observaciones. En estadística aplicada a la climatología, existen tres tipos de datos: los de caracteres primitivos, los de caracteres elementales y los de caracteres superiores (García, 1978).

Los caracteres primitivos son aquellos que se pueden interpretar sin necesidad de realizar cálculos, si acaso agrupaciones como los valores extremos, agrupaciones por rangos y distribuciones de frecuencias.

Los caracteres elementales son los que se realizan con cálculos sencillos como los de la estadística descriptiva: media, mediana, moda, desviación estándar, cuartiles, deciles, percentiles.

Los caracteres superiores son aquellos que requieren estadística más compleja y son: varianza, coeficiente de variación, error estándar, distribución de poisson, distribución de X^2 , distribución gamma, series de fourier, etc.

Para conocer la variabilidad de los datos, es necesario utilizar la estadística descriptiva a través de las medidas de dispersión y medidas de tendencia central.

Las medidas de dispersión son aquellas que conducen a saber qué tan variables son nuestros datos. De ellas es necesario conocer el rango de variación o límites entre los que caen nuestros datos. También es necesario saber el tipo de distribución de los datos; si tienen distribución normal, de poisson o de algún otro tipo.

Otras medidas de dispersión son la ordenación por cuartiles, deciles o percentiles, la varianza, desviación estándar, error estándar y coeficiente de variación.

Las medidas de tendencia central son aquellas que buscan encontrar el dato alrededor del que tienden a agruparse los demás datos. Las medidas de tendencia central principales son el promedio o media aritmética, la moda o sea el valor más frecuente, la mediana o el valor que cae exactamente a la mitad de los datos. Es importante señalar que cuando los datos obtenidos tienen una distribución normal, la media, moda y mediana son iguales. Una forma de estimar la distribución de un conjunto de valores, es ver qué tan separadas están la media de la moda y la mediana respectivamente.

La forma en que se puede representar la distribución de frecuencias, es por medio de histogramas, en los que previamente se han definido los intervalos de clase, o bien por medio de una curva, denominada polígono de frecuencias. Otra forma de representar los datos es por medio de la curva de frecuencias acumuladas u ojiva. Si los datos tienen la tendencia a dos valores más frecuentes entonces

la curva es bimodal y también puede ser multimodal si tienen más de dos valores más frecuentes.

Hay una gran cantidad de métodos aplicables a la estadística como es el cálculo de probabilidades de algún evento, y dependiendo del tipo de distribución de los datos de base, se pueden utilizar diversos tratamientos.

Otro tipo de cálculo que se puede realizar, es el de ANOVA o análisis de varianza, siempre y cuando se tengan claramente establecidas las hipótesis de trabajo, es decir, se sepa exactamente qué se está buscando. Es muy común que los promedios convencionales de los datos de las estaciones utilizadas en las investigaciones, se relacionen entre sí con el objeto de obtener índices.

El índice más sencillo y comúnmente utilizado es el de Lang; con éste, conociendo valores límites se puede estimar el grado de humedad o de sequía de un sitio. Así como ese índice, se han introducido índices, como los que se incluyen en el Cuadro 5. Una de las estrategias para utilizar los datos climatológicos de las estaciones ha sido la aplicación, inclusive combinada de los índices de aridez. Cada índice cuenta con límites entre diferentes grados de humedad o aridez, que han sido extraídos de forma empírica. En México con el índice de Lang, por ejemplo el valor limítrofe entre los climas semiáridos y áridos es de 22.9. Por lo anteriormente mencionado, es recomendable utilizar dicho índice.

Por otro lado, una de las maneras más sencillas de mostrar las características climáticas (reparto de la lluvia y la temperatura) de un sitio a lo largo del año, es a través de la representación gráfica. Existen varios tipos de gráficas para representar al clima, las que genéricamente se denominan climogramas. Los climogramas en casi todos los casos representan la distribución de la temperatura y de la lluvia a lo largo del año, aunque a veces se incluyen otros datos como temperaturas máximas y mínimas, evaporación, días con lluvia apreciable, lluvia máxima en 24 horas, etc.

Climograma

El climograma más elemental se construye de la siguiente forma: en el eje de las x , se escribe la serie de los 12 meses del año en espacios equidistantes y se tienen dos ordenadas y_1 y y_2 . En y_1 , que es de la izquierda, por lo general se escribe la escala de la temperatura (en grados centígrados). En y_2 se escribe la escala de la precipitación pluvial o lluvia. La temperatura del mes se representa por un punto; todos los puntos están unidos por una línea continua. La precipitación, como es cantidad, se representa por una barra. La figura 4 presenta un ejemplo de climograma. Si se desea, se puede diseñar un climograma en el que aparezcan series de meses de varios años, a condición que estén ordenados cronológicamente. También puede representarse la

Cuadro 5

Autor	Fórmula	Aplicaciones y datos
Dokuchaiev	P/E_0	(P precipitación y E evaporación. Se compara la cantidad de lluvia respecto a la evaporación)
Oldekop	P/E_0	E_0 evapotranspiración potencial $E_0 = d$, siendo d déficit de saturación y coeficiente de proporcionalidad
Lang	P/t	Índice de humedad, se usan las anuales
Koeppe	$2(t+7)$	Índice para separar los climas secos de los húmedos
De Martonne	$P/t+10$	Índice para separar climas secos de húmedos
Meyer	P/d	En el que se introduce el déficit de saturación(d)
Reichel	$NP/t+10$	Es una modificación al de Martonne, solamente que N es el número de días con lluvia apreciable
Emberger	$100P/(M+m) (M-m)$	Se utilizan las temperaturas máximas (M) y mínimas (m)
Ivanova	P/E_0	E_0 se calcula por $0.0018 (25+t)^2 (100-a)$, siendo t la temperatura media mensual y a la humedad relativa mensual
Thornthwaite	$100 s - 60d /n$	s = superávit de humedad en la época lluviosa y d = déficit de humedad en la época seca, n es evapotranspiración potencial
Prescott	$P/S_d 0.7$	S_d es el déficit de saturación y P la precipitación en pulgadas
Budyko	R_0 /LP	R es balance de radiación, y L calor latente de saturación
Kostin	P/E_0	$E_0 = dn/4 (1+ 0.004t)^2$

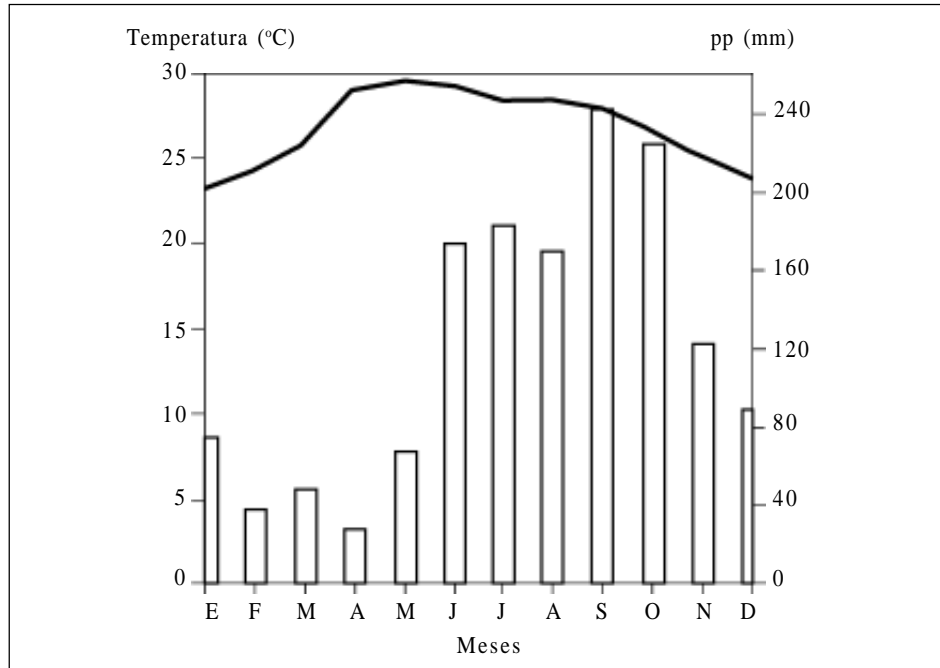
Índices de humedad o sequía (Oliver, 1973)

temperatura media anual y la precipitación total anual de año con año, con lo que se dará idea de la variación interanual.

Climograma de Péguy

Este tipo de gráfica tiene los mismos ejes que la anterior y ha servido de base para la clasificación climática del mismo autor. Sin embargo, en este caso tanto temperatura como precipitación se representan por puntos unidos con líneas continuas. En la versión original de Péguy, el eje que representa las temperaturas está a mano derecha aunque hemos preferido no representarlo de esa forma. Adicionalmente, la gráfica está dividida en las siguientes subáreas que representan los periodos del año: G meses fríos, F meses fríos y húmedos, O meses templados óptimos, A meses áridos, T meses tropicales. La figura 5 muestra este tipo de gráfica.

Figura 4

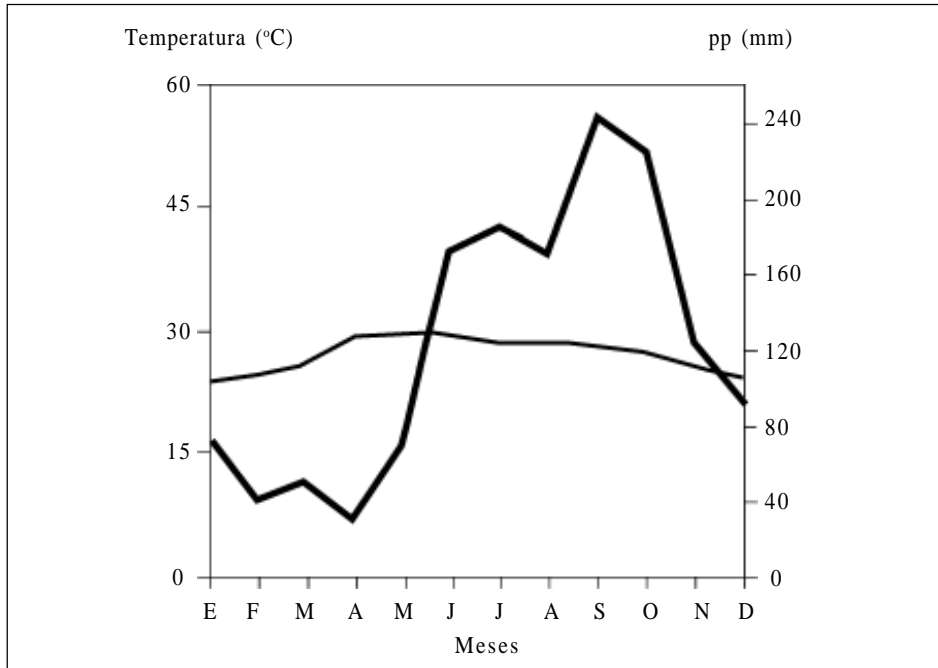


Climograma de una estación (Ciudad del Carmen).

Diagramas ombrotérmicos

Las gráficas o diagramas ombrotérmicos fueron diseñadas originalmente por Gaussen y Bagnouls (1954) (Citado en García et al., 1983) En estas gráficas la condición es que la escala de la precipitación es el doble de la temperatura de acuerdo con la fórmula $p= 2t$. A partir de la representación gráfica, se extraen las siguientes áreas: sequía relativa, déficit hídrico, condición de humedad, superávit de lluvia. García y colaboradores (1983) realizaron adaptaciones a los diagramas ombrotérmicos al modificar la fórmula $p= 2t$ al introducir unas constantes que Köppen utilizó para definir regímenes de lluvia, a saber: $2t$ para sitios con régimen de lluvias de invierno, tipo mediterráneo, $2t+ 14$ para régimen de lluvias uniformemente repartidas, $2t+28$ régimen de lluvias de verano y $2t+ 21$ para regímenes de verano y alto porcentaje de lluvia invernal (mayor de 10.2) (Figura 6).

Figura 5



Climograma según el criterio de Péguy

Sistemas de clasificación climática

Todo sistema de clasificación tiene por objeto disponer la información en forma simple y generalizada. Por consiguiente, las estadísticas climatológicas pueden ser organizadas de manera que describan y delimiten los principales tipos de clima en términos cuantitativos. Es evidente que no existe una clasificación climática única que pueda utilizarse de manera satisfactoria para más de un número limitado de fines, por lo que se han desarrollado varios esquemas distintos. Algunos proporcionan un sistema adecuado de nomenclatura, mientras que otros constituyen los preliminares necesarios para un estudio posterior. Así, por ejemplo, existen diversas clasificaciones de las relaciones entre el clima y la vegetación o el suelo, pero aunque resulte sorprendente, son escasos los intentos realizados para basar una clasificación sobre los efectos directos del clima en el hombre.

Los enfoques para las clasificaciones climáticas se dividen, por lo general en el método aplicado o empírico y el método genético. El primer método se basa en las características observadas, como son los elementos climáticos. El método genético está basado en los factores que determinan los diversos climas -como,

Figura 6

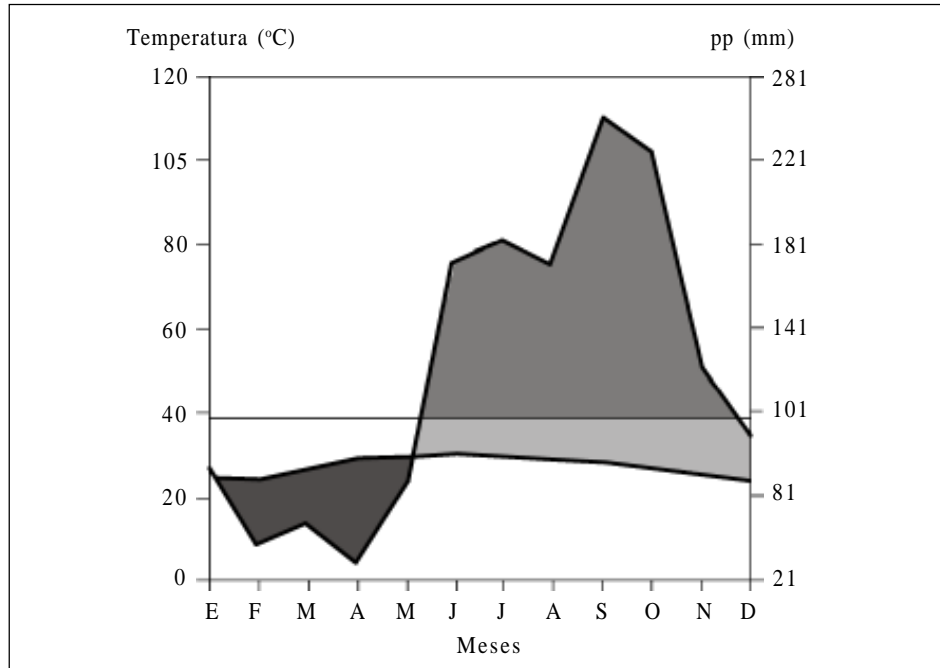


Diagrama o gráfica ombrotérmica de Ciudad del Carmen

por ejemplo, los grandes sistemas de presión y de viento-. Así, desde la época de la Grecia clásica se advirtió la relación entre la latitud y la temperatura, estableciéndose la clasificación climática “tórrida”, “templada” y “fría”, que todavía persiste. Los elementos climáticos más frecuentemente usados para definir los diferentes tipos de clima son la temperatura y la precipitación; sin embargo, no es posible ignorar otros elementos del clima como la nubosidad, los vientos, la radiación solar, etc.

Clasificaciones empíricas o efectivas

La mayor parte de las clasificaciones tienen como base la vegetación y no a los elementos climáticos. La vegetación natural, según esta idea, se integra a los efectos del clima mejor que cualquier instrumento meteorológico. Es, en consecuencia, uno de los índices de las condiciones climáticas.

Se han encontrado numerosas correlaciones entre los factores climáticos y la vegetación, por lo que ésta sigue siendo la base de las clasificaciones más usadas,

aún cuando el clima no es el único factor que afecta a la vegetación natural. Empleando esta base, los climatólogos, botánicos o fitogeógrafos han partido de las asociaciones vegetales principales y a través de éstas, han intentado determinar los factores climáticos responsables de las diferencias zonales de vegetación.

El sistema de clasificación más utilizado es el propuesto por Köppen. Éste intentó relacionar el clima con la vegetación, según una base numérica objetiva, para definir cada tipo climático. Así, empleando el mapa mundial de vegetación de A. De Candolle, Köppen ideó su clasificación en 1884. Posteriormente en 1918, revisó su trabajo poniendo en esta ocasión más énfasis en la temperatura y la lluvia.

En 1931, Thornthwaite, utilizando datos de evaporación, derivó una fórmula empírica con la cual se puede calcular el cociente P/E, a partir de datos mensuales de lluvia y temperatura.

Cuando se hace referencia al clima de un sitio o de una región, siempre será en comparación con otros. En el afán de contar con estas comparaciones, han surgido las clasificaciones climáticas. Con el afianzamiento de la climatología como disciplina, durante la primera mitad del siglo XX se introdujeron un considerable número de clasificaciones. A continuación se mencionarán algunas de las más importantes como referencia; al final se detallará un poco la de Köppen modificada por García (1964) (citado por García, 1988) que es la utilizada oficialmente en México.

El Sistema de Miller, ha sido muy usado en Gran Bretaña, es una clasificación muy simple y descriptiva; está basada en las divisiones de las zonas térmicas y sus subdivisiones dependiendo la estacionalidad de la precipitación y por ende, se basa en los límites de la vegetación. El sistema de Miller utiliza el índice de Martonne que define la aridez a partir de la fórmula: $P < T/5$ que está definida porque la cantidad de lluvia recibida es menor que un quinto de la temperatura. La clasificación se completa con la superposición de la distribución estacional de la lluvia, lo que da tres tipos diferenciados: a) Areas con lluvia en todas las estaciones; b) Areas con marcada sequía estacional; y c) Area seca $P < T/5$. El sistema de Miller define los grupos siguientes: A climas cálidos; B climas cálido templados; C climas templados fríos; D climas fríos; E climas árticos; F climas desérticos; y G climas montanos.

El Sistema de Péguy, también ha sido elaborado con fines de comparación, entre diversos ambientes climáticos del planeta; al igual que el de Miller, se basa en las clasificaciones hechas por de Martonne. Este sistema se apoya en las gráficas a manera de climograma que han sido descritas en la sección correspondiente. Debido a que las gráficas incluyen todos los meses, entonces se considera la sucesión climática a lo largo del año por medio de la combinación de precipita-

ción y temperatura. Las secciones de los climogramas son: G meses fríos; F meses fríos y húmedos; O meses templados óptimos; A meses áridos; y T meses tropicales.

El Sistema de Troll está basado en los sistemas biológicos e incluye las variaciones en las estaciones térmicas e hídricas del año. Para usar ambos factores se utilizan los diagramas de termoisopletas como una parte integral del sistema. En estos diagramas se ven las variaciones de la temperatura diurna y a lo largo del año. El autor considera relevante para los climas tropicales la estacionalidad hídrica, mientras que para los climas extratropicales es más importante la estacionalidad térmica. Los climas resultantes tienen una estrecha relación con la distribución de las plantas; las zonas climáticas que se describen son: I) Zonas polares y subpolares, II) Zona fría templada boreal; III) Zona fría templada; IV) Zona esteparia; V) Zonas templadas cálidas subtropicales; VI) Zonas tropicales; y VII) Zonas litorales con brumas estacionales.

El Sistema de Thornthwaite, está basado en el cálculo de índices y regímenes localizados en gráficas, de la siguiente manera: a) Cálculo de los índices de efectividad de la lluvia P-E a través de $P/T-10$; b) Determinación del índice de eficiencia de la temperatura y cálculo de la evapotranspiración potencial; y c) Determinación del régimen de humedad estacional y d) determinación de la concentración estival de eficiencia térmica. Los pasos para calcular cada uno de los índices se realizan a través de localización en gráficas diseñadas especialmente por Thornthwaite y sus seguidores. La resultante es la conformación de ocho grupos y 32 tipos de clima. Posteriormente ha habido la segunda y tercera modificación al sistema de este autor, en la que se considera las características del suelo y la cubierta vegetal, por lo que este sistema más completo realmente describe unidades del paisaje.

El Sistema Köppen está basado inicialmente en la clasificación de los grupos de plantas de acuerdo a de Candolle y asumiendo que los biomas del planeta comparten hábitats de aproximadamente el mismo clima. Es así que Köppen divide a los climas en los grupos (Primera letra): A tropicales cálido húmedos; B secos: BS secos esteparios, BW secos áridos; C subtropicales; D templados; E boreales: ET climas de tundra, EF clima de hielos perpetuos; F polares; y H de tierras altas. Asigna diferentes regímenes de lluvia que son (segunda letra): *w* régimen de lluvia de verano; por lo menos 10 veces mayor cantidad de lluvia en el mes más húmedo que en el mes seco de la mitad fría del año; *s* régimen de lluvia de invierno, por lo menos tres veces mayor cantidad de lluvia en el mes más húmedo de la mitad fría del año, que en el mes más seco; *x'* régimen de lluvias intermedio, no se cumplen ninguna de las dos condiciones anteriores; y *f* régimen de lluvias abundante todo el año, tampoco con este se cumplen los requisitos de *w* y *s*.

Se asignan también condiciones de temperatura (excepto para los A, en vista que el requisito para pertenecer a este grupo es que el sitio tenga una temperatura media superior a los 22° C). Las condiciones de temperatura se asignan con los siguientes símbolos (tercera letra): Grupo B (BS y BW) (h temperatura media anual superior a 18° C; h' temperatura de todos los meses mayor de 18° C; k temperatura media anual menor de 18° C; y k' temperatura de todos los meses menor de 18° C); Grupo C y D (a con verano caliente, temperatura media del mes más caliente mayor de 22° C; b con verano fresco, temperatura media del mes más caliente menor de 22° C; c con verano frío y corto, temperatura del mes más caliente menor de 22° C y menos de 4 meses con temperatura mayor de 10° C ; y d (solamente en los D) promedio de temperaturas del mes más frío menor de 38° C.

Otras letras adicionales que aparecen en el sistema son: n con nieblas frecuentes; i isotermal con diferencias de temperatura media del mes más frío y el más caliente con menos de 5° C; w'' dos máximos de lluvia separados por dos temporadas secas; g marcha de la temperatura con un máximo antes del solsticio de verano como en Ganges; w' máximo de lluvias en otoño

La adición de las letras de grupo, régimen de lluvias, condiciones de temperatura, dan lugar a las “formas climáticas”.

Sistema de Köppen modificado para las condiciones de México

Para algunos climatólogos y el propio autor, el sistema original de Köppen requería modificarse a condiciones ambientales más locales. Fue la opinión de algunos investigadores además, que el sistema debía de hacerse más didáctico, por lo que algunos se dieron a la tarea en hacerlo. Russell en 1926 realizó la primera modificación al cambiar los límites entre los climas C y D en vez de 26.6 °F a 32 °F. Ackerman en 1941 propuso una fuerte modificación al sistema para que pudiera ser aplicado en Norteamérica. Con la anuencia del propio Köppen, Geiger y Pohl en 1953 publicaron una modificación a su sistema original. Posteriormente, Trewartha en 1954 emprendió sendas modificaciones; en 1964 y 1966 Shear modifica los climas ET e introduce dentro de estos a los de influencia marítima al subgrupo EM y los climas BS que estando en la frontera con los A y C deberían ser BSC y BSA respectivamente. La última modificación de Trewartha implicó cambios en la simbología tales que el sistema resultó muy cambiado respecto al original.

En México Enriqueta García realizó, desde 1964 una serie de modificaciones y adaptaciones a las condiciones particulares del país. Köppen en su obra original menciona que es necesario estudiar a profundidad los climas de las montañas

tropicales, como sería el caso de gran parte del territorio nacional, con lo que se justifica la necesidad de realizar dichas modificaciones. El sistema modificado, resultó con un gran paralelismo respecto a la vegetación, por lo que se apega a la realidad. Este sistema ha sido adoptado de manera oficial en el país y a partir de este se ha generado la cartografía que se usa de base en planes de desarrollo. El sistema modificado por García conserva de inicio la misma simbología aunque se introducen los cambios al sistema de Köppen. En las figuras 7 y 8 se presentan las principales características del sistema de Köppen modificado. Dichas modificaciones son:

1. Se introducen subgrupos climáticos semicálidos de los cálidos y de los templados A (C) y (A) C.
2. Se introducen para diferenciar grados de humedad el índice de Lang o P/T y sus límites importantes: 55.3, 55.0, 43.2 para los subhúmedos y 22.9 para diferenciar entre los secos esteparios y áridos.
3. Se definen la oscilación térmica en las siguientes letras i isothermal, (i') con poca oscilación térmica, (e) extremoso, y (e') muy extremoso.
4. Se definen los límites de porcentaje de lluvia invernal importantes: menor de 5, entre 5 y 10.2 , mayor de 10.2 y menor de 18, mayor de 18, mayor de 36 y menor de 36.
5. Se introduce el valor rh, que no había considerado Köppen $2t + 21$ que describe un régimen de lluvias de verano y alto porcentaje de lluvia invernal.
6. Se definen otros regímenes de lluvia en México: f(m), (f)m, (fm), w_2 , w_1 , w_0 , $w(w)$, $w_{1,2,3}(w)$, $w_{1,2,3}(x')$, $x'(w_{1,2,3})$, $s(x')$.
7. Se introduce el concepto de tipo climático: El grupo climático + régimen de lluvias.
8. Se introduce el concepto de variantes climática: tipo climático + letras adicionales (como sequía intraestival, ganges, condiciones de temperatura, oscilación de la temperatura).

Para estudios relacionados con ecología o con recursos naturales, se invita a utilizar el sistema de Köppen modificado por García, ya que se ha encontrado que guarda una estrecha relación con la distribución de la vegetación. Lo anterior lo distingue como que cada variante climática representa unidades ambientales, lo que lo hace muy práctico.

Figura 7

CUADRO 1 GRUPOS, SUBGRUPOS, TIPOS Y SUBTIPOS CLIMÁTICO				
GRUPO DE CLIMAS	SUBGRUPO CLIMÁTICO	TIPOS	SUBTIPOS	VARIANTES
A Cálido húmedo y subhúmedo temperatura media del mes más frío > 18° precipitación anual igual o mayor al valor calculado por la fórmula v_h del cuadro 2.	A Cálido temperatura media anual > 22° temperatura del mes más frío > 18°	T (w) T (w) T (w) T (w)	$w_2(x^1); w_3(x^1); w_0(x^1)$ $w_0^2; w_1^2; w_2^2$ $w_0^2; w_1^2; w_2^2; w_0^2$ $w^1(w_2); w^1(w_1); w^1(w_0)$	a a a a
	A(C) semicálido del grupo A temperatura media anual entre 18° y 22° T del mes más frío > 18°	T (w) T (w)	$w_2(x^1); w_3(x^1); w_0(x^1)$ $w_0^2; w_1^2; w_2^2$ $w_0^2; w_1^2; w_2^2; w_0^2$ $w^1(w_2); w^1(w_1); w^1(w_0)$	
C Templado húmedo y subhúmedo T media del mes más frío entre -3 y 18° T media del mes más caliente > 6.3° P anual igual o superior al valor calculado por la fórmula v_h del cuadro 2	(A)C semicálido del grupo C T media anual > 18° T del mes más frío < 18°	T (w) T (w)	$w_2(x^1); w_3(x^1); w_0(x^1); w_1^2$ $w_0^2; w_1^2; w_2^2; w_0^2$ $w_0^2; w_1^2; w_2^2; w_0^2$ $w^1(w_2); w^1(w_1); w^1(w_0)$	(a) (a) (a)
	C Templado T media anual entre 12 y 18°	T (w) T (w)	$w_2(x^1); w_3(x^1); w_0(x^1); w_1^2$ $w_0^2; w_1^2; w_2^2; w_0^2$ $w_0^2; w_1^2; w_2^2; w_0^2$ $w^1(w_2); w^1(w_1); w^1(w_0)$	
	Cb° y Cc Semifrío T media anual entre 5 y 12°	T (w) T (w)	$w_2(x^1); w_3(x^1); w_0(x^1); w_1^2$ $w_0^2; w_1^2; w_2^2; w_0^2$ $w_0^2; w_1^2; w_2^2; w_0^2$ $w^1(w_2); w^1(w_1); w^1(w_0)$	
B Seco P anual inferior al valor calculado por la fórmula v_h del cuadro 2	B(h°) y B(h°)h cálidos Bh°(h) y Bh° semicálidos Ba y Ba° templados Ba° y Ba° semifrío	B (w) B (w) B (w) B (w)	$w_2(x^1); w_3(x^1); w_0(x^1); w_1^2$ $w_0^2; w_1^2; w_2^2; w_0^2$ $w_0^2; w_1^2; w_2^2; w_0^2$ $w^1(w_2); w^1(w_1); w^1(w_0)$	g g g g
	E Frío T media del mes más caliente < 6.5°	E(T)H y E(T)H fríos T media anual entre -2 y 5° EFE muy frío T media anual < -2°	E (w) E (w) E (w)	

En este cuadro sólo se señalan los valores a nivel de grupo y subgrupo. Los parámetros variantes se indican en los cuadros siguientes.

El ordenamiento de los símbolos en la fórmula climática es como aparece en este cuadro, E); A(C); B(h°); B(h°)g; excepto en los climas secos B en los que la letra del subtipo va a continuación de la del grupo climático; y la del tipo después de la del subgrupo; B(h°)h(w)g

Cuadro original extraído de la obra de García (1988) en el que se describen los grupos y tipos de climas encontrados en México.

Cartografía

Durante los últimos 40 años, en nuestro país se ha desarrollado un importante avance en las investigaciones en climatología y meteorología en lo teórico y en lo práctico y ha generado una extensa cartografía que se puede consultar. En la actualidad se desarrollan investigaciones en estos campos en facultades e institutos de universidades y dependencias gubernamentales. A continuación se mencionan los principales sitios:

UNAM: institutos de Geofísica, Geografía, Centro de Ciencias de la Atmósfera, Facultad de Ciencias, Facultad de Filosofía y Letras (Colegio de Geografía); Universidad Autónoma de Chapingo y Colegio de Posgraduados; UAM: Escuela de Arquitectura (Bioclimatología); Universidad de Guadalajara, Facultad de Geografía; Universidad Nicolaita de Michoacán, Facultad de Geografía; Universidad de Estado de México, Facultad de Geografía; Universidad Veracruzana en Jalapa, Escuela de Meteorología; Universidad Autónoma de Tamaulipas; Universidad Autónoma de Chihuahua; Comisión Nacional del Agua: Servicio Meteorológico

Figura 8

GRADOS	COCIENTE P/T	REGÍMENES DE LLUVIAS					
		En verano: Por lo menos 10 veces mayor cantidad de precipitación en el mes más húmedo de la estación del año que en el mes más seco. Esto no necesariamente se cumple con los climas A.		Discrepancia entre verano e invierno: al el máximo de precipitación se alcanza en la mitad caliente del año, no llega a 10 veces la del mes más seco; si está en invierno, no llega a tres veces		En invierno: por lo menos tres veces mayor cantidad de lluvia en el mes más húmedo de la estación fría del año, que en el mes más seco	
		$^{10}r_{10} = 2t + 18$ $^{10}r_{10} = 2t + 18$	$r_{10} = 2t + 21$ $r_{10} = 2t + 21$	$r_{10} = 2t + 14$ $r_{10} = 2t + 14$	$r_{10} = 2t$ $r_{10} = 2t$		
UNIDAD							
PORCENTAJE DE PRECIPITACIÓN GENERAL RESPECTO A LA TOTAL ANUAL							
menor de 5 entre 5 y 10.1 mayor de 10.1 menor de 18 mayor de 18 menor de 30 mayor de 30							
TEMPERADO de los grupos A, B y C	No límite se establece por P/T, sino según las grillas del cuadro B y C	w(w)	a	w(w)	f(w)	f	No se presentan un máximo
SEMIBRUMOSO de los grupos A, C y E	P/T > 33.0 en los climas C, INOC, M	w ₂ (w)	w ₂	w ₂ (w)	w ₂ (w)		
	P/T > 33.0 en los climas A y AOC	w ₂ (w)	w ₂	w ₂ (w)	w ₂ (w)		
	43.2 < P/T < 35.0 en los climas C, INOC, M	w ₂ (w)	w ₂	w ₂ (w)	w ₂ (w)		
MUY SECO de los grupos A, C y E	43.2 < P/T < 35.3 en los climas A y AOC	w ₁ (w)	w ₁	w ₁ (w)	w ₁ (w)		
	P/T < 43.2, INOC, M, A y AOC	w ₁ (w)	w ₁	w ₁ (w)	w ₁ (w)		
SEMIÁRIDO S ₁	P/T > 22.0						
ÁRIDO S ₂	P/T < 22.0	w(w)	w	w(w)	w(w)		
MUY ÁRIDO S ₃	No límite se establece por P/T, sino conforme a la fórmula r ₁₀						

= cantidad mínima necesaria de precipitación anual (expresada en cm), para que el clima sea húmedo o subhúmedo; si la estación cuyo clima se clasifica tiene una precipitación anual que es el valor calculado de r₁₀, el clima es seco S; r₁₀ es el límite entre los secos y los húmedos y subhúmedos.
 = cantidad mínima necesaria de precipitación anual (expresada en cm), para que el clima sea S₁ en cualquiera de sus dos modalidades; si la estación cuyo clima se clasifica tiene una precipitación anual menor que el valor calculado para r₁₀, el clima es muy árido S₂; r₁₀ es el límite S₁/S₂ o límite de los meses secos si.
 = temperatura media anual expresada en grados centígrados, de la estación por clasificar.
 La mitad cálida del año es el hemisferio norte comprende de abril a septiembre.

Cuadro original extraído de la obra de García (1988) en el que se describen los límites de P/T y regímenes de lluvia encontrados en México

Nacional, IMTA, CENAPRED; Comisión Federal de Electricidad; Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática; CONACYT; Colegio de Michoacán; Centro GEO- J. L. Tamayo; El Colegio de la Frontera Sur; Centro de Investigación Científica de Yucatán; CICESE.

En todos estos centros de investigación se ha generado una cartografía climatológica como la que se menciona a continuación:

- a) CETENAL 1970. Carta de Climas con isoyetas e isotermas escala 1: 500 000. Todo el país;
- b) Plan Nacional Hidráulico- SARH 1976. Atlas del Agua. Escala 1:4000 000;
- c) DETENAL-SPP 1980-83. Carta de climas, isoyetas e isotermas escala 1: 1000 000. Todo el país.; 1984 Distribución de la precipitación mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre, diciembre, periodo lluvioso, periodo seco, distribución de la función gamma, de la función beta, moda de la lluvia calculada, moda anual, Coeficiente de variabilidad de la lluvia. Escala 1: 4000 000;
- d) Evapotranspiración potencial y déficit de agua, humedad del suelo,

topografía, fisiografía, uso del suelo y vegetación, escala 1: 1000 000; e) SIGSA, S.A. 1983. Carta de climas escala 1:2500 000.; y f) - CONABIO 1998. Cartas de climas, isoyetas e isotermas escala 1:1000 000.

Las cartas que pueden ser utilizadas como mapa base son: a) Cartas de la Secretaría de la Defensa Nacional (topográficas) escalas 1: 500 000, 1: 250 000, 1: 100 000, 1: 25 000; b) Carta Aeronáutica Americana escala 1: 1000 000; y c) Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Mapas de Carreteras (32 estados) varias escalas; INEGI (Topográficas escalas 1: 50 000, 1: 250 000, 1: 1000 000, Batimetría 1: 1000 000, Uso del suelo y vegetación 1: 1000 000, 1: 50 000, Fisiografía 1: 1000 000, Uso potencial: agricultura, forestería, ganadería todas escala 1: 1000 000 y 1: 250 000, Geología, Edafología, ambas escala 1: 250 000); d) Atlas Nacional de México, UNAM 1991 Tomo 2. Naturaleza, CLIMA (Observatorios, Estaciones Meteorológicas e Insolación, Viento dominante durante el año, Energía del viento dominante, Temperatura media, Precipitación, Otros fenómenos climáticos, Moda o valor más frecuente de Precipitación mensual y anual, Medidas de Aridez y Climas). AGROCLIMATOLOGÍA: (Canícula, Temperaturas efectivas y frutales) HIDROGEOGRAFÍA (Hidrogeografía e Hidrometría, Regímenes de humedad del suelo, Hidrogeología, Escurrimiento medio anual, Escurrimientos máximos y mínimos y Evapotranspiración real).

También pueden usarse como base, las fotografías aéreas y las imágenes de satélite, siempre y cuando se haga una restitución preliminar que posteriormente sea cotejada posteriormente en el campo y se localice algunas estaciones meteorológicas en la zona y se relacionen los datos con lo observado en las imágenes.

La forma más común de representar las variables climáticas es por la representación cartográfica en forma de áreas dentro de una región o por medio de isolíneas. Las isolíneas son representaciones de bandas con el mismo valor. Para el trazo de isolíneas, se sigue una metodología en la que se requiere supervisión de alguien con experiencia. Cuando se realiza algún mapa temático en climatología, se siguen aproximadamente los siguientes pasos:

1. Búsqueda de información climatológica, recurriendo a las dependencias adecuadas que se explicaron párrafos arriba (CNA, SMN, CFE, etc.).
2. Cálculo de promedios, sumas o resúmenes que se necesiten.
3. Búsqueda de información necesaria para establecer un mapa base: en este se localizan las estaciones climatológicas que se utilizan en el trabajo, se utilizan las coordenadas geográficas y la escala del mapa, así como el tipo de proyección.
4. Se obtienen copias del mapa base. Se vacía la información que se analizará en cada punto que representa a cada estación.

5. Se usa como mapa de guía, un mapa topográfico, ya que el relieve es un factor climático determinante en el comportamiento climático de una zona.
6. Se procede al trazo de isolíneas, siempre tomando como referencia el relieve, la distancia relativa al mar, la geomorfología, la cubierta vegetal y otros factores que se sabe tienen influencia.
7. Hay varios métodos para el trazo de isolíneas, entre estos está el método de Thiessen o de triangulación. Este se basa en que si se tienen 3 puntos con 3 valores distintos, se puede entre cada línea establecer gradientes.
8. Se asignan las isolíneas de valores cerrados o conocidos, como por ejemplo isotermas de 20, 22, 24, 26 ° C sucesivamente por ejemplo, o isoyetas (lluvia) de 500, 600, 700, 800 mm sucesivamente. Los días con... también se pueden representar y se denominan isocronos; las isopletas son representaciones de una combinación de valores con el tiempo y las isobaras, unen puntos con el mismo valor de presión atmosférica.

Sistemas de información geográfica

La cartografía obtenida a partir de la teledetección constituye una variable más dentro de un sistema de información integrado, tan interesante para el mejor conocimiento del espacio que nos rodea. En pocas palabras, la teledetección, en este contexto, constituye una técnica más de la información territorial, que, unida a otros datos cartográficos o estadísticos, facilita una evaluación más certera del paisaje, necesaria para su mejor aprovechamiento o conservación. Este tipo de enfoques se ha visto notablemente favorecidos por las nuevas tecnologías de almacenamiento, manipulación y salida gráfica de la información espacial. De esta forma, han nacido los denominados Sistemas de Información Geográfica (SIG), que pueden definirse como bases informatizadas de datos con algún tipo de componente espacial. Esto significa que la información que almacenan está referenciada geográficamente, ya se trate de mapas, estadísticas o datos climáticos sobre un territorio concreto, por lo que todas estas variables pueden relacionarse mutuamente de formas muy diversas. Por cuanto la información que contienen se almacena en forma digital, los SIG aprovechan las posibilidades analíticas de los ordenadores, facilitando múltiples operaciones que resultan ser difícilmente accesibles por medios convencionales: generalización cartográfica, integración de variables espaciales, análisis de vecindad, etc. Además, los SIG permiten almacenar esa información espacial de forma eficiente, facilitando su actualización y acceso directo al usuario. En definitiva, amplían enormemente las posibilidades de análisis que brindan los mapas convencionales, además de facilitar su almacenamiento y visualización (Chuvienco, 1995).

Un SIG está compuesto por unos equipos, especializados en el manejo de información espacial, y una serie de programas que, conectados con aquéllos, permiten realizar múltiples transformaciones a partir de las variables espaciales introducidas al sistema. El SIG, no es un producto cerrado en sí, sino un compuesto de elementos diversos: ordenador, digitizador, trazador gráfico, impresoras, distintos paquetes de programas, orientado hacia una finalidad específica. También existen SIG comerciales, que intentan recoger todos estos productos bajo una misma estructura, si bien lo más habitual, en el momento presente, sea la comercialización exclusiva de los programas, que pueden adaptarse a configuraciones HARDWARE muy amplias.

El empleo de esta tecnología permite integrar y analizar gran cantidad de información de naturaleza espacial (o geográfica) y no espacial (o de atributos), que hasta hace poco tiempo era muy difícil hacerlo de manera manual o mediante interpretación visual.

Resulta difícil dar una sola definición de SIG ya que revisando la bibliografía, al respecto, se encuentran tantas definiciones como aplicaciones se le den. Sin embargo de manera concreta se define a un SIG como una herramienta para “almacenar, manipular, analizar y desplegar información espacial (mapas, imágenes de satélite) y no espaciales (atributos)”.

Los SIG permiten la captura, organización, manipulación, análisis, modelado y presentación de información espacial, donde la referencia geográfica es una de las características más importantes para su análisis. La referencia geográfica puede ser del orden de aspectos tanto físicos como sociales.

Desde hace mucho tiempo los geógrafos y otros científicos de la tierra están acostumbrados a estructurar la información en mapas temáticos, según sean los aspectos del espacio que nos interese estudiar. De la misma forma un SIG divide la realidad en distintos temas, es decir, en distintos capas o estratos de la zona que se desea estudiar: el relieve, la litología, los suelos, los ríos, los asentamientos, las carreteras, los límites administrativos, etc. La ventaja de los SIG es que esta información puede ser manejada de diversas formas, es decir se pueden hacer tantas combinaciones de información como sea necesario, estas pueden ir desde lo más sencillo hasta lo más complejo. Cabe recordar que un SIG no es simplemente un Software que se utiliza para dibujar más, aunque es una de las partes que lo conforman, éste va más allá y permite realizar análisis espaciales que posteriormente permitirá tomar decisiones con relación a lo que se analiza. En cualquier campo de aplicación las características cualitativas y cuantitativas de la realidad se registran y manipulan en forma de mapas. Los SIG se distinguen más por su capacidad analítica que por su capacidad de diseño de cartografía. Los SIG son capaces de definir “escenarios”, es decir, de crear modelos que permitan suponer y prede-

cir el comportamiento de una o más variables que se expresan en el espacio geográfico con base en el análisis previo de la información, llevada a cabo dentro del mismo SIG. Los sistemas de cartografía automatizada, se limitan al diseño de mapas y carecen de poder analítico (salvo algunos sistemas, tradicionalmente de diseño, que han comenzado a incorporar técnicas de SIG); se restringen, en el mejor de los casos, a aportar datos de superficie y longitudes (Bosque, 1997).

Los Sistemas de Información Geográfica consisten de cuatro componentes básicos: recopilación de información de entrada, base de datos geográficos, análisis y modelamiento de la información y visualización y finalmente la representación de la información.

A manera de ejemplo se puede mencionar el SIG: ILWIS, que es un acrónimo del Integrated Land and Water Information System. Este es un Sistema de Información Geográfica (SIG) con capacidades de procesamiento de imágenes. Ilwis fue desarrollado por el International Institute for Aerospace Survey & Earth Sciences, Enschede (ITC), The Netherlands. Por más de una década, desde 1985, el software ha ido mejorando. En primera instancia el SIG se manejaba desde ambiente para DOS y en la actualidad ha cambiado a ambiente Windows marcando así una nueva era en el desarrollo de este software. Ilwis permite introducir, manejar, analizar, procesar y presentar datos geográficos. De estos datos se puede generar información en patrones espaciales y temporales de diferentes procesos en la superficie de la tierra. Esta versión para Windows, integra al SIG con aplicaciones de Sensores Remotos, entre las cuales se pueden mencionar: despliegue de mapas *raster* y varios mapas vectoriales en una sola ventana, despliegue de tablas en ventanas, interacción con información de atributos, procesamiento de imágenes, etc., (MOPT, 1992; Chuvieco, 1995).

Referencias

- Ayllón T. T. y Gutiérrez R. J. 1983. *Introducción a la Observación Meteorológica*. Limusa, México.
- Bosque S. J. 1997. *Sistemas de Información Geográfica*. Ediciones Rialp, S. A. Madrid, España.
- Burroughs W. J., Crowder B., Robertson T., Vallier- Talbot E. y Whitaker R.. 1998. *Observar el tiempo*. Ed. Planeta. Singapore.
- Chuvieco E. 1995. *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Ediciones Rialp, S. A. Madrid. 397- 400.
- García E. 1989. *Apuntes de Climatología*. Edición del autor. México. D.F.

- García E., Hernández M. E. y Cardoso M. D. 1983. Las gráficas ombrotérmicas y los regímenes de lluvia en la República Mexicana. Memoria del IX Congreso Nacional de Geografía. Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística. Guadalajara. Pp 140-149.
- Griffiths J. F. 1976. *Applied Climatology*. Oxford University Press, Oxford, EUA.
- Henderson – Sellers A. y Robinson P. J. 1996. *Contemporary Climatology*. Longman. Singapore.
- Mc Gregor G. y Niewolt S. 1998. *Tropical Climatology. An Introduction to the climates of the low latitudes*. J. Wiley & Sons. Chichester.
- MOPT. 1992. Guía para la elaboración de estudios de Medio Físico: Contenido y Metodología. Ministerio de Obras Públicas y Transportes. Madrid. Pp. 95-128.
- Oliver J. E. 1973. *Climate and Man's Environment*. John Wiley & Sons. New York, EUA.
- Ortiz Solorio C. 1987. Elementos de agrometeorología cuantitativa con aplicaciones en la República Mexicana. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma de Chapingo, Chapingo. México. Pp. 54-130.
- Torres R. E. 1995. *Agrometeorología*. Trillas, México.
- Torres R. E. 1997. *Prácticas de Agrometeorología*. Trillas, México.