



PROCURADURÍA AMBIENTAL
Y DEL ORDENAMIENTO
TERRITORIAL DEL D.F.

RESUMEN EJECUTIVO

Estudio de estimación de captura de carbono como indicador del estatus del derecho de los habitantes del Distrito Federal a gozar de áreas verdes adecuadas para su desarrollo, salud y bienestar.

PRESENTACIÓN

El fortalecimiento de las capacidades de las instituciones es importante porque contribuyen al desarrollo de iniciativas innovadoras, dirigidas a prestar un mejor servicio a la ciudadanía. En este sentido, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) aportó recursos económicos provenientes del **“Programa de Desarrollo Institucional Ambiental (PIDIA)”**, para que la Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del Distrito Federal (PAOT) realice el proyecto **“Procuración y Acceso a la Justicia Ambiental como estrategia para la Mitigación del Cambio Climático en el Distrito Federal”** que comprende realizar estudios y acciones de capacitación.

En este sentido, la PAOT en coordinación con el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) desarrollaron el **“Estudio de estimación de captura de carbono como indicador del estatus del derecho de los habitantes del D.F. a gozar de áreas verdes adecuadas para su desarrollo, salud y bienestar”**, cuya área de estudio fue principalmente el Suelo de Conservación del Distrito Federal.

En el desarrollo del estudio participó personal de la Dirección de Ordenamiento Ecológico del Territorio y Manejo Ambiental del Agua (DOETMAA) de la Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal, convirtiéndose en un ejercicio interinstitucional y en un trabajo integral. Adicionalmente, ésta dirección aportó ideas, insumos cartográficos e información general que fueron clave para el desarrollo del trabajo.

Asimismo, durante la fase de muestreos de campo se incorporaron al proyecto los coordinadores y personal técnico de los Centros Regionales 1, 2, 3 y 4, y de la Gerencia de la Sierra de Guadalupe, instancias que pertenecen a la Dirección General de la Comisión de Recursos Naturales de la Secretaría del Medio Ambiente y personal de la Delegación Tlalpan. Su participación consistió en el apoyo y acompañamiento en campo para la toma de muestras y en la gestión con

los núcleos agrarios para permitir los accesos. En el trabajo de campo continuó la participación activa de personal técnico de PAOT y DOETMAA.

Al respecto, y con la finalidad de mantener un monitoreo de estos servicios ecosistémicos, los especialistas del INIFAP capacitaron al personal técnico de las instancias mencionadas, en el manejo de los equipos y el procesamiento de datos, a fin de poder replicar el estudio de estimación de infiltración y almacenamiento de carbono en el suelo de conservación del Distrito Federal.

El estudio contribuye en el conocimiento de los servicios ambientales que generan los ecosistemas forestales. Los resultados que se presentan están basados en métodos robustos para la estimación del almacenaje de carbono en la vegetación y la capacidad de infiltración.

El estudio comprendió los siguientes componentes:

- Estimación de almacenamiento de carbono en el Suelo de Conservación del Distrito Federal.
- Comparación del mapa de almacenamiento de carbono con la imagen del Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas.
- Informe del análisis de la aplicabilidad de la información de inventarios de arbolado urbano en evaluaciones de almacenamiento de carbono.
- Metodología de selección de sitios de muestreo y procesamiento de datos de almacenamiento de carbono para estimar la tendencia de estos servicios a futuro.
- Estimación de la infiltración de suelo en el área de conservación del Distrito Federal.
- Crecimiento de los asentamientos humanos de 2001 a 2008 en el Distrito Federal.

OBJETIVO GENERAL

Estimar el almacenamiento de carbono y tasa de infiltración en el Suelo de Conservación del Distrito Federal, como indicador de un adecuado desarrollo, salud y bienestar de sus habitantes.

OBJETIVOS PARTICULARES

1. Cuantificar el almacenamiento de carbono en las áreas verdes del Suelo de Conservación del Distrito Federal, considerando que el contenido de carbono aéreo depende del tipo de cobertura forestal.
2. Estimar la infiltración en las áreas verdes del Suelo de Conservación del Distrito Federal, considerando que la tasa de infiltración depende del uso de suelo, así como de su tipo, textura y estructura.

ÁREA DE ESTUDIO

El Distrito Federal ocupa una extensión aproximada de 149,830 ha, su territorio representan 0.1% de la superficie total del país; 61,179 ha son áreas urbanas y el resto 88,652 ha (59.2%) corresponden a la zona rural, por lo que se puede dividir en dos áreas básicas, en función de los usos de suelo y actividades que la población ha desarrollado durante las últimas décadas: Área de Desarrollo Urbano (ADU) y Área de Conservación Ecológica (ACE), hoy denominada Suelo de Conservación (SC)

El Distrito Federal se divide, para fines administrativos, en Suelo Urbano y Suelo de Conservación. El Suelo de Conservación ocupa 88,442 hectáreas (59% del D.F.). Parte de ellas son 38,252 hectáreas cubiertas por bosques, 500 hectáreas de matorrales y 28,599 hectáreas de uso agrícola.

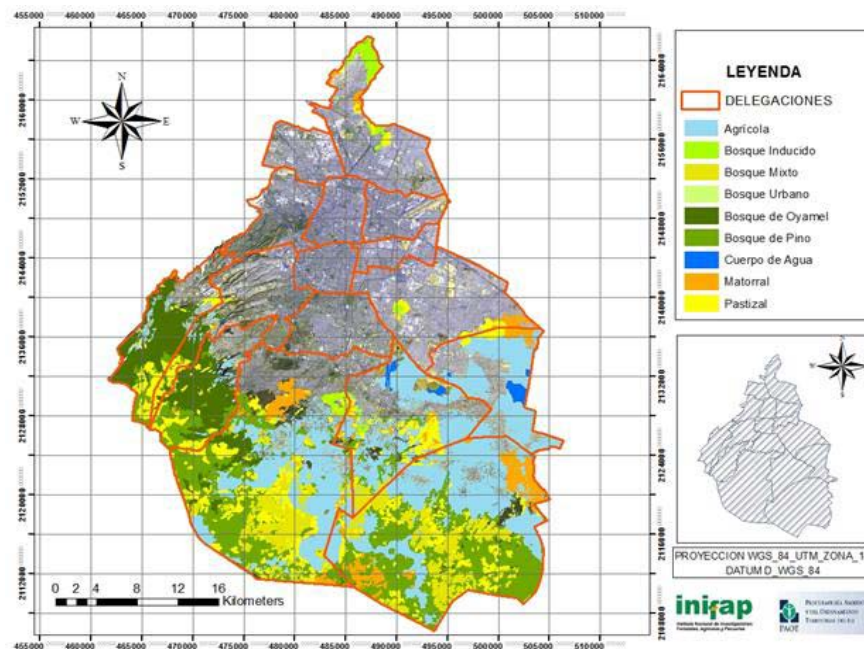
La mayor proporción (93%) del Suelo de Conservación se ubica en las serranías que delimitan al Valle de México: hacia el sur, La Sierra Chichinautzin y la Sierra del Ajusco; hacia el suroeste, la Sierra de las Cruces y al norte, la Sierra de Guadalupe. El resto (7%) se incluye dentro del área lacustre de Xochimilco y Tláhuac. Este territorio proporciona refugio a más de 2,500 especies de flora y fauna inmersas en una extensa gama de ecosistemas, el cual es el hábitat del 2% de la biodiversidad mundial y del 12% de especies de flora y fauna de México.

El Suelo de Conservación es un importante patrimonio natural que proporciona servicios ambientales para la sustentabilidad de la Ciudad de México. El

funcionamiento natural de los ecosistemas, además de fortalecer su capacidad como reservorio de carbono con la vegetación existente, es fundamental para el mantenimiento del ciclo hidrológico de la Cuenca del Valle de México, ya que comprende las zonas más importantes para la recarga del acuífero. Se estima que provee entre el 60% y 70% del agua que consumen los habitantes de la Ciudad de México.

Delegaciones del Distrito Federal que comparten Suelo de Conservación:

- | | |
|---------------------------|---------------|
| 1. Álvaro Obregón | 6. Milpa Alta |
| 2. Cuajimalpa de Morelos | 7. Tláhuac |
| 3. Gustavo A. Madero | 8. Tlalpan |
| 4. Iztapalapa | 9. Xochimilco |
| 5. La Magdalena Contreras | |



Sin duda, la problemática que enfrenta el Suelo de Conservación responde a una diversidad de factores, el más importante de ellos es la acelerada urbanización de la Ciudad de México en las zonas periurbanas por la escasez de suelo accesible para vivienda; otro factor que contribuye al deterioro de los ecosistemas son las inadecuadas prácticas agrícolas, el pastoreo excesivo, la tala ilegal y, entre otros factores.

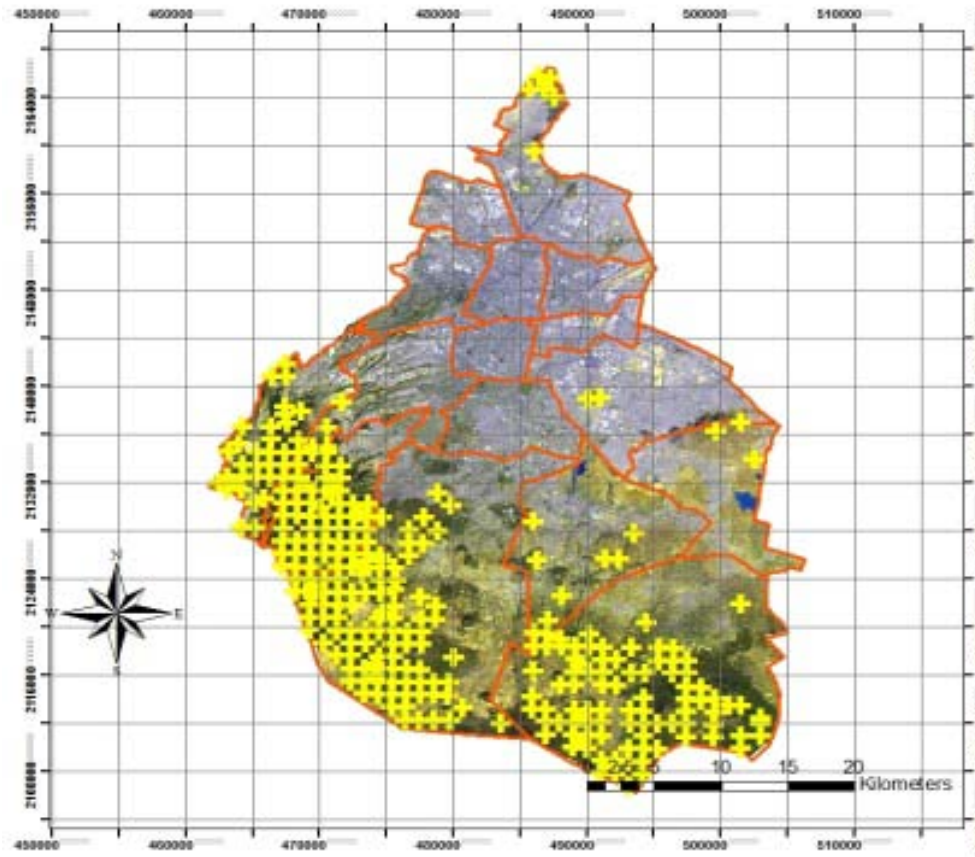
De continuar con la dinámica actual de crecimiento urbano y cambio de uso de suelo, se verán disminuidos los bienes y servicios ambientales que brinda el Suelo de Conservación de los cuales depende la Ciudad de México; asimismo, se reducirá su contribución a la mitigación del cambio climático.

COMPONENTES DEL ESTUDIO

Estimación de almacenamiento de carbono en el Suelo de Conservación del Distrito Federal

Se realizaron adecuaciones al método de estimación de carbono almacenado en el Suelo de Conservación del Distrito Federal, considerando su monitoreo a futuro. La información cartográfica base fue proporcionada por PAOT, quien a su vez hizo una recopilación de insumos, integrando información proporcionada por otras instancias como la Secretaría del Medio Ambiente.

Con el fin de estimar el carbono almacenado se obtuvieron datos de campo empleando un diseño de muestreo compatible con el utilizado en el Inventario Nacional Forestal. Se midió el diámetro normal y la altura total del arbolado, entre otras características. La información se procesó empleando ecuaciones alométricas (carbono, biomasa y volumen maderable) disponibles en literatura especializada y estimadores de razón. Se generó un mapa de carbono almacenado a través de técnicas geoestadísticas.



Distribución de los puntos de muestreo



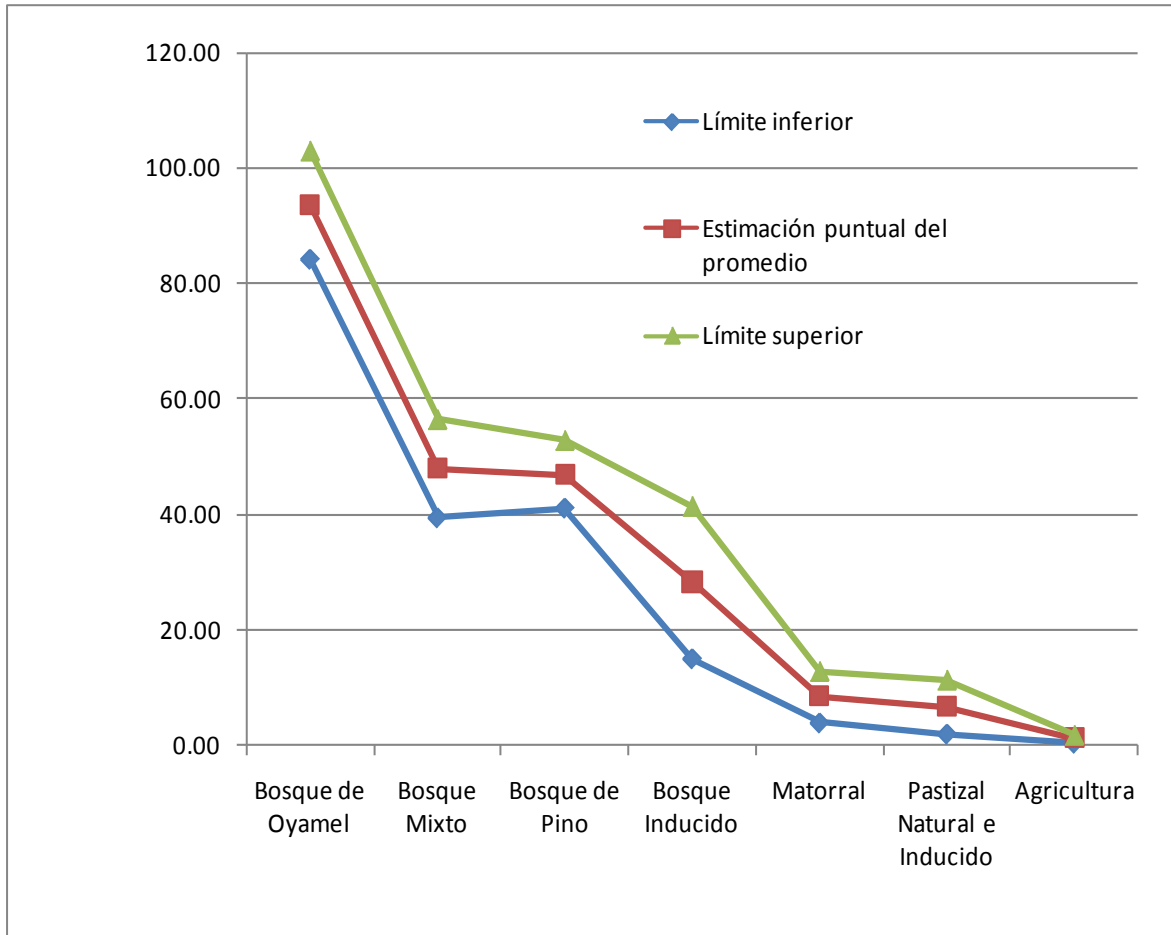
Conformación del Conglomerado

Estimación del contenido de carbono por hectárea por tipo de vegetación

Los tipos de vegetación que presentan mayor contenido de carbono por hectárea son el oyamel, el bosque mixto, el pino y el inducido, con valores de: 93.41, 47.92, 46.95 y 28.26 Mg ha⁻¹, respectivamente; la estimación de carbono considera únicamente la parte aérea del arbolado (fuste, ramas y hojas). Con una confiabilidad del 95%, se estima que el contenido de carbono por hectárea para el oyamel oscila entre 83.97 y 102.85 Mg ha⁻¹.

Estimaciones puntuales y de intervalo de confianza (95%) por hectárea por tipo de vegetación.

| Tipo de Vegetación | Número de Conglomerados | Mg de C ha ⁻¹ | | |
|--------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------------|-----------------|
| | | Límite inferior | Estimación puntual del promedio | Límite superior |
| Bosque de Oyamel | 86 | 83.9729 | 93.4129 | 102.8530 |
| Bosque Mixto | 30 | 39.3615 | 47.9224 | 56.4830 |
| Bosque de Pino | 160 | 41.0274 | 46.9546 | 52.8820 |
| Bosque Inducido | 7 | 15.0317 | 28.2673 | 41.5030 |
| Matorral | 11 | 3.9536 | 8.4800 | 13.0060 |
| Pastizal | 2 | 2.0280 | 6.7647 | 11.5010 |
| Agrícola | 3 | 0.4392 | 1.3560 | 2.2727 |
| Total | 299 | | | |



Estimación del contenido total de carbono por uso de suelo

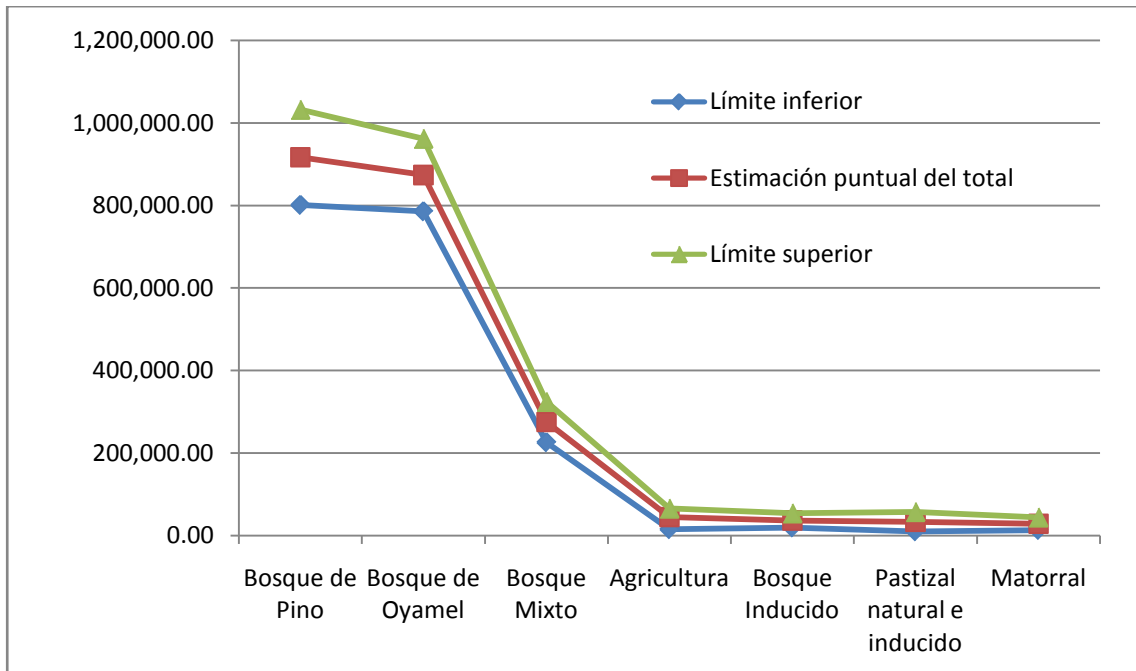
Al considerar las estimaciones puntuales por hectárea y las superficies (ha) obtenidas de la base cartográfica proporcionada por la PAOT, en este estudio se estimó con una confiabilidad del 95% que la cantidad de carbono aéreo en el Suelo de Conservación oscila de 1,870,208.91 a 2,548,835.42 Mg. La mayor cantidad corresponde al bosque de pino.

Con base en la información cartográfica proporcionada por la PAOT y a los tipos de vegetación considerados en el estudio, resulta una superficie de 77,249.52 ha de las 87,296.32 ha totales del Suelo de Conservación del Distrito Federal. Al tomar como referencia esta superficie, el estudio arroja una estimación puntual del contenido total de carbono de 2,209,522.53 Mg.

Estimación contenido total de carbono por tipo de vegetación en el Suelo de Conservación del Distrito Federal

| Tipo de uso de suelo* | Superficie (ha) | Mg de C | | |
|------------------------------|-----------------|-----------------|------------------------------|-----------------|
| | | Límite inferior | Estimación puntual del total | Límite superior |
| Bosque de Pino | 19,529.96 | 801,263.43 | 917,021.40 | 1,032,783.28 |
| Bosque de Oyamel | 9,357.60 | 785,784.42 | 874,120.12 | 962,456.76 |
| Bosque Mixto | 5,737.85 | 225,850.35 | 274,971.50 | 324,090.93 |
| Agricultura | 33,009.70 | 14,497.86 | 44,759.84 | 75,021.15 |
| Bosque Inducido | 1,294.73 | 19,462.00 | 36,598.53 | 53,735.19 |
| Pastizal natural e inducido | 4,955.25 | 10,049.25 | 33,520.79 | 56,990.34 |
| Matorral | 3,364.43 | 13,301.61 | 28,530.36 | 43,757.77 |
| Superficie Total del Estudio | 77,249.52 | 1,870,208.91 | 2,209,522.53 | 2,548,835.42 |

*Las superficies de los tipos de vegetación se obtuvieron de la cartografía proporcionada por la PAOT



Estimación del contenido total de carbono por tipo de vegetación.

Especies representativas por tipo de vegetación

Bosque de Oyamel

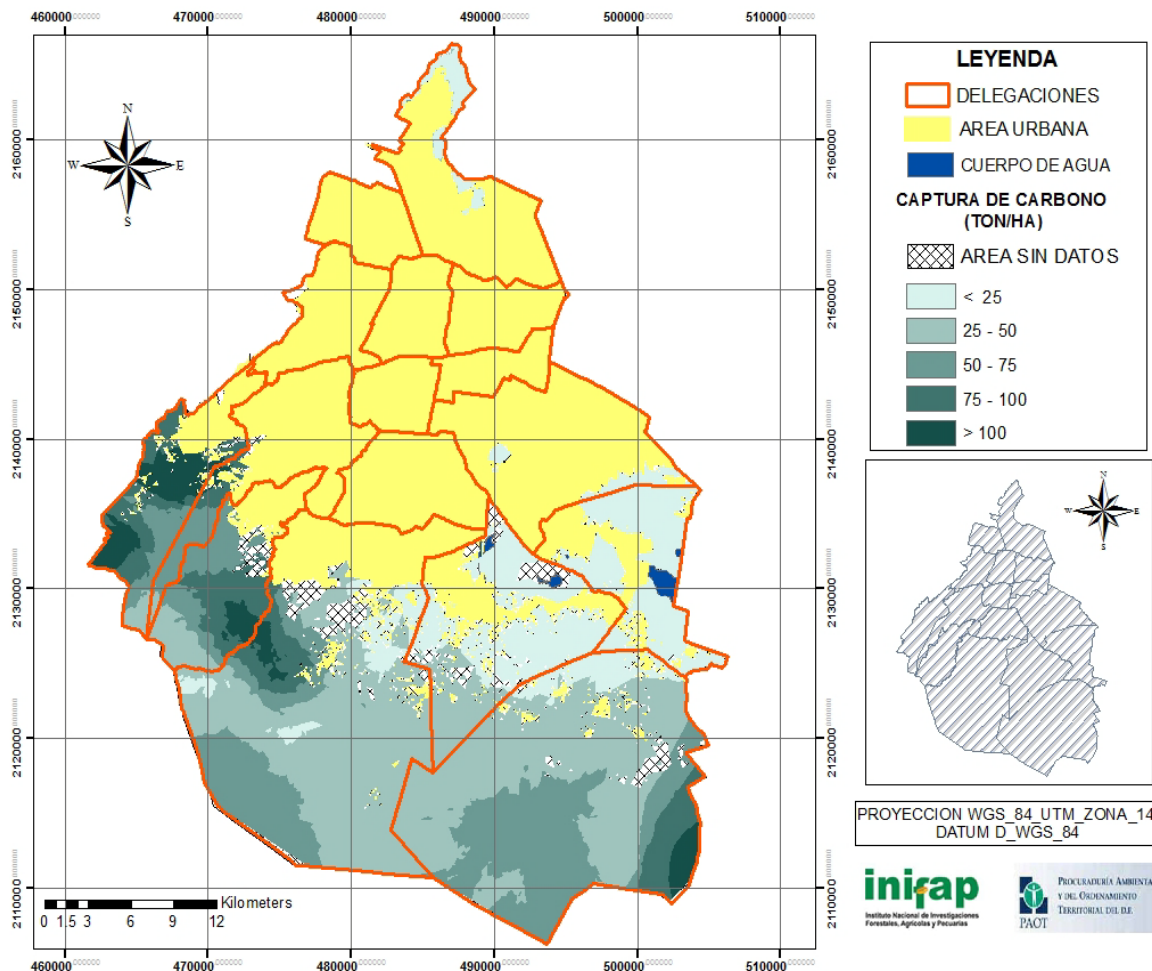


- Abies religiosa*
- Alnus firmifolia*
- Pinus montezumae*
- Pinus patula*



Mapa de carbono

El contenido de carbono por unidad de superficie está concentrado en bosques de oyamel.



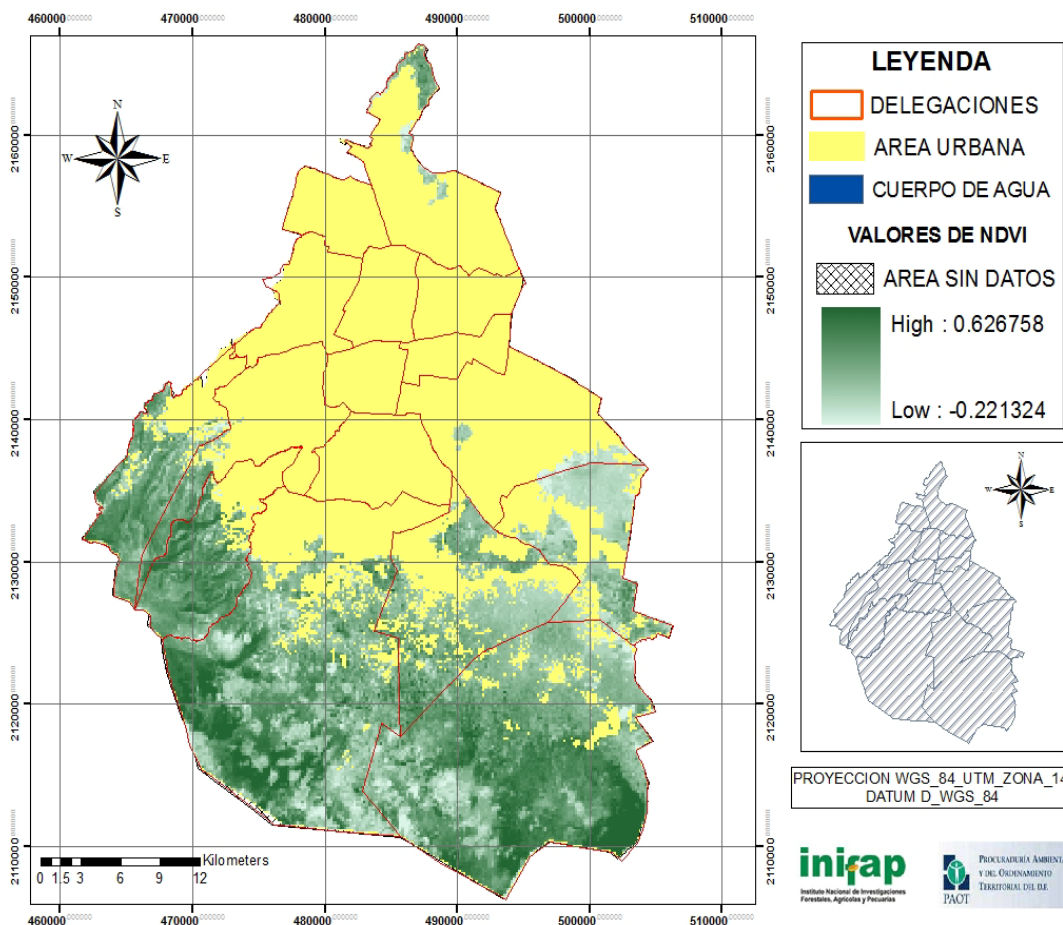
La distribución espacial del contenido de carbono en la vegetación del suelo de conservación estuvo concentrada en bosques de oyamel ubicados en bosques de Cuajimalpa, Álvaro Obregón, Magdalena Contreras y Milpa Alta, principalmente.

Comparación del mapa de almacenamiento de carbono con la imagen del Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas

El insumo básico para el cálculo del Índice fueron Imágenes de Satélite, que considera las diferencias de la reflectancia de la cubierta vegetal en el espectro electromagnético.

Se correlacionaron los valores de reflectancia espectral provenientes del índice de vegetación NDVI y los valores calculados de carbono aéreo almacenado, ambos ubicados geográficamente.

Las imágenes resultantes del cálculo del NDVI mostraron valores que van de -0.22 a 0.62 en áreas abiertas y bosques densos, principalmente de oyamel, respectivamente en las delegaciones Magdalena Contreras Cuajimalpa y Milpa Alta.



El coeficiente de correlación Pearson entre carbono por sitio (kg) y los valores de NDVI fue de sólo 0.22962. Tal como se puede apreciar en el análisis de dispersión inicial, por lo que se asume que las variables están débilmente relacionadas.

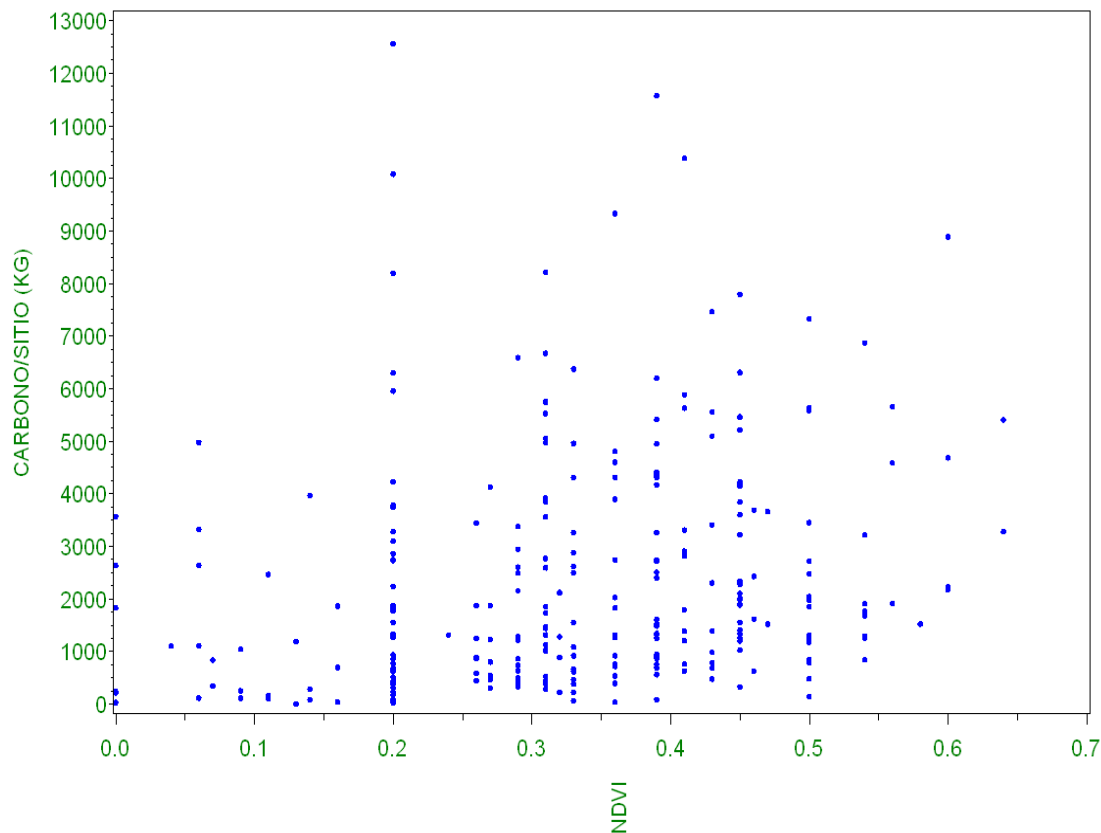


Diagrama de dispersión

Informe del análisis de la aplicabilidad de la información de inventarios de arbolado urbano en evaluaciones de almacenamiento de carbono

Se realizó un análisis de la información disponible de inventarios y censos realizados para propósitos diferentes, a fin de determinar qué información puede ser útil en la aplicación de ecuaciones alométricas (carbono, biomasa y volumen maderable) y estimadores de razón, considerando que existen ecuaciones disponibles sólo para algunas especies identificadas en la literatura especializada. Los años en que se tomaron los datos corresponden al periodo de 2006 al 2009.

Las instituciones que proporcionaron bases de datos de censos de vegetación de arbolado dañado o plagado y diagnósticos de diferentes Áreas Verdes Urbanas de la Ciudad de México fueron:

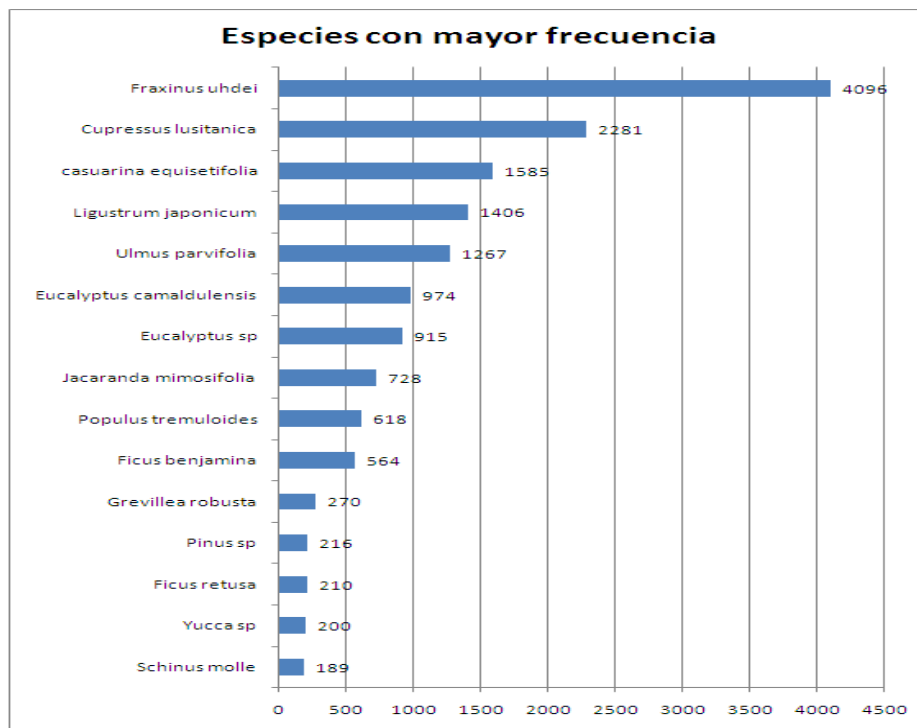
- Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial (PAOT).
- Dirección General de Bosques Urbanos y Educación Ambiental de la SMA del DF.
- Delegaciones Políticas.
- Empresas y consultorías.

Se realizó la integración de una base de datos para su análisis de 77 inventarios reportados, de éstos se contó con información útil de 55 inventarios, en los que se consideraron los siguientes aspectos:

- Especies arbóreas, arbustivas y herbáceas.
- Universo, captura y consistencia de datos.
- Ecuaciones disponibles de carbono, biomasa y volumen.

De este análisis resultó:

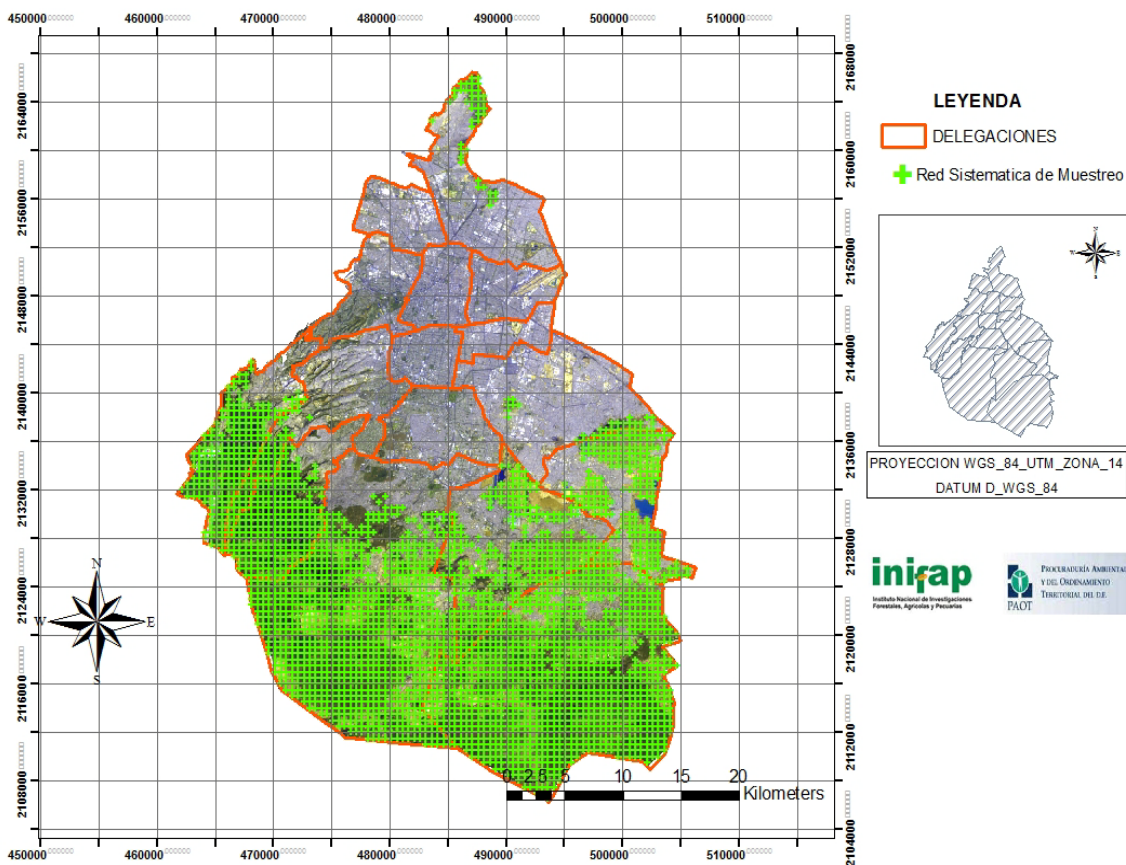
- Se detectaron 120 especies, de éstas únicamente hay ecuaciones de carbono, biomasa o volumen para 27.
- De 55 áreas verdes se tienen registros de 22,794 plantas con diámetro a la altura del pecho, alturas, diámetro de copa, entre otras características.
- De éstos, 17,870 registros de árboles son útiles; sin embargo, sólo existen ecuaciones de carbono, biomasa o volumen para 5,193 registros.



Metodología de selección de sitios de muestreo y procesamiento de datos de almacenamiento de carbono para estimar la tendencia de estos servicios a futuro.

Se generó una red de muestreo sistemática, en donde cada punto representa la unidad de muestreo, la cual es un conglomerado integrado por cuatro subparcelas circulares dispuestas geométricamente en forma de una “Y” invertida.

- La red de muestreo sistemática considera puntos de muestreo equidistantes a 500 m uno de otro, con cobertura en los tipos de vegetación del Suelo de Conservación del Distrito Federal.
- Permite que los muestreos futuros se lleven a cabo tan intensivos como los recursos económicos estén disponibles.
- Los Centros Regionales de CORENA pueden realizar el monitoreo de manera independiente, incluso las Delegaciones Políticas.



Justificación

- El muestreo sistemático permite distribuir la muestra de manera uniforme en toda la población objeto de estudio.
- El Inventario Forestal Nacional y de Suelos de la Comisión Nacional Forestal, así como el Servicio Forestal de Estados Unidos, utilizan mallas sistemáticas para la evaluación de los recursos forestales a nivel país.
- La información de campo que se levante en el Suelo de Conservación del Distrito Federal, se podrá enriquecer con la información de campo proveniente del Inventario Forestal Nacional y de Suelos.

Estimación de la infiltración de suelo en el área de conservación del Distrito Federal

La infiltración es el proceso por el cual el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el suelo. En una primera etapa satisface la deficiencia de humedad del suelo en una zona cercana a la superficie, una vez superado cierto nivel de humedad, pasa a formar parte del agua subterránea, saturando los espacios vacíos. Se denomina capacidad de infiltración a la cantidad máxima de agua que puede absorber un suelo en determinadas condiciones. Valor que es variable en el tiempo en función de la humedad edáfica, el material que conforma al suelo y la mayor o menor compactación que tiene el mismo.

Para la evaluación de la infiltración de suelos, se realizaron mediciones directas de en campo con un infiltrómetro Turf – Tec las cuales representan el establecimiento de una línea base para la determinación y monitoreo de la infiltración, iniciando con el muestreo de 51 conglomerados; para la selección de estos sitios se contó con la participación de personal de SMA y PAOT. El muestreo en campo se realizó en sitios hasta con 4 repeticiones en forma de Y invertida.

Se tomaron datos de los 51 sitios, con los valores promedios de la infiltración se realizó una interpolación mediante el método de Inverso de la Distancia Media (IDW) en ArcGis 9.3.

Se capacitó al personal de las Regionales de la CORENA y la PAOT en el manejo de los infiltrómetros de doble cilindro Turf Tec®, se dio una platica donde se capacito al personal en el cálculo de la infiltración isntantánea:

Cálculo de la Infiltración Instantánea

$$I = (h_1 - h_2) \cdot 600 / (t_2 - t_1)$$

Donde:

I = infiltración instantánea

H1, h2 = altura lámina en el primer tiempo y segundo tiempo respectivamente (cm)

T1, t2 = lectura de tiempo inicial y final del intervalo (min)

Nota: Ordenar información y realizar una gráfica de dispersión, y obtener una regresión de tipo

$$I = A \cdot x^b$$

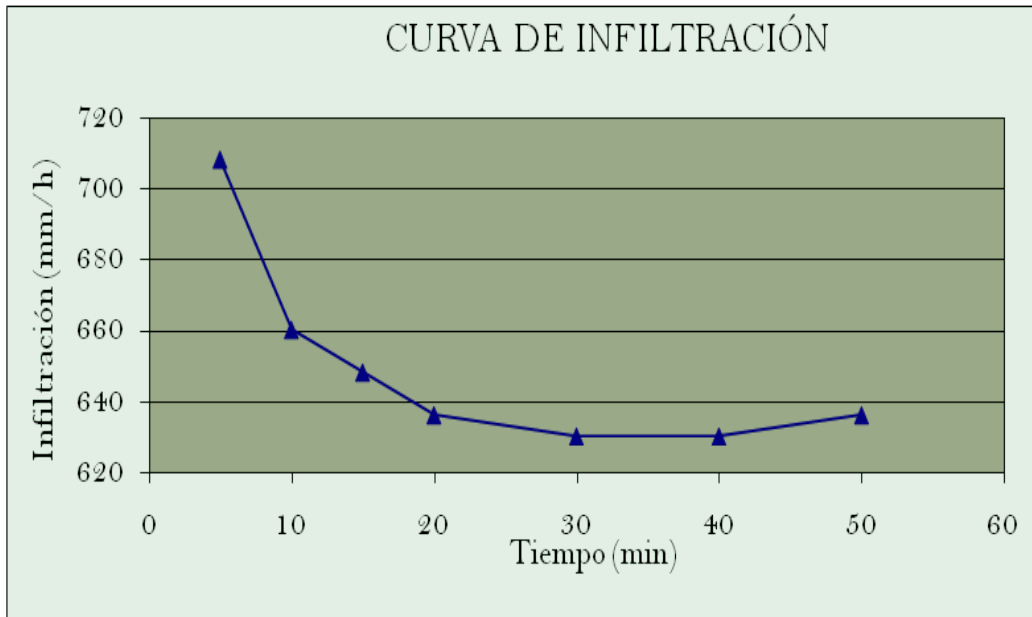
La infiltración base se obtiene en el promedio de las últimas lecturas mas uniformes



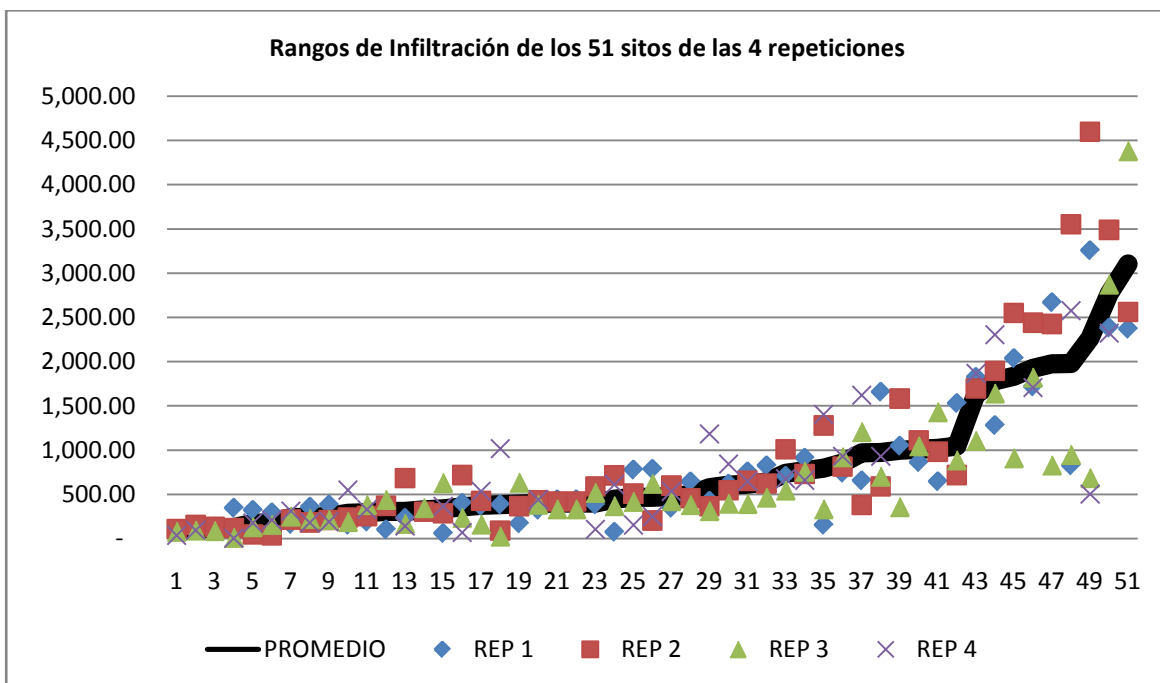
Medición con el Infiltrómetro Turf Tec®

Ejemplo del Sitio 26, Coordenadas en campo, Latitud 489998, Longitud 2110188

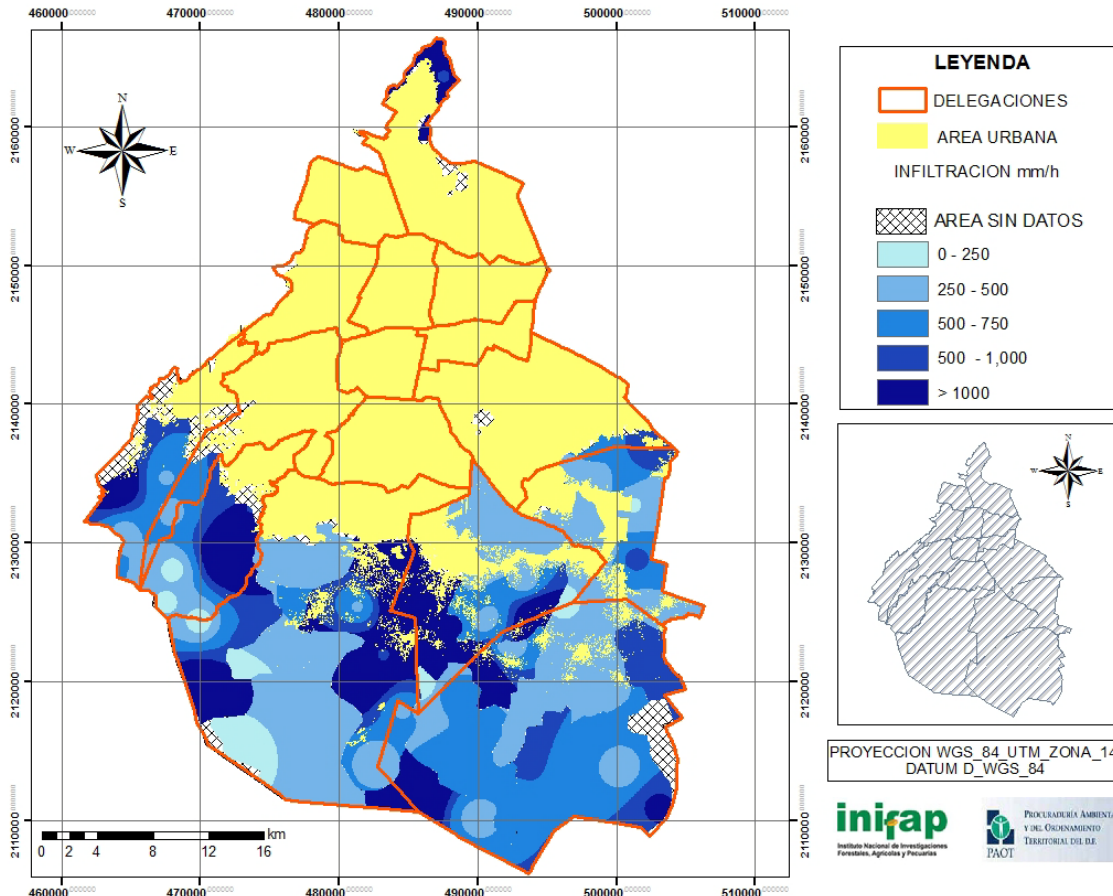
Paraje San Pablo Oztotepec, Delegación Milpa Alta



Valores de infiltración por sitio de las 4 repeticiones (Promedios de 79 a 3,105 mm/hr)



Infiltración interpolada a partir de datos de campo.

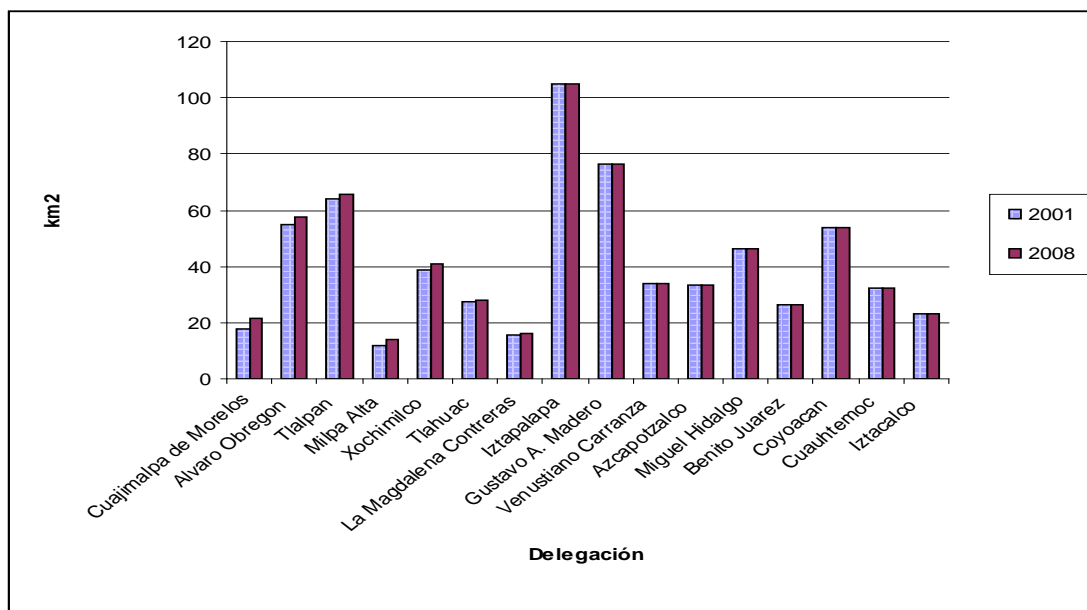


Crecimiento de los asentamientos humanos de 2001 a 2008 en el Distrito Federal

Para la estimación del crecimiento urbano en el área de conservación se utilizó la metodología de SLEUTH (Slope, Land Use, Exclusion, Urban Extent, Transportation y Hillshade). Esta permite llevar a cabo una predicción del crecimiento urbano a escala regional, modelando diferentes escenarios al incorporar distintos niveles de protección para diferentes áreas (áreas de exclusión). Está basado en AC (AUTOMATAS CELULARES) por lo que usa una red de celdas de datos geográfico-espaciales históricos, para simular el crecimiento urbano y otros cambios de uso de suelo causados por la urbanización.

1. Para medir el crecimiento urbano fue necesario crear capas de información geográfica de área urbana de los años 2001 y 2008 con el programa Arc Gis 9.2
2. Para delimitar los asentamientos humanos del año 2001 y 2008, se usaron imágenes pancromáticas SPOT, a las cuales se les hizo corrección geométrica, con el programa Erdas Imagine 8.4 y 9.1, con 60 puntos y con un error medio cuadrático (RMS) menor a 20 m.
3. La capa de área urbana del 2001 se digitalizó modificando los límites de los vectoriales de INEGI de 1995, a lo observado en las imágenes SPOT del 2001.
4. Los límites del área urbana del año 2008, se digitalizaron modificando el límite del área urbana del 2001 con el de 2008.
5. Posteriormente se midió el avance del área urbana de 2001 a 2008 y se cuantificó la pérdida de (Unidades Ambientales) UA's por el crecimiento urbano.

Incremento de los asentamientos humanos de 2001 a 2008 en superficie de las Delegaciones del Distrito Federal



Perdida de superficie de las UA´s del Suelo de Conservación por el incremento de los asentamientos humanos de 2001 a 2008.

| Unidad Ambiental | Superficie | | Pérdida al 2008 | |
|-----------------------------------|-----------------|-------|-----------------|------|
| | Ha ¹ | % | ha | % |
| Agroecológico | 13,671.656 | 15.51 | 318.478 | 2.33 |
| Agroecológico Especial | 3,116.219 | 3.54 | 22.317 | 0.72 |
| Agroforestal | 6,140.368 | 6.97 | 26.588 | 0.43 |
| Agroforestal Especial | 5,084.037 | 5.77 | 24.999 | 0.49 |
| Áreas Naturales Protegidas | 8,227.927 | 9.34 | 48.311 | 0.59 |
| Equipamientos Urbanos | 745.188 | 0.85 | 16.762 | 2.25 |
| Forestal de Conservación | 32,184.142 | 36.52 | 53.085 | 0.16 |
| Forestal de Conservación Especial | 3,211.770 | 3.64 | 14.679 | 0.46 |
| Forestal de Protección | 6,981.056 | 7.92 | 26.614 | 0.38 |
| Forestal de Protección Especial | 2,006.696 | 2.28 | 10.787 | 0.54 |
| Poblados Rurales | 4,450.674 | 5.05 | 190.127 | 4.27 |
| Programas Parciales | 2,241.597 | 2.54 | 159.706 | 7.12 |

CONCLUSIONES

- Los tipos de vegetación que presentan mayor contenido de carbono por hectárea son el bosque de oyamel, el bosque mixto, el bosque de pino y el bosque inducido, con valores de 93.41, 47.92, 46.95 y 28.26 Mg ha⁻¹, respectivamente.
- Con una confiabilidad del 95%, se estima que el contenido de carbono por hectárea para el oyamental oscila entre 83.97 y 102.85 Mg.
- En este estudio se estima con una confiabilidad del 95% que la cantidad de carbono aéreo en el Suelo de Conservación oscila de 1, 870,208.91 a 2,548,835.42 Mg.
- Existe información de 17,870 árboles urbanos con registros dasométricos congruentes, de éstos únicamente para 5,193 existen ecuaciones de carbono, biomasa o volúmen para la determinación de carbono.
- El presente estudio es un detonante y un esfuerzo de la PAOT para sentar las bases en la obtención de datos de campo sobre la infiltración en el suelo de Conservación del Distrito Federal y dada la gran extensión del área de conservación del Distrito Federal, los 51 puntos muestreados no son suficientes para la obtención de datos que reflejen la infiltración generalizada para todo el Suelo de Conservación del Distrito Federal; así como para la generación de la cartografía correspondiente.
- El crecimiento urbano se ha dado principalmente en Unidades Ambientales destinadas a las actividades humanas.
- Dentro de las Unidades Ambientales en las que se restringe el crecimiento urbano sobresale el Agroecológico, ya que es la que ha presentado mayor pérdida.