



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FES ZARAGOZA

**DETERMINACIÓN DE FÓSFORO EN
PALEOSUELOS DE UN SITIO ARQUEOLÓGICO
DEL VALLE DE TEOTIHUACAN COMO
INDICADOR DE ACTIVIDAD ANTRÓPICA**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
BIÓLOGO**

**PRESENTA:
JESÚS ALFREDO GONZÁLEZ DEL ANGEL**

**DIRECTORA:
DRA. ELIZABETH SOLLEIRO REBOLLEDO**



MÉXICO, D.F.

2007



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por permitirme ser parte de su comunidad y darme la valiosa oportunidad de formarme académicamente en la FEZ Zaragoza y CCH Vallejo.

Al Instituto de Geología y sus autoridades por todas las facilidades, apoyo y beca otorgada.

De manera muy especial a la Dra. Elizabeth Solleiro Rebolledo, por la oportunidad y apoyo que me confirió para la realización de mi tesis de grado.

A la Biol. Elvia García Santos por ser mi Directora y apoyarme para la culminación de este trabajo.

Al Jurado para Examen de Grado: M. en C. Ma. De Jesús Sánchez Colín, Dr. Gerardo Cruz Flores y Biol. Leticia López Vicente.

Al Departamento de Edafología, a su Grupo de Paleosuelos, de forma especial a la Dra. Ernestina Vallejo por ayuda en la fase de laboratorio de ese trabajo, M. en C. Kumiko Shimada, Dr. Jorge Enrique Gama Castro, Dr. Sergey Sedov y Angel Reyes.

Dr. José Luís Gómez Márquez por su ayuda en la interpretación estadística de este trabajo.

A mis compañeros M. en C. Julia Pérez, M. en C. Héctor Cabadas Báez, M. en C. Yazmín Rivera y M. en C. Jaime Díaz por su amistad, comentarios y observaciones.

A mi pareja y amiga Dulce Beltrán por estar a mi lado incondicionalmente.

Y al grupo del seminario de edafología por las correcciones y su interés por este trabajo.

Al proyecto PAPIIT IN 400403.

DEDICATORIA

A mi madre: Mercedes por ser el la motivación de este trabajo.

¿En que consiste el éxito?

¿En que consiste el éxito?

En reírse mucho y con frecuencia.

En ganarse el respeto de la gente inteligente.

En lograr el reconocimiento de los críticos honestos

y en resistir la tentación de amigos falsos.

En saber apreciar la belleza.

En encontrar las mejores cualidades de los demás.

En dejar un mundo un poco mejor, a causa de el mejoramiento
de una condición.

En saber que al menos un ser respira más tranquilo

Por que tú has vivido.

	<u>CONTENIDO</u>	Página
RESUMEN		1
CAPITULO I. INTRODUCCIÓN		2
I.1. JUSTIFICACIÓN		6
1.2. HIPÓTESIS		5
I.3. OBJETIVOS		7
1.3.1. General		7
1.3.2. Particulares		7
CAPITULO II. FUNDAMENTO TEÓRICO		8
II.1. Conceptos de suelo		8
II.2. Paleosuelo		9
II.3. Indicador químico		10
II.4. Origen del fósforo		10
II.5. Fuentes antropogénicas de fósforo		13
II.6. Fósforo en el suelo		15
CAPITULO III. ANTECEDENTES		20
CAPITULO IV. MATERIALES Y MÉTODOS.		23
IV.1. Descripción del área de estudio.		24
IV.2 Geología		26
IV.3 Delimitación del área de estudio		27
IV.4 Etapa de campo		30
IV.4.1 Descripción de los perfiles		30
IV.4.2 Muestreo		36
IV.5 Etapa de laboratorio		36
IV.5.1 Análisis de fósforo disponible.		36
IV.5.2 Análisis de P total.		37
IV.6 Trabajo de gabinete		38
CAPITULO V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		38
V.1 Fósforo disponible en la casa Azteca		38
V.2 Fósforo disponible en Río San Pablo.		43
V.3 Fósforo disponible en la Pirámide de la Luna.		44
V.4 Fósforo total		45
V.5 Similitud entre métodos		46
V.6 Prueba de Eidt		48
V.7 Fosforo e impacto humano		49
VI. CONCLUSIONES		52

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
ANEXO	61

FIGURAS

1.	Ciclos del P en el suelo	16
2.	Concentraciones de P-disponible por el método de Mehlich-2	22
3.	Localización de la zona de estudio	24
4.	Retícula que muestra los tres perfiles en color dentro de la casa Azteca, con cuadros se han marcado los sitios muestreados para el análisis de P	29
5.	Restos de cerámicas encontrados en la excavación.	30
6.	Perfil 1. Testigo	31
7.	Perfil 2. Cuadro W4-S5 sur	32
8.	Perfil 3. Dentro de la excavación. Cuadro E5-S3 pared este	33
9.	Perfil 4 Cuadro W2-N4-N3. Área sin actividad específica	33
10.	Perfil 5. San Pablo	34
11.	Esquema de la pirámide de la Luna mostrando los diferentes edificios, construidos progresivamente, del 1 al 7, y los rellenos del edificio 1, 2 y 4.	35
12.	Concentraciones promedio de P disponible con los 3 métodos probados	39
13.	Tendencia de las concentraciones de P disponible, extraído con las 3 técnicas utilizadas.	39
14.	Concentración de P disponible (mgkg^{-1}) en la estructura.	42
15.	P-disponible por el método de Mehlich II en el perfil San Pablo.	43
16.	P-disponible por el método de ácido cítrico en el perfil San Pablo.	43
17.	Diagrama de caja para los valores de P-disponible.	47
18.	Resultados de la prueba de Eidt.	49

CUADROS

1.	Concentraciones promedio de P obtenidas de los perfiles dentro de la casa Azteca y el perfil testigo	41
2.	Concentración de P-disponible en la pirámide de la Luna.	45
3.	Concentración de P-total de los sitios seleccionados.	46
4.	Análisis estadístico de los resultados de P.	46
5.	Clasificación de resultados, Eidt (1985).	48

RESUMEN

Este trabajo presenta el estudio de una propiedad de suelos y paleosuelos (Fósforo disponible), del Valle de Teotihuacan. Fueron estudiados dos sitios arqueológicos y otro relacionado con ellos: Cerro San Lucas, Pirámide de la Luna y San Pablo, y un suelo sin rastros de alteración para utilizarlo como testigo.

El análisis de P permite realizar una reconstrucción del tipo de actividades que se llevaron a cabo en el sitio, los niveles de P al acumularse por actividades humanas puede llegar a ser enormemente grande en ordenes de magnitud a las concentraciones naturales de este elemento.

La tesis esta compuesta por seis capítulos:

El Capitulo I consta de: introducción, justificación, hipótesis y objetivos que se pretenden obtener.

El Capitulo II, se presenta el fundamento teórico donde se da una explicación breve de que es un indicador químico, el origen del P antropogénico y por que el análisis de P se ha utilizado en contextos arqueológicos.

El Capitulo III involucra los antecedentes del análisis de P desde los inicios del siglo XX hasta estudios hechos actualmente en México.

El Capitulo IV involucra la metodología del trabajo con respecto a la compilación de información, trabajo de campo, laboratorio y gabinete.

El Capitulo V presenta los resultados obtenidos, donde se describe lo más significativo de cada sitio estudiado en cuanto a los niveles de P encontrados. También muestra la discusión de los resultados del análisis efectuado, se

analizan las tendencias de los niveles de P para poder relacionarlas con actividades humanas específicas.

Las conclusiones capítulo VI, contienen una síntesis de la interpretación de los resultados mas importantes

En el anexo, se presentan los tres métodos de extracción de P disponible que fueron manejados en este trabajo.

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

Las actividades humanas, antiguas y actuales dejan sus huellas geoquímicas en las zonas donde se realizan. Dichas huellas son denominadas: indicadores y algunos de ellos persisten y pueden usarse como evidencias de la presencia humana en diversos lugares.

Uno de los indicadores geoarqueológicos más significativo de la actividad humana entre sociedades agrícolas y pre-agrícolas es el Fósforo (P). Muchos elementos son dejados en el suelo por los seres humanos (Entwistle, *et al* 2000) pero pocos funcionan de forma tan sensible y persistente como el fósforo.

Este elemento entra dentro de un grupo de indicadores químicos de actividad humana que pueden usarse en:

- Investigaciones de asentamientos arqueológicos.
- La determinación de fases de ocupación/abandono.
- El estudio microespacial de áreas de actividad, que permite como establecer el lugar de la cocina, almacenamiento de víveres, basureros etc.

Un indicador químico debe ser capaz de aportar información sobre el tipo y/o la intensidad de las actividades desarrolladas en un determinado espacio (el área de actividad) tanto por su presencia como por su ausencia, o bien por su abundancia o por su escasez. Los niveles de ocupación y los recipientes cerámicos a ellos asociados son, en principio, los lugares idóneos donde se realiza el análisis de los indicadores seleccionados. (Sánchez, 2004)

De hecho las actividades llevadas a cabo por el hombre durante el periodo de vida humana quedan reflejadas químicamente, de una u otra manera en el suelo, y son independientes del registro arqueológico presente. Los suelos conservan los restos químicos de la actividad, al menos durante el último momento. Así los indicadores químicos se convierten, en un elemento directriz para la interpretación de las áreas de actividad (Sánchez, 2004).

Consecuentemente, el análisis del fósforo ha sido de gran interés para arqueólogos pues representa una técnica útil para detectar e interpretar evidencia de la actividad humana. Por otra parte, el fósforo es importante en el crecimiento vegetal y es parte trascendental de la investigación de la ciencia de suelo (Holliday, 2006).

Por sus características, el fósforo se ha usado con mucho éxito en las investigaciones arqueológicas destacando su capacidad de aportar información sobre los tipos de áreas de actividad (producción, consumo, almacenaje, circulación, cementerios, viviendas, zonas de combustión, así mismo permite establecer los límites verticales o los dominios de las ocupaciones, abandono

y/o destrucción, etc.), Con respecto a su movilidad se sabe que puede ser traslocado a través el perfil por efectos pedogenéticos, quizás a una profundidad de 1 m en más de mil años (Goldberg, 2006),

I.1. JUSTIFICACIÓN

Algunas formas de P en el suelo son altamente resistentes a los procesos de oxidación, reducción o lixiviación. Cuando los seres humanos agregan P al suelo, ya sea conciente (fertilización) o inconcientemente, se acumula a menudo en el sitio de la depositación. Con la ocupación prolongada, la acumulación de P antropogénico puede llegar a ser extremadamente grande (por órdenes de magnitud) con respecto al contenido de P natural en el suelo. Esto es porque el P es un elemento que completa un ciclo principalmente en el tiempo geológico (Eidt, 1985).

De esta forma y su alto poder de concentración se pretende contribuir a la comprensión de los efectos de la ocupación humana en la capa edáfica, particularmente en la región de Teotihuacan, la cual albergo una de las culturas más desarrolladas de Mesoamérica.

Se considera que su presencia en el valle por más de 8 siglos (I al VII D.C.) produjo un impacto que puede ser evaluado con los valores del P.

I.2. HIPÓTESIS

Se considera que las concentraciones de P-disponible y de P- total serán mayores dentro del área de la unidad habitacional, comparadas con las concentraciones naturales de este elemento en sitios no perturbados ya que las actividades humanas lo acumulan en ciertos sitios. Es por ello que una concentración más alta puede ser un criterio que evidencia impacto antrópico en ciertas áreas de suelo.

I.3. OBJETIVOS

I.3.1. General

Evaluar las concentraciones de fósforo con 3 métodos para determinar P disponible y 1 para P-total, en los suelos y paleosuelos de tres sitios del Valle de Teotihuacan, con el fin de reconocer el impacto humano generado por la ocupación humana en el área.

I.3.2 Particulares

- Determinar la cantidad de P presente en las diferentes muestras de suelo por medio de tres métodos diferentes: Bray, Mehlich II y ácido cítrico.
- Comparar los contenidos de P en la excavación con los contenidos de un suelo fuera de la zona de ocupación.
- Evaluar que método de los 3 utilizados es mas conveniente en relación a resultados vs. duración del análisis.
- Evaluar el impacto humano con el apoyo de los valores de P.

CAPITULO II. FUNDAMENTO TEÓRICO

II.1. Conceptos de suelo

Existen tantas definiciones de suelo como disciplinas hay en la ciencia e incluso para personas que no se dedican a ella (Cabadas, 2004). Dado que este trabajo es presentado como una tesis aplicada al campo de geoarqueología, es conveniente dar primero una definición proveniente de las Ciencias de la Tierra.

En Geología se define suelo, como un material no consolidado producto del intemperismo. En los mapas geológicos, aparece como un área de color amarillo en la que comparten espacio y tiempo con otros materiales de origen sedimentario (aluvión, depósitos eólicos y glaciares, etc.) identificados en la mayoría de las ocasiones con la leyenda Q.

Dentro de la Ciencia del Suelo el concepto establecido por el científico ruso V.V. Dokuchaev a fines del siglo XIX, considera que el suelo es producto de la interacción de factores formadores y modificadores, lo que contribuye a tener una visión más completa. En este contexto, Fanning y Fanning (1989) proponen la concepción de suelo como un cuerpo natural organizado, lo que implica que es el resultado de las interacciones del clima, organismos, material parental y relieve a través del tiempo. Desde este punto de vista, el suelo puede considerarse como un sistema vivo y dinámico entre cuyas funciones primordiales están las de mantener:

- a) la productividad de las especies vegetales que en él se establecen,
- b) la biodiversidad en general,

- c) la calidad del aire y del agua,
- d) la salud humana y el hábitat (Etchevers *et al.*, 2000; Seybold *et al.*, 1997).

Las definiciones dadas son admisibles para ubicar el concepto de suelo. Sin embargo, para fines prácticos de este trabajo, se utilizara la definición propuesta por Gama y colaboradores (1998):

“Suelo es el continuo de espacio-tiempo que forma la parte superior de la corteza terrestre, siendo el producto de la alteración de rocas y materiales, mediante los procesos pedogenéticos que operan a través del tiempo”.

II.2. Paleosuelo

Los paleosuelos (del griego *palaios* = antiguo y del latin *solum* = suelo) son los suelos que se formaron en paisajes del pasado geológico, como bajo condiciones ambientales cambiantes, principalmente asociadas al clima y la vegetación (Bronger y Catt, 1989). Algunos existen ahora dentro de ambientes que difieren de los que produjeron sus características mas importantes. Se han reconocido tres las clases de paleosuelos: (Ruhe, 1965).

- Relicto: son los suelos que nunca han sido sepultados y que han permanecido en superficie, ajustándose a los cambios en el ambiente
- Enterrado: suelos que son sepultados por diferentes tipos de sedimentos deteniendo su evolución.
- Exhumado: son suelos que fueron sepultados y por procesos de erosión o tectónicos afloran nuevamente en superficie.

De esta forma se incluyen dentro del concepto de paleosuelos, no sólo a suelos sepultados o exhumados por la erosión sino además, a aquellos que se formaron cuando las condiciones ambientales eran diferentes a las actuales y que continuaron evolucionando en la superficie, a través del tiempo, bajo las condiciones imperantes en el presente (Bronger y Catt, 1989).

II.3. Indicador químico

A modo de idea general puede establecerse una definición de lo que se entiende por un indicador químico y bioquímico:

Elemento, sustancia o compuesto que, en su estado original o transformado, es susceptible de ser analizado, identificado y relacionado en mayor o menor medida con una serie de acciones, acontecimientos y procesos de carácter concreto (Sánchez, 2004).

II.4. Origen del fósforo

El P constituye 0.12% de la corteza terrestre. Se conocen cerca de 150 minerales que contienen más de 0.44% P (1% P_2O_5). Los yacimientos se pueden dividir en 5 grupos:

- a. **Fosforitas marinas** formadas mediante la acumulación de huesos de peces y animales. Constituyen aproximadamente el 80% de las reservas. El P se encuentra en forma de un mineral denominado hidroxiapatita o apatita carbonatada.

- b. **Apatitas de origen ígneo** formadas como mineral accesorio de las rocas intrusivas y extrusivas.
- c. **Depósitos residuales** especialmente formados por solubilización de rocas calizas.
- d. **Depósitos de guano con residuos de pájaros o murciélagos.**
- e. **Rocas fosfatadas** formadas por disolución (guano y rocas calizas) de ácido fosfórico y su acumulación específica en la corteza terrestre. (Fassbender, 1987).

La cantidad de P presente en las rocas es variable. En rocas ígneas, se encuentra en minerales de apatitas, con un promedio de P elemental de 1000 ppm. En las rocas sedimentarias el valor medio estimado es de 200 ppm, aunque algunas rocas calizas y areniscas promedian cantidades mayores. Finalmente, las rocas metamórficas ofrecen cantidades mayores que están en relación directa con los materiales a partir de los cuales se formaron (Eidt, 1984). El contenido total de P en los suelos es relativamente bajo. En suelos minerales de áreas templadas, el contenido de P total varía entre 0.02 y 0.08 % (200 a 800 mgkg⁻¹) y en promedio gira alrededor de 0.05% (500 mgkg⁻¹). Las grandes variaciones en el contenido de P se deben a la heterogeneidad de las rocas parentales, al desarrollo de los suelos y a otras condiciones edafológicas y ecológicas (Fassbender, 1987).

Fassbender, (1987) encontró que el contenido de P también depende de la textura de los suelos, tanto en áreas de clima templado como tropical, ya que cuanto más fina su textura, mayor es su cantidad. Lo que es aplicable por la disminución de los fosfatos orgánicos

El P también se encuentra en plantas y animales (Eidt, 1984). Tanto el hombre como los animales usan para su nutrición los productos fosfatados orgánicos vegetales. En este aspecto el P juega un papel importante en la bioquímica energética. Las cantidades de P en la biosfera son limitadas en comparación con las contenidas en la hidrosfera y litosfera (Fassbender, 1987). En rocas aparece tanto en forma de fosfato orgánico como inorgánico. En el caso de los animales, los análisis realizados indican que los porcentajes de P son más altos en los huesos (23.5%), en el hígado (22.1%), en los pulmones (21.3%), en el cerebro (21.2%) y en la sangre (4.5%). De igual manera, los productos de deshecho también presentan importantes cantidades de P, por ejemplo existe un 15.8% en los excrementos y un 4.9% en la orina. Junto a todo ello, la presencia de P es también necesaria como tampón en los fluidos animales (la leche tiene un 8.3% y la bilis 4.6%) y para la síntesis de proteínas animales. Por lo que respecta a las plantas, es un componente indispensable para el crecimiento de la raíz, para la función clorofílica, para la madurez de la planta y para el desarrollo de la flor y producción de semillas (Eidt, 1984)

Junto a todo lo anterior, las actividades humanas son sin duda el agente productor de P más importante. Además de los materiales corporales de deshecho, también hay que considerar la importancia de actividades relacionadas con la preparación, consumo y eliminación de alimentos, la estabulación del ganado y los trabajos artesanales asociados a la manipulación de productos orgánicos (Sánchez, 2004).

II.5. Fuentes antropogénicas de fósforo

Las fuentes generales de P antes de la era industrial, incluyen: basura, especialmente derivada del desgaste orgánico del hueso, de la carne, pescados y de las plantas; cementerios y ceniza (Bethell, y Ma'te', 1989). El desarrollo de economías agrícolas hizo necesario la fertilización en muchas áreas, con técnicas de quema y el uso de abonos verdes o de guano, basura del ser humano, productos animales y fertilizantes químicos (Miller y Gleason, 1994).

Los elementos que más cambian por la actividad del ser humano son el carbono, nitrógeno, sodio, fósforo, y calcio, en menor proporción el potasio, magnesio, azufre, cobre, cinc y otros elementos (Eidt *et al.*, 1985). Estos elementos pueden ser utilizados como indicadores de la actividad humana (Entwistle, 2000). El fósforo, en su forma común como fosfato, es menos susceptible que la mayor parte de estos elementos a la lixiviación, oxidación, reducción, absorción por la planta (Carr *et al.*, 1982) y los índices de transformación o de pérdidas naturales del suelo determinado por procesos pedológicos y biológicos locales (Holliday, 2006).

Cuando se agrega P al suelo en forma de productos orgánicos o compuestos inorgánicos, el P se enlaza rápidamente a los iones del Fe, Al, o Ca (dependiendo de las condiciones químicas locales, particularmente del pH y la actividad microbiana) para formar compuestos relativamente estables (Bethell y Ma'te', 1989). Algunas de ellas son altamente resistentes a procesos normales de oxidación, reducción, o lixiviación. Por lo tanto, se acumula en el sitio donde se deposita. Con la ocupación prolongada, la acumulación de P

antropogénico puede llegar a ser alta (por órdenes de magnitud) en relación al contenido de P natural en el suelo (Eidt, 1985).

Las actividades humanas pueden redistribuir fuertemente el P en los suelos. Las plantas lo toman del suelo. Estas pueden ser comidas por los animales o cosechadas. Los animales son aprovechados por los humanos; concentrando el P dentro de un área particular. Los residuos de estiércol se pueden recoger y utilizarse como abonos, esparcirse sobre los campos; pueden ser utilizados como combustible o como material de albañilería (Bethell, y Ma'te', 1989). De esta manera, aun cuando los niveles en plantas y animales sean bajos, los procesos antropogénicos, lo van a concentrar. Cuando el P se incorpora al sistema del suelo se vuelve relativamente inmóvil comparado a otros elementos concentrados por las actividades de los seres humanos (Bethell, y Ma'te', 1989)

Otro factor que hace al P conveniente para el estudio geoarqueológico es que el P antropogénico puede existir en el rango de pH de la mayoría de los suelos. Bajo condiciones ácidas, el P se combina con el hierro y el aluminio, mientras que bajo condiciones básicas, el P se liga con el calcio. Por lo tanto, el análisis del P en el suelo se puede utilizar en una variedad amplia de contextos arqueológicos. De hecho, donde hay poco o nada de evidencia superficial de ocupación humana, el análisis del suelo P puede ser una herramienta apropiada para detectar rastros de la actividad humana así como la forma y la función particulares que se asocian a esa presencia, aunque con muchas restricciones (Holliday, 2006).

2.6 Fósforo en el suelo

El P se presenta en el suelo casi exclusivamente como ortofosfato y todos los compuestos son derivados del ácido fosfórico (H_3PO_4) (Fassbender 1987).

Entender la diferencia entre las formas del P o las fracciones de P y de las extracciones son la clave del papel que juega en contextos geoarqueológicos. En la fig. 1 se muestran los componentes y caminos del ciclo del P en el suelo. Resume las diversas formas de P orgánico y la importancia de los microorganismos en las transformaciones del P el suelo.

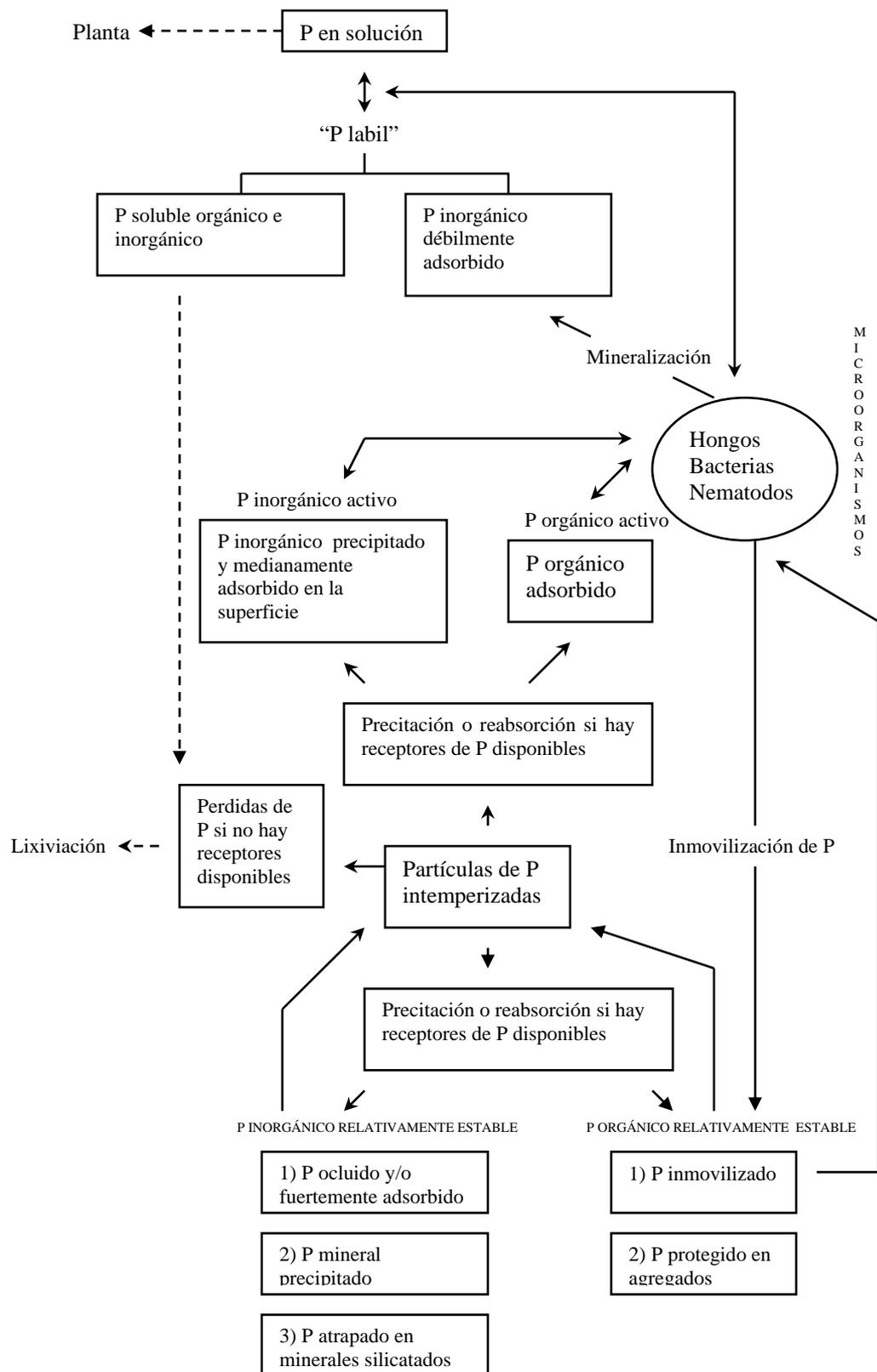


Figura. 1. Ciclos del P en el suelo, modificado de Holliday, (2006).

Los compuestos de fósforo orgánico e inorgánico pueden persistir en los suelos por un período del tiempo muy amplio y ocurrir en una variedad de formas (Holliday, 2006). El ciclo geoquímico del P representa sólo una parte del que cumple en la naturaleza. El P es relativamente estable en los suelos. No presenta compuestos inorgánicos, como los nitrogenados que pueden ser volatilizados o altamente lixiviados. Esta gran estabilidad resulta de su baja solubilidad (Fassbender, 1987). El P inorgánico (P-in) puede ser encontrado disuelto en la solución del suelo, como precipitado químico, como iones ortofosfato (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} , PO_4^{3-}) adsorbido en partículas superficiales, o como iones ortofosfato ocluidos dentro de las partículas. La adsorción refiere a la asociación de un producto químico con los sólidos del suelo, típicamente en la superficie de una partícula y se logra a través de mecanismos químicos y biológicos (Scow y Jonson, 1997). El P ocluido trata de los iones ortofosfato que son físicamente incorporados o químicamente encerrados dentro de partículas, generalmente arcillas, integradas por óxidos amorfos, hidratados de hierro y aluminio o amorfos aluminosilicatados. El fósforo orgánico (P-org), a menudo abarca del 20 al 80%, en casos extremos hasta 85% del P total (P-tot) y al igual que el (P-in), se encuentra disuelto en la solución del suelo y adsorbido en partículas del suelo. Los ésteres de fosfato, especialmente fosfatos del inositol, fósforo de los ácidos nucleicos y los fosfolípidos son los compuestos más comunes del suelo. Cuando los ésteres están ligados a minerales de arcilla y a la materia orgánica pueden persistir en suelos durante mucho tiempo, particularmente si se inmovilizan al estar protegidos en agregados (Iyamuremye y Dick, 1996).

La precipitación, la absorción y los procesos de la obstrucción son reversibles por la disolución y transformación. El grado de la disolución es controlada por mecanismos biológicos y químicos (Stevenson y Cole, 1999). El P adsorbido en la superficie de una partícula del suelo se expone directamente a los microorganismos y a compuestos químicos y por lo tanto es más probable disolver el adsorbido que el ocluido. El P adsorbido con enlaces más débiles es más probable que se libere de una partícula del suelo que el P adsorbido fuertemente. El intemperismo químico, físico y biológico de los sólidos del suelo puede exponer al P a los microorganismos y a los compuestos químicos o bien debilitar la fuerza del enlace del P a una partícula. Sin embargo, la disolución del fósforo necesariamente no da lugar a la pérdida del P del suelo (Holliday, 2006).

Los microorganismos son particularmente importantes para la transformación de P en el suelo. Dos o más son las transformaciones microbianas del P, la mineralización o conversión a formas débilmente adsorbidas, "P-in", e inmovilización, con la formación de una forma de "P-org" relativamente estable que es altamente resistente a la disolución y a otros procesos de pérdida (fig. 1). El fósforo débilmente adsorbido u inorgánico se disuelve y es tomado fácilmente por las plantas. El P inmovilizado representa una porción significativa del P en el sitio arqueológico (Holliday, 2006).

Las formas de P soluble y débilmente adsorbido (P-disponible), son altamente móviles y muy susceptibles a la disolución y transformación. El P-disponible es extraído fácilmente por los reactivos suaves como la resina. A

pesar de su movilidad, el P-disponible está a menudo presente en los sitios arqueológicos (Schuldenrein, 1995).

Las moléculas de P son susceptibles a la disolución, o transformación por la exposición prolongada a los microorganismos y por desgaste o intemperismo en ciertas condiciones del suelo. La mayoría se puede extraer por medio de bicarbonatos e hidróxidos (Woods 1977, citado por Holliday, 2006).

Lehmann *et al.*, (2004) indica que el P-inorgánico ocluido, adsorbido fuertemente en las matrices minerales se inmoviliza o se protege en agregados y no es muy susceptible a la disolución o transformación. Este P-inorgánico ocluido puede también constituir un porcentaje relativamente grande en el suelo en sitios arqueológicos (Woods1977, citado por Holliday, 2006)

CAPITULO III. ANTECEDENTES

El uso del análisis de P en arqueología tiene su origen en los primeros años del siglo XX y supone un buen ejemplo de adaptación de una técnica desarrollada en un campo científico diferente, la agronomía. El hecho de que la ocupación humana incrementa los niveles de P en el suelo de un yacimiento por encima de los niveles de la roca natural, fue en principio tomado como un resultado secundario en las investigaciones de los agrónomos (Sanchez, 2004).

Aunque el primero que aparentemente observó este fenómeno fue Hughes en 1911 trabajando en Egipto (Bethell y Ma'te', 1989), el primer intento de aplicación sistemática del análisis de P fue llevado a cabo por el agrónomo sueco Olaf Arrhenius en 1926, quien trabajando en un campo de cultivo para evaluar la fertilidad de las tierras, se dio cuenta de la existencia de niveles de P demasiado altos en lugares que no debían existir. A partir de esta observación pudo descubrir que se encontraba sobre un antiguo asentamiento vikingo, en Ancylyus y Littorina, hecho que despertó el interés de arqueólogos y geógrafos hacia el análisis de P como una forma de localización de asentamientos humanos (Arrhenius, 1963). El método utilizado por Arrhenius empleaba ácido cítrico al 2% para extraer el P disponible y a continuación realizaba una determinación calorimétrica de azul de molibdeno (Sánchez, 2004).

En 1934 el investigador danés Christensen estudió la villa medieval de Stokkerup en donde en el siglo XVII se construyó una habitación relacionada con la caza y grandes jardines. El análisis de P de las muestras se realizó con

una solución de ácido nítrico al 1% y su coloración con el método de azul de molibdeno, los resultados mostraron una medida de P diez veces superior en el área de la villa y el doble en la zona no cultivada correspondiente a antiguos campos de cultivo. Christensen también trabajó sobre yacimientos de la edad de Hierro y en una fortificación vikinga demostrando que el método tenía éxito, incluso un asentamiento de corta duración (Sánchez, 2004).

En 1951, Soleki hace mención a la relevancia del uso del análisis químico en la arqueología americana como una forma de determinar áreas de ocupación intensiva, aprovechando el P procedente de depositación y degradación de la materia orgánica; heces fecales, restos de alimentos, etc. Propuso una escala arbitraria y cualitativa de 6 niveles de P: nula, muy pequeña, pequeña, media, alta y muy alta (Sánchez, 2004).

Con más precisión, Dietz (1975) se distinguió de gran parte de los investigadores por que en lugar de utilizar técnicas de análisis cualitativas, midió la cantidad exacta de P inorgánico colorimétricamente. Aplicó el análisis a un asentamiento indio de Wisconsin en el que las condiciones de conservación habían afectado casi totalmente la existencia de restos visibles. Muestreó el asentamiento a intervalos fijos y propuso la existencia de zonas de desecho de las cabañas en aquellos lugares donde el P se concentraba más, mientras que otros sectores con menor presencia de P eran identificados como las zonas en las que colocaron las cabañas y sus hogares (Sánchez, 2004).

En un estudio similar hecho en Guatemala Terry, *et al.*, (2002) evaluaron un conjunto de pruebas de análisis de P del suelo para usar en un sitio arqueológico (Fig. 2). El método de Mehlich-2 fue comparado con una extracción de bicarbonato, haciendo la digestión con ácido perclórico (para P-total) y la prueba de Eidt (clasificada en una escala 1 a 5). Las tendencias en los procedimientos de Mehlich y del bicarbonato fueron similares, pero el procedimiento de Mehlich produjo más P-extractable que el método del bicarbonato. El método de P-total extrajo 100 veces más que el P extraído por el procedimiento de Mehlich-2, porque el método disuelve todo el P. Los valores del método de Mehlich no podían ser comparados con la extracción de P-total. Sin embargo, ambas fracciones (Mehlich y bicarbonato) reflejaron mejor las alteraciones antropogénicas del suelo que el P-total. Los resultados de la prueba de Eidt tenían solamente una correlación moderada con Mehlich (Terry, *et al.* 2002).

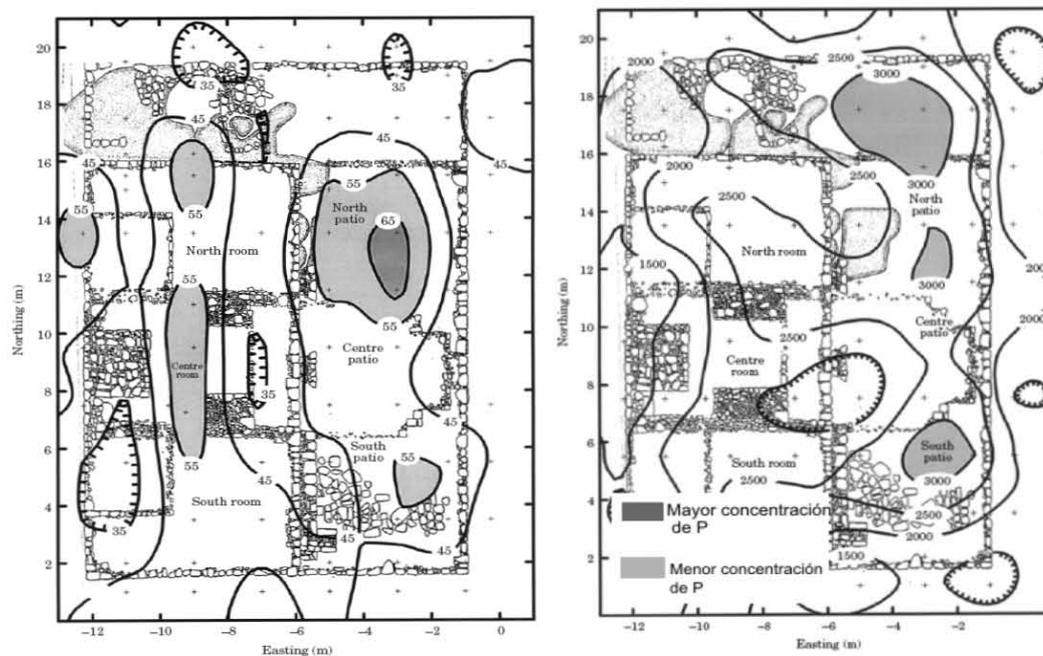


Figura. 2. A la izquierda concentraciones de P-disponible por el método de Mehlich-2, a la derecha concentraciones de P-total extraído por digestión con ácido perclórico tomado de Soil Chemical Analysis Applied as an Interpretive Tool for Ancient Human Activities in Piedras Negras, Guatemala. (Terry *et al.* 2006).

Como se aprecia en la figura 2, la sensibilidad de Mehlich II es mayor en las entradas de P antropogénico, pues permite detectar áreas de preparación de comida, de desechos, de consumo de alimentos. Así mismo, el método fue considerado como el de menor costo (Terry *et al.* 2002).

Varios estudios han comparado métodos para extraer P-disponible. Kamprath y Watson (1980) demostraron que los métodos Bray-1, Olsen y de Carolina del Norte (o el Mehlich-1) producen resultados generalmente comparables. En un contexto geoarqueológico, Proudfoot, (1976) evaluó el P-disponible basado en una variedad de extractantes (que usan el lactato de calcio, ácido hidrociorhídrico, ácido acético, ácido cítrico, y agua destilada). Los valores generalmente, son diferentes las reacciones químicas durante los procesos de extracción.

En México, Barba y Bello, (1978) han analizado el P en suelos de una casa actual y encontraron concentraciones variadas de este elemento, de acuerdo con el uso. Barba y Ortiz (1992) corroboraron estas investigaciones en un sitio arqueológico en Tlaxcala. Este tipo de análisis también ha sido aplicado exitosamente en Oztoyahualco, y Coba (Manzanilla y Barba, 1990). Sin embargo las técnicas de análisis se basan en la prueba de Eidt (1985) que es cualitativa y no eran determinaciones analíticas.

CAPITULO IV. MATERIALES Y MÉTODOS.

IV.1.Descripción del área de estudio.

La porción central de la Cuenca de México, donde se encuentra localizado el valle de Teotihuacan se localiza entre los paralelos 19°22' y 19°30' de latitud norte y entre los meridianos 98°47' y 98°51' de longitud oeste. Limita al norte con la población de Otumba, el Cerro Gordo y Teotihuacan; al Sur, con las poblaciones de Amecameca y la Sierra de Chichinautzin, al Oriente con la Sierra Nevada (hasta el Volcán Iztaccíhuatl) y al Poniente con el Ex Lago de Texcoco (Figura 3). Tiene una extensión de 5,297 km y un intervalo altitudinal que va de los 2,240 hasta los 5,300 msnm (SEMARNAP, 1996).

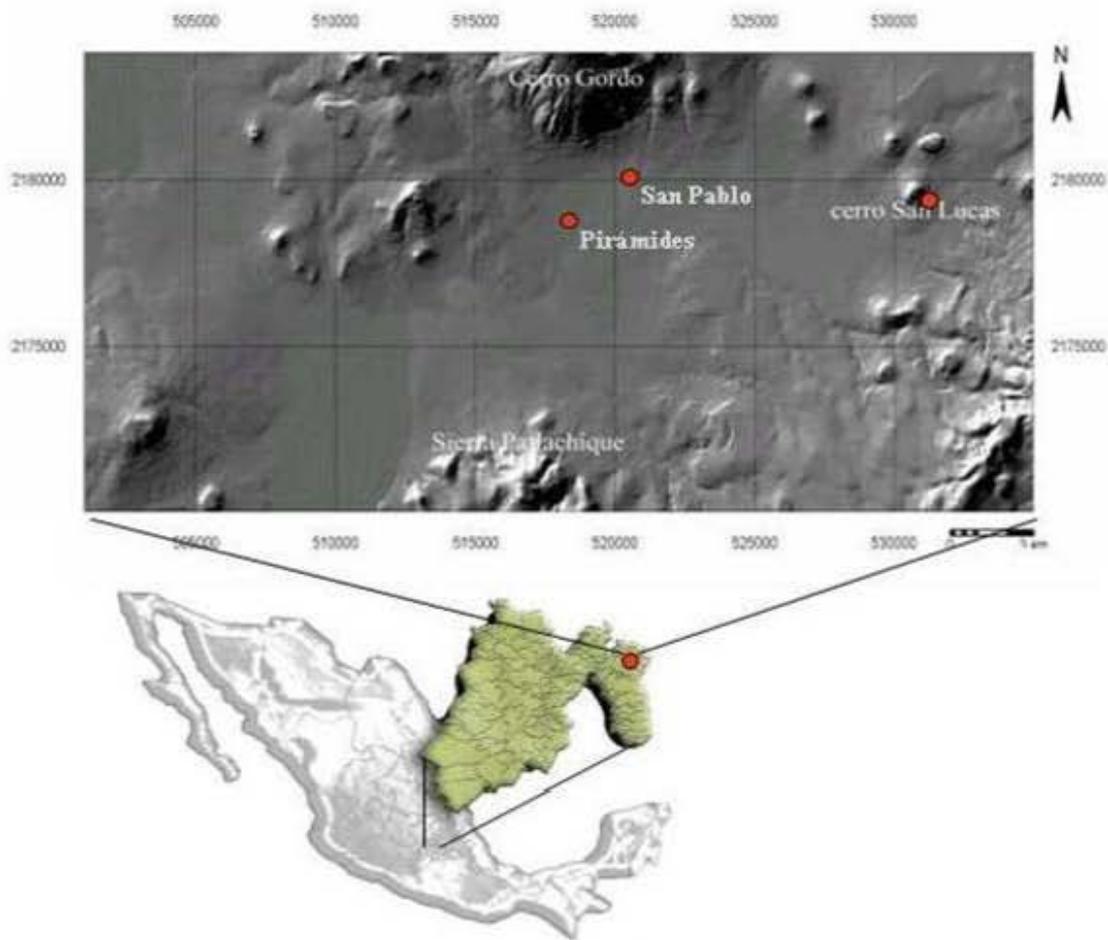


Fig. 3 Localización de la zona de estudio.

Los tipos climáticos con mayor cobertura en el área son primordialmente el templado semiseco, localizado en las partes bajas (planicie lacustre de Texcoco), con una temperatura media anual de 14°C a 18°C; el templado subhúmedo localizado en las planicies aluviales, en las porciones inferiores extremas de los piedemonte, con una temperatura media anual de 12°C a 16°C; el muy frío localizado en la cumbre del volcán Iztaccíhuatl, donde la temperatura media anual es inferior a los -2°C, y en el mes más cálido inferior a 0°C (García (1988); SFP (1993); Guillén-Guerrero, (1996). Los tipos de suelo dominantes, son los Andosoles, los Cambisoles, los Feozems, y los Litosoles (INEGI, 1983). La vegetación y el uso actual de suelo están influenciados por los diferentes pisos altitudinales. En las porciones bajas, en donde se localizan los suelos salinos y las áreas inundables, existen pastizales halófilos, vegetación arbórea como el pirul, eucalipto, casuarina, etc., así como agricultura de riego en donde se siembra maíz, trigo y cebada. En las áreas con altitudes medias, representadas por los piedemontes, la vegetación es herbácea del tipo de las gramíneas, leguminosas, cactáceas, liliáceas y compuestas, y arbórea como el pirul, eucalipto, casuarina, cedro y huizache. Se presenta también agricultura de temporal de maíz principalmente. En las laderas montañosas se encuentra el zacatonal, bosques de *Pinus* y *Abies*, bosque de encinos y oyamel, agricultura de temporal, etc. (Mc Clung *et al*, 2003).

Al área pertenecen parcialmente 47 municipios del Estado de México, cinco al de Puebla y dos al de Tlaxcala (INEGI, 1990). A la población urbana le corresponde un 97% de la población total y a la rural sólo un 3%. El proceso de crecimiento urbano ha generado un grave deterioro sobre tres de los

componentes principales del equilibrio ambiental del área: el suelo, la vegetación y el agua. A lo anterior se suma particularmente la carencia de recarga de los mantos acuíferos. Específicamente en las porciones altas de los piedemontes, la carencia de vegetación natural en las áreas cuyos suelos son vulnerables a los procesos de escurrimiento laminar y concentrado ha generado erosión hídrica que se ha manifestado por la presencia de erosión acelerada de suelos agrícolas y formación de cárcavas (Tapia y López, 2006).

IV.2 Geología

La cuenca de México se encuentra en el Cinturón Volcánico Transmexicano (CVT), el cual constituye uno de los rasgos más característicos de la geología de México.

La cuenca está alargada en dirección NNE-SSW con longitud de unos 100 km y anchura de unos 30 km, delimitada al norte por la Sierra de Pachuca, al oriente por la Sierra de Río Frío y por la Sierra Nevada, al sur por la Sierra de Chichinautzin y al poniente por el Volcán Ajusco y la Sierra de Las Cruces (de Cserna.*et al.*, 1988).

Durante el Mioceno temprano, la actividad magmática y tectónica generó rocas volcánicas y un fracturamiento de orientación W-E. En este período predominaron las erupciones de andesita y dacita, con un espesor promedio de 600 a 700 m. Estas rocas fueron erosionadas antes de que se presentaran las manifestaciones volcánicas del final del Mioceno (de Cserna.*et al.*, 1988) Existen afloramientos de toba, brecha y complejos volcánicos profundamente erosionados en algunas porciones de la base de la Sierra de Guadalupe y en cerros como Coatepec y Gordo, considerados por Mooser (1975) como

pertenecientes al Mioceno y cuya composición varía de andesita basáltica a traquiandesita y dacita. Al final del Mioceno se inicia la formación de las sierras mayores: la Sierra de Río Frío y la Sierra Nevada. Para el Plioceno-Cuaternario se marcan fracturamientos y fallas que provienen del poniente y describen un gran arco cóncavo hacia el sur, afectando a la Sierra Nevada y formando la fosa en el flanco poniente del Cerro Tláloc. Asimismo se presentan las fracturas, fallas y fosas que mantienen un rumbo NNE, como las fracturas Tláloc-Apan localizadas en la cima del Cerro Tláloc, la fosa Cuauhtepac en el corazón de la Sierra de Guadalupe y los fracturamientos en los núcleos de la Sierra Nevada, (Tapia y López, 2001).

El vulcanismo pleistocénico y holocénico de tipo monogenético formó conos cineríticos, domos volcánicos y derrames de lava, asociados con materiales piroclásticos. (Tapia y López, 2001).

Gracias a este vulcanismo intenso, la cuenca de México se cierra, conformando una serie de lagos someros como Texcoco, Chalco, Tecocomulco.

IV.3 Delimitación del área de estudio

Dentro del valle de Teotihuacan, se estudiaron 3 sitios.

- i. Una casa habitacional azteca localizada en la porción noreste del valle, en el cerro San Lucas (Fig. 3).
- ii. Un perfil de suelos en el centro del Valle denominado Río San Pablo.
- iii. Un sitio dentro de la pirámide de la Luna, en la zona arqueológica de Teotihuacan.

La casa azteca, se ubica en las siguientes coordenadas: 19° 42' 55.8" (latitud norte) y 98°42'28" (longitud oeste).

Para su descripción detallada dentro de la investigación arqueológica se trazó una cuadrícula de 83 x 40 m dividida en cuadros de 1 x 1 m (Fig. 4). Se trata de una casa delimitada en sus cuatro lados con cuatro muros (Pérez, 2006). De acuerdo con los datos preliminares obtenidos durante el reconocimiento de superficie, la casa Azteca corresponde al periodo de ocupación azteca durante los periodos Azteca tardío y colonial temprano.

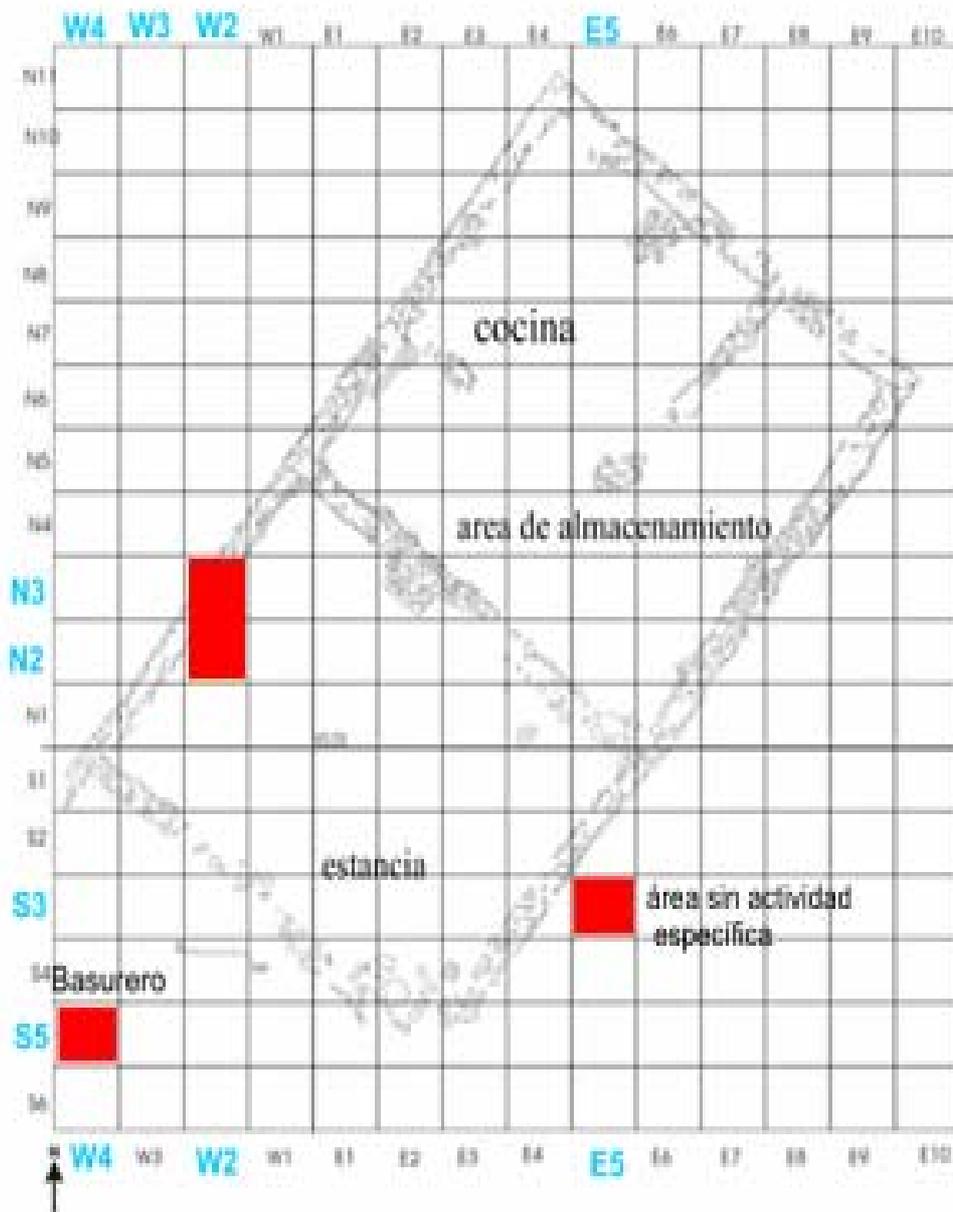


Fig. 4. Retícula que muestra los tres perfiles en color dentro de la casa Azteca, con cuadros se han marcado los sitios muestreados para el análisis de P. (Pérez, 2006).

El material cerámico recolectado en superficie indica claramente su carácter doméstico, predominando cajetes, ollas, jarras y cómales; manos de metate y fragmentos de cuerpos de metates que se asocian más a actividades de molienda al interior del hogar (Fig. 5). Es importante resaltar la presencia de

fragmentos de tiestos, unos con restos de cal adheridos ya sea al interior, exterior o en ambos lados (Pérez, 2006)



Fig. 5 Restos de cerámicas encontrados en la excavación.

IV.4 Etapa de campo

IV.4.1 Descripción de los perfiles

En esta etapa se hizo un recorrido en la zona de Teotihuacan y sus alrededores, la descripción se hizo con base al Manual No. 18 USDA (Soil Survey Division Staff, 1993).

Se describió un perfil, que se tomo como testigo (Fig. 6), ya que representa un suelo fuera de la casa que aparentemente no sufrió impacto humano,

La descripción de los perfiles y delimitación de los horizontes genéticos, se realizó con base a la WRB (1998), en el sistema ABC, el cual es utilizado para elaborar descripciones de suelo en campo.

<p>Figura. 6 Perfil 1. Testigo ubicado en la terraza superior en 19°42'42.8'' latitud norte, 98°42'6.9'' longitud oeste, con una elevación de 2491 msnm, 150 cm de profundidad.</p>	<p>Descripción</p>
	<p>Horizonte A (0-5 cm) muy poco desarrollado, con estructura granular, poroso y presenta una alta densidad de raíces muy finas y medias. El límite inferior es ondulado, su color es gris pardo.</p> <p>Horizonte AB (5-21 cm de profundidad), tiene mayor estructura, con bloques subangulares (8 cm) que se fracturan en bloques subangulares pequeños, la cantidad de raíces disminuye así como la porosidad, pues muestra mayor compactación.</p> <p>Horizonte BC (21-43 cm de profundidad) estructura de bloques angulares grandes, hasta de 6 cm. Su color es pardo claro y aumenta la pedregosidad, es muy poroso y muestra rasgos de edafogénesis.</p> <p>Horizonte C1 (43-150 cm de profundidad) material parental, que consiste en ceniza volcánica retrabajada de color amarillo claro.</p>

Dentro de la casa se estudiaron 2 perfiles y un suelo sepultado (Fig. 4), uno en el cuadrante W4-S5 (Fig. 7) en una zona denominada como basurero; otro en el cuadrante E5-S3, (Fig. 8), en un área sin actividad específica reconocida y el tercero en el cuadro W2-N4-N3 (Fig. 9) dentro de la estancia. Así mismo de análisis un perfil de suelo fuera de la casa para evaluar las diferencias de fósforo con respecto a un sitio natural no perturbado (Fig. 6). En total se colectaron 5 muestras del suelo no perturbado y 9 de la casa.

Figura. 7. Perfil 2 Cuadro W4-S5 sur	Descripción
	<p>Horizonte Ap (0-5/12cm de profundidad), suelo arcillo arenosa, suelta, porosa, abundante en raíces; presenta una estructura en bloques subangulares pequeños y granulados.</p> <p>Horizonte A₁ (5-12/31cm de profundidad), suelo de textura arcillo arenosa, con bloques más grandes, angulares y subangulares. Pedregoso (30-40% de rocas)</p> <p>Horizonte A₂, suelo de textura limo arcillosa, con estructura poco desarrollada, en bloques subangulares. Rico en material limoso y abundante material antropico.</p> <p>Tepetate degradado, color café pardo, de estructura prismática, de consistencia dura que se fractura en pequeños prismas subangulares.</p>

<p>Figura. 8. Perfil 3. Dentro de la excavación. Cuadro E5-S3 pared este</p>	<p>Descripción</p>
	<p>Horizonte Ap (0-15 cm de profundidad), suelo de textura arcillo arenosa, estructura angular y subangular, color gris. Presenta carbonatos de calcio.</p> <p>Horizonte A (de 15-37 cm de profundidad), suelo de textura arcillo arenosa con estructura mas desarrollada, de bloques angulares más estables de superficie más rugosa. Los bloques son de tamaño medio que se facturan en pequeños gránulos y presenta carbonato de calcio.</p> <p>Horizonte AB (37-42/62 cm de profundidad), suelo de textura arcillo arenosa, de color mas claro (pardo grisáceo). Su estructura de bloques angulosos y gruesos que al fracturarse no producen gránulos. Presenta carbonatos de calcio en los canales de las raíces.</p> <p>Tepetate degradado, color café pardo, de estructura prismática, de consistencia dura que se fractura en pequeños prismas subangulares.</p>

<p>Figura. 9. Perfil 4 Cuadro W2-N4-N3. Área sin actividad especifica</p>	<p>Descripción</p>
	<p>Horizonte A debajo de un muro, color pardo oscuro estructura en bloques subangulares maduros, muy firme, textura arenosa se observan películas de humus en raíces.</p>

En el sitio denominado Río San Pablo que se encuentra en las coordenadas N 19°42'30.9" W 98° 49'15.2" a una altitud de 2317 m (Fig. 10). En este lugar se reconocieron 5 niveles de suelos; el suelo moderno en la superficie y 4 paleosuelos sepultados. Los horizontes reconocidos son Ap/C/2A/2AC/2C/3A/3C/4A/4AC/5A. El horizonte 4A se fechó en 2140 años A.P. (Loujeneva, *et al.*, 2007) y corresponde al periodo de ocupación teotihuacana.

Fig. 10. Perfil 5. San Pablo	Descripción
	<p>Horizonte Ap, muy antropizado, material granular y poroso.</p> <p>Horizonte. C, sedimento</p> <p>Horizonte. 2A, granular con raíces, color oscuro.</p> <p>Horizonte. 2AC, sedimento aluvial, arenoso.</p> <p>Horizonte. 2C, laminado, granulado, hay sedimentos laminares mas finos, no estructurado.</p> <p>Horizonte. 3A, muy poco desarrollado.</p> <p>Horizonte. 3C, laminado arenoso sin estructura.</p> <p>Horizonte. 4A, con estructura granular muy bien desarrollado, alta porosidad, gris, compactado, biocanales.</p> <p>Horizonte. 4AC, color gris claro, estructura en bloques color oscuro, presencia de materia orgánica.</p> <p>Horizonte 5A, bien desarrollado, estructura en bloques, color oscuro, presencia de materia orgánica.</p>

Por otro lado, en 2004, gracias a la apertura de túneles en el interior de la pirámide de la luna, el grupo de paleosuelos tomó muestras de material edáfico que rellena las paredes (Fig. 11).

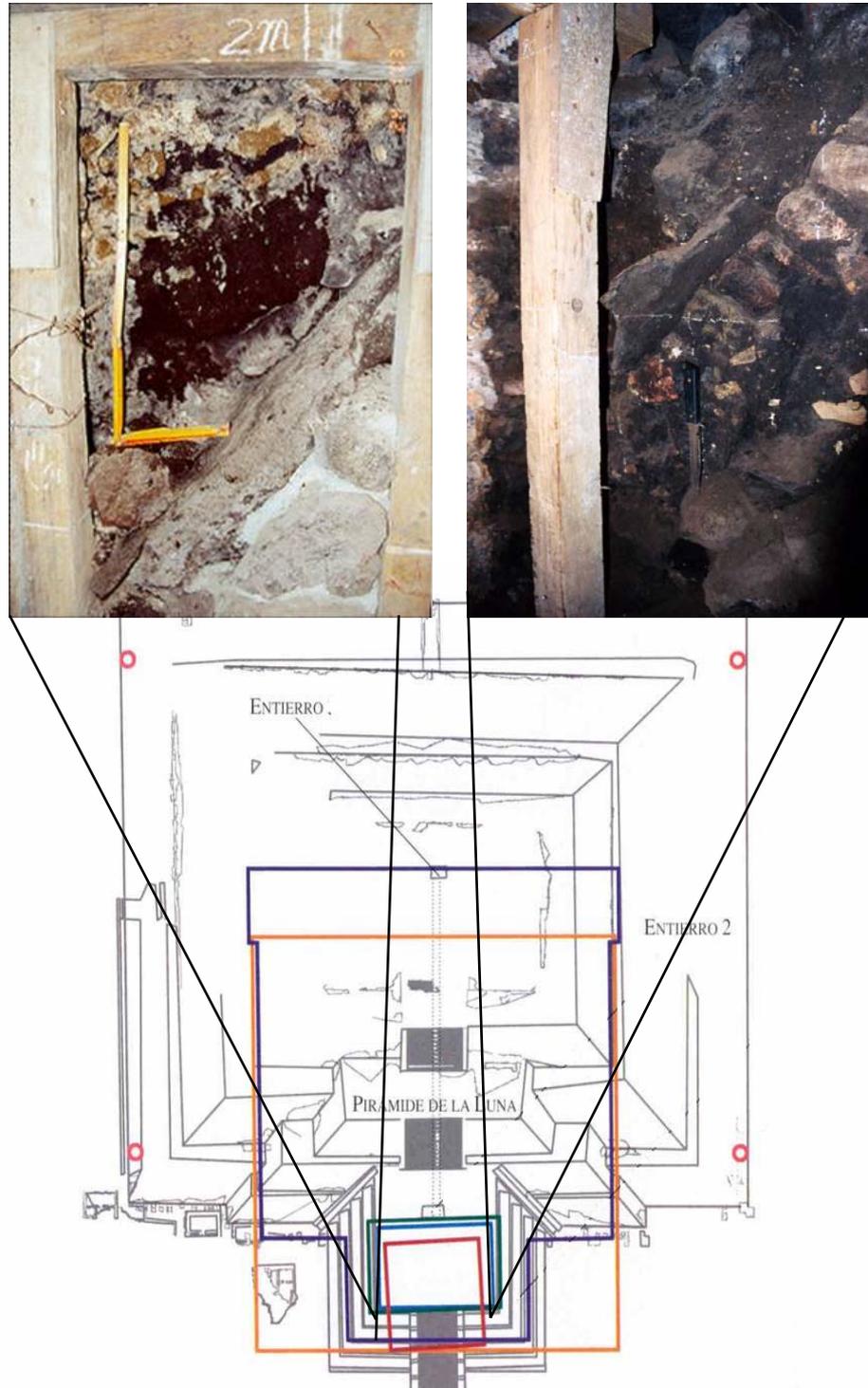


Figura. 11. Esquema de la pirámide de la Luna mostrando los diferentes edificios, construidos progresivamente, del 1 al 7, y los rellenos del edificio 1, 2 y 4.

IV.4.1 Muestreo

Una vez delimitados los horizontes, se comenzó el muestreo iniciando en el más profundo y ascendiendo gradualmente al más superficial. Se coloca una pala en el límite del horizonte de interés, y auxiliándose de una cuña o navaja, se colecta el suelo en la pala (no es una muestra compuesta, sin embargo, debe de ser homogénea y contener todas las variaciones observables en el horizonte). Son necesarios de 1 a 2 kg de muestra por cada horizonte, etiquetando con los datos de campo y fueron trasladadas al Laboratorio Química III en el instituto de Geología de la UNAM.

IV.5 Etapa de laboratorio

Una vez que fueron tomadas y etiquetadas las muestras fueron secadas a temperatura ambiente. En caso de ser necesario, las muestras tamaño bloque, fueron fragmentadas con martillo y cincel, teniendo precaución de no llegar a pulverizar el material. Dado que la fracción menor a 2 mm es la activa, se tamizó para separar los materiales de mayor tamaño como las gravas.

Para el análisis de P total, las muestras fueron molidas (con ayuda de un mortero de ágata) y secadas en el horno a 110°C durante 2 h.

IV.5.1 Análisis de fósforo disponible.

Este procedimiento se llevó a cabo de acuerdo a las técnicas estandarizadas en el laboratorio de Edafología Ambiental ubicado en el Instituto de Geología de la UNAM a cargo de la M. en C. Kumiko Shimada Miyasaka, tomando 3 técnicas diferentes de determinación de P disponible.

1. Determinación de fósforo disponible (método de Bray-Kurtz).

2. Determinación de fósforo disponible (método de Mehlich – 2)
3. Determinación de fósforo disponible, método de fósforo soluble en ácido cítrico. (Anexo)

IV.5.2 Análisis de P total.

Para este análisis se seleccionaron solamente las muestras más representativas de este trabajo con el fin de comparar los resultados obtenidos.

Este procedimiento se llevó a cabo en el laboratorio de Fluorescencia de rayos X (FRX) ubicado en el Instituto de Geología de la UNAM.

Procedimiento: la muestra molida es secada en la estufa a 110° C durante 2 h. se pesan 0.5 g de muestra y se funden con 10 g metaborato de litio y tetraborato de litio en relación 1:1, para obtener una perla la cual es analizada en un sistema secuencial de FRX Siemens SRS 3000, previamente calibrado con estándares internacionales. La pérdida por calcinación (P x C) se determina pesando 1 g de muestra y calcinando a 950°C por una hora.

IV.6 Trabajo de gabinete

Se hicieron validaciones estadísticas para establecer la correlación entre los métodos así como medir la significancia estadística, por medio de una prueba τ (student). Esto se hizo con el paquete estadístico SPSS versión 13.0 para Windows.

CAPITULO V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las muestras consideradas en este trabajo, fueron procedentes de los diferentes sitios: casa azteca, San Pablo y Pirámide de la Luna.

V.1 Fósforo disponible en la casa Azteca

Se puede apreciar que la cantidad de este elemento extractada con estos diferentes métodos, vario considerablemente, prácticamente duplicándose los valores en cada técnica de extracción (Fig. 12). Este comportamiento es explicable por la naturaleza química de las soluciones extractantes empleadas en su determinación, detalladas claramente en el Anexo. La mayor eficiencia la mostró la técnica Mehlich II por que utiliza en su solución extractora dos ácidos fuertes estas soluciones acidas usadas para extraer P generalmente tienen un pH de 2 a 3, esto provee suficientes iones H^+ activos para disolver fosfatos de calcio (Ca-P). La solución acida también puede solubilizar algo de fosfato de hierro (Fe-P) y aluminio (AL-P). El orden es en el grado de solubilidad en soluciones acidas es $Ca-P > Al-P > Fe-P$. Además el P adsorbido sobre superficies de $CaCO_3$ y ácidos hidratantes Fe y Al, pueden ser remplazados por otros iones tales como acetato, sulfato proporcionados por el ác. Sulfúrico y ác. Acético. Los aniones orgánicos o iones sulfato presentes en la soluciones acidas reducen la readsorción del P. Los iones fluoruro son muy efectivos en acomplejar iones Al y de esta forma liberar P ligados a los fosfatos de Al, además de este efecto, el calcio es precipitado por iones fluoruro por lo que el P presente en el suelo como fosfato de calcio puede ser extraído por esta soluciones.

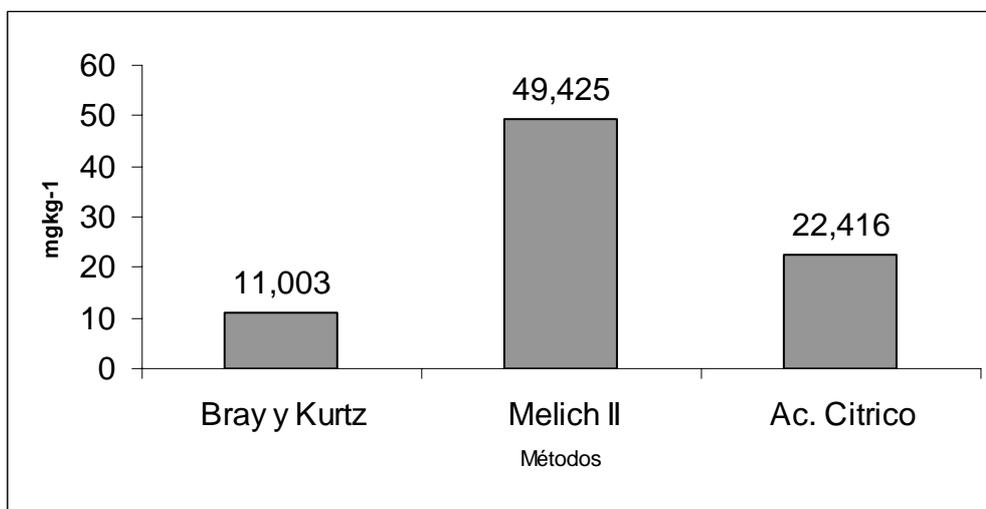


Fig. 12. Concentraciones promedio de P disponible con los 3 métodos probados

A pesar de lo anterior en la Fig. 13 se aprecia que la tendencia de los 3 conjuntos de datos obtenidos por las técnicas empleadas es similar, en cada una de ellas los picos de las concentraciones prácticamente coinciden.

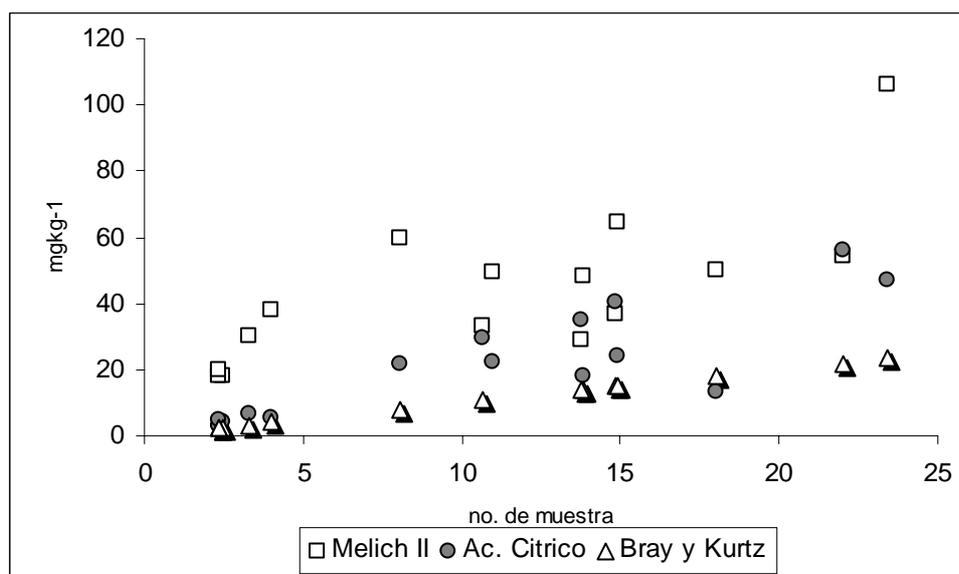


Fig. 13. Tendencia de las concentraciones de P disponible, extraído con las 3 técnicas utilizadas.

Del análisis se puede determinar que los valores más bajos de P en todas las técnicas se encontraron en el testigo, es decir en el perfil de suelo fuera de la casa azteca (Cuadro 1).

El pico de la concentración más elevada que se encontró de fósforo disponible se obtuvo con la técnica de Mehlich II con un valor de 105.93 mgkg^{-1} para el horizonte Ap (0-5/12cm de profundidad), del cuadro W4-S5 (basurero) y la más baja con la técnica de Bray y Kurtz con un valor de 2.33 mgkg^{-1} del Horizonte BC (21-43 cm de profundidad) del perfil testigo.

A pesar de que la diferencia entre las concentraciones es relativamente grande en las 3 técnicas empleadas (Bray Kurtz, Ac. Cítrico y Mehlich II), el valor de la concentración de P del perfil testigo es menor que las encontradas en los paleosuelos de la unidad habitacional (Fig. 12), en todos los casos.

Método	Promedio
----- mg kg ⁻¹ P -----	
<u>Testigo suelo fuera de la casa</u>	
Bray Kurtz	2,893
Ac. Citrico	4,787
Mehlich II	24,881
<u>Cuadro E5-S3 este no especifico</u>	
Bray Kurtz	15,026
Ac. Citrico	35,904
Mehlich II	40,318
<u>Cuadro W4-S5 sur basurero</u>	
Bray Kurtz	18,802
Ac. Citrico	28,191
Mehlich II	73,407
<u>W2-N2-N3 estancia</u>	
Bray Kurtz	8,039
Ac. Citrico	21,542
Mehlich II	59,935

Cuadro 1. Concentraciones promedio de P obtenidas de los perfiles dentro de la casa Azteca y el perfil testigo.

La mayor concentración encontrada en promedio para las 2 técnicas Mehlich II (73.4 mgkg⁻¹) y Bray y Kurtz (18.8 mgkg⁻¹), dentro de la unidad habitacional es la que corresponde al cuadro W4-S5 sur marcada en la Fig. 14

con un color más oscuro, donde, debido a los restos encontrados se presume era un área utilizada como basurero. A diferencia de la técnica con Àc. Cítrico arroja la mayor concentración en el cuadro E5-S3 cercano a la estancia con valor 35.9 mgkg^{-1} (Tabla 2),

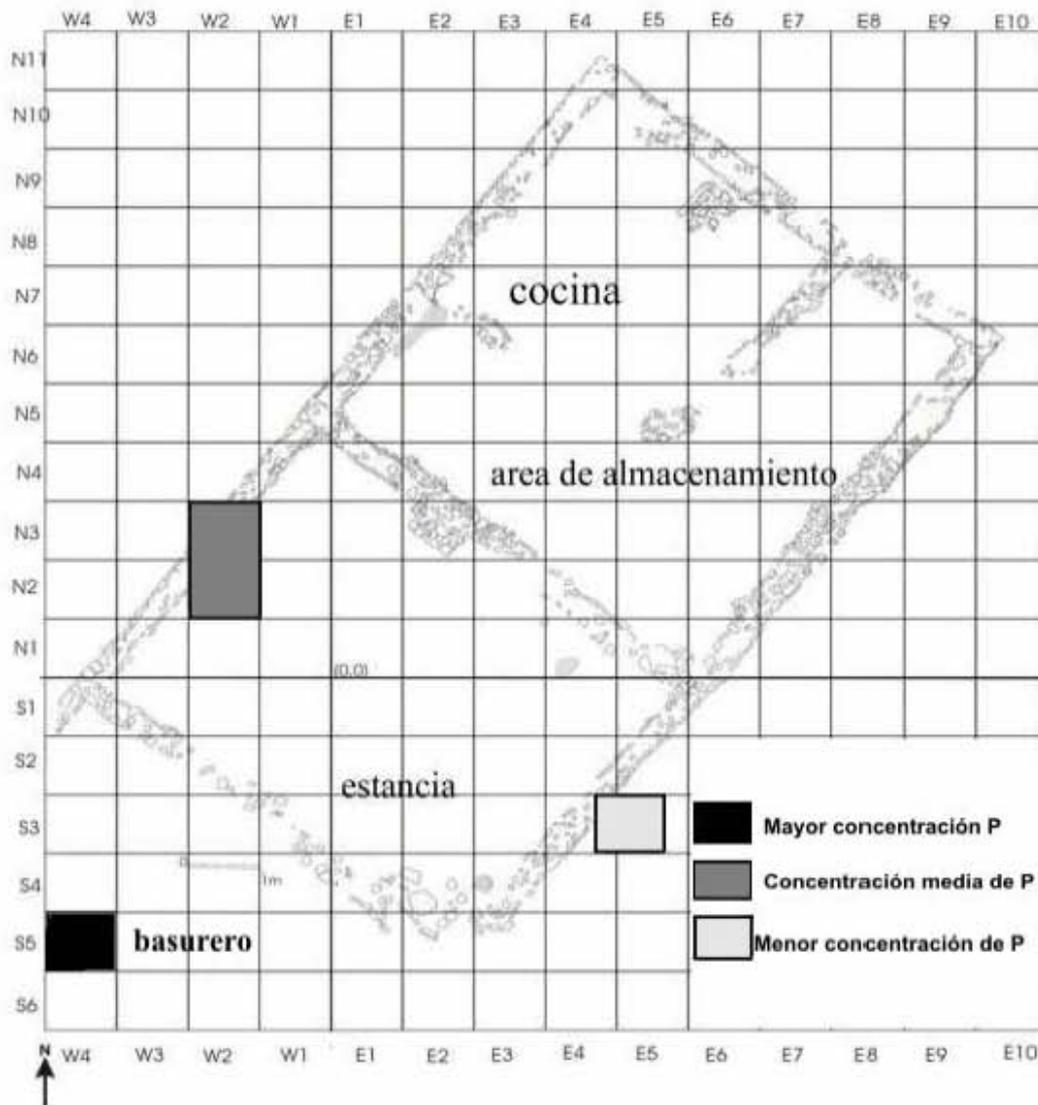


Fig. 14. Los cuadros más oscuros representan la mayor concentración de P disponible (mgkg^{-1}) en la estructura.

La concentración del basurero determinada con Bray y Kurtz, es 2.3 veces mayor, con un valor de 18.8 mgkg^{-1} en promedio, que la estancia (8.03

mgkg⁻¹), 1.2 veces mayor que el cuadro al área no específica, y 6.4 veces mayor al nivel natural obtenido del perfil testigo (Fig. 14).

Para Mehlich II la concentración del basurero cuadro W4-S5 (73.4 mgkg⁻¹) en promedio es 1.2 y 2 veces mayor que los cuadros W2-N2-N3 (59.93 mgkg⁻¹) y E5-S3 (40.31 mgkg⁻¹) respectivamente. Comparándolo con los niveles naturales en el suelo es 3 veces mayor con un valor de 73.4 mgkg⁻¹ y 24.88 mgkg⁻¹ para el testigo (Fig. 14).

Respecto a la técnica del ácido cítrico el valor más alto de P que corresponde al área no específica (35.9 mgkg⁻¹) no difiere mucho al del basurero cuadro W4-S5 (28.19 mgkg⁻¹). Sin embargo el valor más alto obtenido con esta técnica es 7 veces mayor que la concentración del perfil tomado como testigo con valor de 4.7 mgkg⁻¹ (Fig. 14).

V.2 Fósforo disponible en Río San Pablo.

En las figuras 15 y 16 se observan las concentraciones de P por el método de Mehlich y ácido cítrico respectivamente en ambos la mayor concentración se extrajo el horizonte 4 AC, el cual fue fechado por Lounejeva *et al.* 2007 y la edad obtenida con C¹⁴ fue de 2140 años A.P. los que coinciden con el periodo de ocupación Teotihuacana en el valle.

La cantidad de P extraído por el método de Mehlich II (106.83 mgkg⁻¹) en el horizonte 4AC es 2.2 veces mayor que los niveles naturales de P (24.88 mgkg⁻¹). La extracción por ácido cítrico fue 9.1 veces mayor con un valor de

43.88 mgkg⁻¹ que el valor obtenido en el perfil testigo (4.78 mgkg⁻¹) (Figs. 14 y 15).

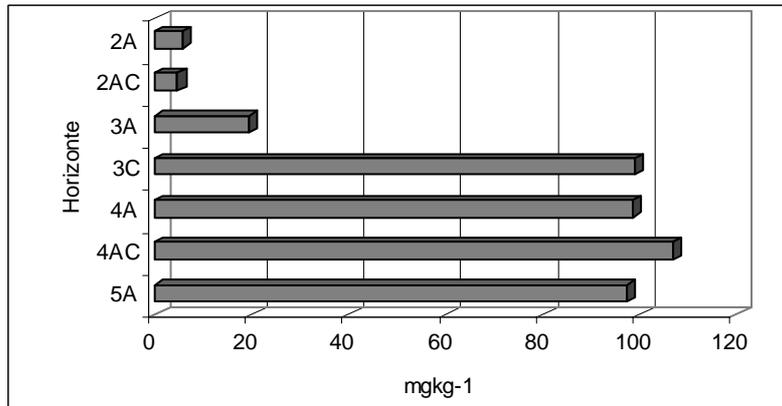


Fig. 15. P-disponible por el método de Mehlich II en el perfil San Pablo.

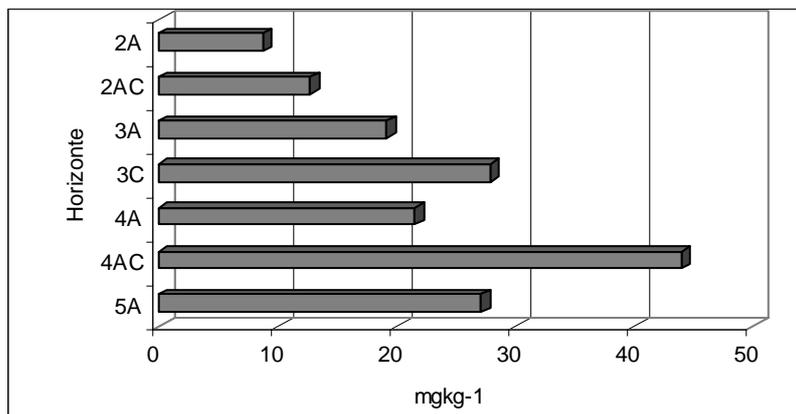


Fig. 16. P-disponible por el método de ácido cítrico en el perfil San Pablo.

V.3 Fósforo disponible en la Pirámide de la Luna.

La mayor concentración de P encontrada en este trabajo fue la que se obtuvo en las muestras extraídas en la pirámide de la Luna (Cuadro 2), donde el valor más alto (246,6252 mgkg⁻¹), es 10 veces mayor que la concentración natural de P.

Muestra	mgkg ⁻¹
Piso	200,701
Piso micromuro	246,625
Adobes de muro	193,655
Relleno	160,124

Cuadro 2. Concentración de P-disponible en la pirámide de la Luna.

V.4 Fósforo total

Los valores de P total, como podemos observar en cuadro 3 son mucho más altos que los de P disponible sobre todo comparado con el método de Bray-Kurtz que es casi 200 veces mayor, para la extracción con ácido cítrico es 82 veces mayor, y el método de Mehlich mostró la menor diferencia siendo solo 33 veces menor que los valores de P-total. Al respecto Terry, *et al.*, (2002) mencionan que el método de P-total extrajo 100 veces más que el P extraído por el procedimiento de Mehlich-2, porque el método disuelve todo el P. Los valores del método de Mehlich no podían ser comparados con la extracción de P-total. Sin embargo, ambas fracciones (Mehlich) refleja mejor las alteraciones antropogénicas del suelo que el P-total.

Perfil	P-total (FRX)	Bray-kurtz	Mehlich	Àc cítrico
		mgkg ⁻¹		
San Lucas (testigo)	1460	3,272	30,373	6,383
Cuadro E5-S3 este, no especifico	2000	21,997	54,185	55,851
W4 S5 basurero	1970	23,428	105,940	47,074
W2-N2-N3 estancia	1350	8,039	59,935	21,543
San Pablo	800		19,519	19,149

Cuadro 3. Concentración de P-total de los sitios seleccionados.

V.5 Similitud entre métodos

Como se ha mencionado, los tres métodos arrojan diferentes valores, aunque las tendencias son las mismas.

Esto es más obvio al correlacionar Bray y ácido cítrico, pues se tiene un coeficiente de correlación de 0.856 (Cuadro 4). Bray y Mehlich también tienen una correlación alta (0.6411) pero Mehlich y ácido cítrico muestran la menor correlación (0.5724).

En las graficas de la Figura 17 podemos distinguir las diferencias entre los lotes de datos de extracción de P disponible pudiéndose observar que en todas las comparaciones la técnica de Mehlich es mayor la cantidad de P extraído. Donde la diferencia mayor de las medianas se encuentra entre los métodos de Bray-kurtz y Mehlich-II.

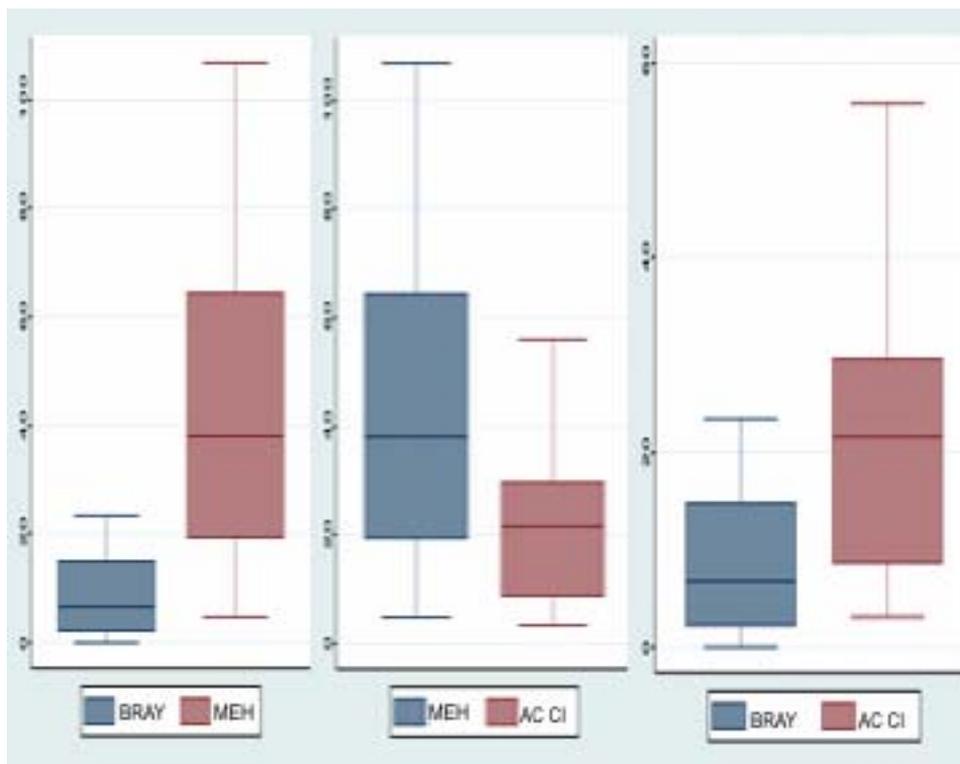


Figura 17. Diagrama de caja para los valores de P-disponible.

De acuerdo a la prueba estadística, t se observa (Cuadro 4), que las diferencias entre las medias si son significativas, ya que no hay similitud entre las medias, con una probabilidad < 0.005 .

Pares		Correlación	Valor de t
1	Bray		
	Mehlich	0.6411	-5.6165
2	Mehlich		
	Ácido cítrico	0.5724	4.4064
3	Bray		
	Ácido cítrico	0.856	-4.7920

Cuadro 4. Análisis estadístico de los resultados de P.

Estas diferencias se deben al tipo de extractantes en cada método, como se explico al inicio de este capitulo, el ataque químico es distinto en cada metodo. En el caso de ácido cítrico, a pesar de que es un ácido más débil fue más sensible a las variaciones de P por actividad humana.

Por lo tanto, las diferencias encontradas en los métodos, están relacionadas con el tipo de ataque químico que se practica, siendo Mehlich el más efectivo, además el tiempo en que se realiza la agitación contribuye a que el método sea más eficiente.

V.6 Prueba de Eidt

La determinación de fósforo en el contexto arqueológico es poco utilizada en México, en los lugares que se emplea además se utiliza una prueba desarrollada por Eidt (1985), en la que la cantidad de fosfatos contenidos en la muestra se relaciona con la intensidad del color azul que aparece en la superficie del papel filtro. Cuando el color ha quedado fijo en el papel seco, se clasifica a juicio personal y se le asigna un valor en la escala de 1 a 5, como se observa en la Tabla 5.

Valor	Intensidad	Extensión nm	Tiempo min	Circularidad %
1	Ninguna	0	0	0
2	Claro	≤ 1	2	≤ 50
3	Menos claro	2	1-2	50
4	Oscuro	3.5	0.5-1	75
5	Muy oscuro	8	0.5	100

Cuado 5. Clasificación de resultados, Eidt (1985).

Si se comparan los resultados aquí presentados con los obtenidos por los arqueólogos en la casa azteca, que emplean este estudio (Fig. 16), es claro que los métodos analíticas empleados en este estudio son realmente mas útiles.

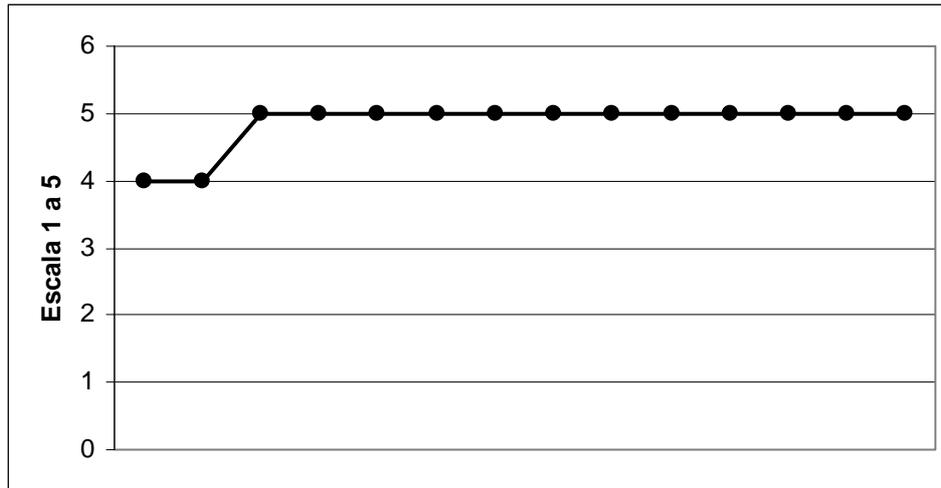


Fig. 18. Resultados de la prueba de Eidt (Pérez 2006).

En la Fig. 18 se muestran los resultados de la prueba (Pérez 2006) y no hay ninguna variación en la casa azteca pues en todos los casos alcanzaron el mayor valor.

V.7 Fósforo e impacto humano.

De acuerdo a los resultados obtenidos se observa que dentro de la casa azteca el valor más alto de P corresponde a la zona del basurero, siendo hasta 3 veces más alto que el suelo fuera del área perturbada. Estas concentraciones altas se deben a la acumulación de materiales durante el periodo de ocupación: desechos de alimentos, estiércol de animales, así como productos orgánicos empleados en la producción de cerámica.

Por lo que respecta al perfil de San Pablo, el valor más alto de P se encontró en el suelo sepultado, cuya edad obtenida por el método de C^{14} , es de 2140 años A.P. (Lounejeva *et al.* 2007) que coincide con el tiempo de poblamiento Teotihuacano. Al parecer, las actividades durante este periodo si

produjeron un impacto fuerte en el suelo, quizá como resultado de la agricultura, alfarería, etc.

Al respecto Bethel y Ma'te', (1989) señalan que las actividades antrópicas producen una acumulación de P, el cual está contenido en múltiples materiales orgánicos. En este caso, los resultados si permiten detectar la influencia humana en el ecosistema y coinciden con lo encontrado por otros autores (por ejemplo Hollidey, 2006).

Si se comparan los valores de P en San Pablo con los encontrados en la pirámide de la Luna, estos se duplican (106.86 y 200.27 mgkg⁻¹, respectivamente). Esto lleva a suponer que los Teotihuacanos usaron el suelo del entorno para rellenar los muros de la pirámide, Pérez (2006) encontró grandes depresiones en los alrededores del Valle de donde supuestamente los Teotihuacanos extraían suelo. Y ese suelo es precisamente el de 2140 años. La diferencia entre los valores se debe a que el suelo en el interior de la pirámide no estuvo expuesto al intemperismo y a pérdidas naturales de P.

De lo anterior queda claro que este análisis de P es sensible al impacto humano y puede usarse en sitios arqueológicos.

Se recomienda utilizar el método de Mehlich por que extrae mayor cantidad de P, muestra picos de concentración bien definidos, como en el basurero siendo el mayor valor determinado dentro de la casa Azteca (105.93 mgkg⁻¹), además comparándolo, con el método del ácido cítrico que también arroja buenos resultados, Mehlich es mas rápido con solo unas horas para la

conclusión del experimento, mientras que con ácido cítrico se requieren 2 días de trabajo y gran cantidad de material de laboratorio.

El uso del análisis químico de fósforo disponible en estos sitios arqueológicos contribuirá a realizar una interpretación más cuantitativa de los resultados obtenidos.

CAPITULO VI. CONCLUSIONES

1. Los métodos de prueba Bray-Kurtz, Mehlich II, y Acido Cítrico producen diferencias significativas. Específicamente el método Mehlich II produce promedios de extracción de Fósforo más altos que los demás.
2. Los métodos de extracción de fósforo disponible muestran buena sensibilidad a la acumulación de este elemento por acción antrópica, además de ser sencillos y económicos así mismo poco tiempo arroja resultados a diferencia del P total.
3. Los datos que se obtuvieron en el curso de este estudio indican el fósforo disponible es más revelador que el fósforo total.
4. Los niveles de P fueron más altos en los sitios arqueológicos que los niveles naturales de P, analizados en este estudio.
5. Los valores mas altos de P fueron encontrados en el basurero de la casa azteca debido a la acumulación de materiales durante el periodo de ocupación: desechos de alimentos, estiércol de animales, así como productos orgánicos empleados en la producción de cerámica y rellenos de la pirámide de la Luna que no estuvieron expuestos a intemperismo.
6. El método recomendado para futuros estudios es el de Mehlich II.

7. Las actividades durante este periodo si produjeron un impacto fuerte en el suelo, quizá como resultado de la agricultura, alfarería, etc.

LITERATURA CITADA

- Anzastiga A. P. (1984). Correlación y calibración de métodos químicos para la determinación de fósforo disponible en suelos del estado de Puebla. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Barba L. Bello G. (1978). Análisis de fosfatos en el piso de una casa habitada actualmente. *Notas antropológicas* 1: 188-193.
- Barba L., Ortiz A. (1992). Análisis químico de pisos de ocupación: un caso etnográfico en Tlaxcala, México. *Latin America Antiquity* 3: 38-82.
- Baker R.T. (1976) Changes in the chemical nature of soil phosphate during pedogenesis. *Journal of soil science*, 27: 504-512.
- Bethell P., Ma'te' I. (1989) The use of soil phosphate analysis in archaeology: a critique, in: J. Henderson (Ed.), *Scientific Analysis in Archaeology and its Interpretation*, U.C.L.A. Institute of Archaeology, Los Angeles, (*Archaeological Research Tools* 5). pp. 1e29
- Bronger , A. y Catt, J.A. (1989). Paleosols: Problems of definition, recognition and interpretation. In Bronger and Catt, J.A. (Eds.) *Paleopedology: Nature and application of paleosols*. *Catena Supplement* 16, pp. 1-8.
- Cabadas H. V. (2004). Paleosuelos como indicadores de cambio ambiental en el cuaternario superior: el caso del valle de Teotihuacan. Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería UNAM .
- Cade-Menun B.J., Berch S.M., Preston C.M, Lavkulich L.M., (2000) Phosphorus forms and related soil chemistry of podzolic soils on northern Vancouver Island. II. The effects of clear-cutting and burning, *Canadian Journal of Forest Research* 30 1726e1741.

- Carr C., (1982). Handbook on Soil Resistivity Surveying: Interpretation of Data from Earthen Archaeological Sites, Center for American Archaeology Press, Evanston, IL.
- Council on Soil Testing and Plant Análisis, (1974).
- Cook S.F., Heizer R.F., (1965). Studies on the Chemical Analysis of Archaeological Sites, in: University of California Publications in Anthropology 2, University of California Press, Berkeley,
- de Cserna, Z., de la Fuente-Duch, M., Palacios-Nieto, M., Triay, L., Mitre-Salazar, L.M., Mota-Palomino, R., (1988), Estructura geológica, gravimétrica, sismicidad y relaciones geotectónicas regionales de la Cuenca de México: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín 104, 71 p., 4 mapas.
- Eidt, R.C. (1985) Theoretical and practical considerations in the analysis of anthrosols, in: G. Rapp, J.A. Gifford (Eds.), Archaeological Geology, Yale University Press, New Haven, CT, , pp. 155 e190.
- Eidt R.C., (1984) Advances in Abandoned Settlement Analysis: Application to Prehistoric Anthrosols in Columbia, South America, University of Wisconsin-Milwaukee, Center for Latin America, Milwaukee.
- Eidt R.C., (1977) Detection and examination of anthrosols by phosphate analysis, Science 197 1327e1333.
- Entwistle J.A, Abrahams P.W., Dodgshon R.A., (2000). The geoarchaeological significance and spatial variability of a range of physical and chemical soil properties from a former habitation site, Isle of Skye, Journal of Archaeological Science 27: 287e303.
- Etchevers, J. D., Bautista M. A. y Vergara. M. A. (2000). Calidad del suelo, indicadores de calidad y captura de carbono. La Edafología y sus

perspectivas al siglo XXI. Tomo II. Colegio de Postgraduados, UNAM, UACH. México. Pp.507-520.

- Fanning D.S. y Fanning M.C.B., (1989). Soil morphology, genesis and classification. John Wiley and Sons 395 pp.
- Fassbender H. W. (1987). Química de suelos. Instituto latinoamericano de cooperación para la agricultura. Costa Rica. 419 pp.
- García, E., (1988), Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen, para adaptarlo a las condiciones climáticas de la república Mexicana: México, García de Miranda, 217 p.
- Glaser, B. W.I. Woods Amazonian Dark Earths: Explorations in Time and Space, (Eds.), Springer, Berlin, Germany, pp. 113-123.
- Goldberg Paul, (2006), Practical and Theoretical Geoarchaeology, Blackwell Publishing, Boston. pp 442
- Guillén-Guerrero, M.A., (1996), Geomorfología de la vertiente occidental del Volcán Iztaccíhuatl: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Filosofía y Letras, Colegio de Geografía, Tesis profesional, 180 p.
- Hamond F.W., (1983). Phosphate analysis of archaeology sediments, in: T. Reeves-Smyth, F. Hamond (Eds.), Landscape Archaeology in Ireland, BAR British Series 116, , pp. 47-80 (Oxford, UK).
- Hedley M.J., Stewart J.W.B., Chauhan B.S., (1982) Changes in inorganic and organic phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations, Soil Science Society of America Journal 46 970-976.
- Herz N., Garrison E.G, (1998) Geological Methods for Archaeology, Oxford University Press, New York,

- Holliday V T., (2006), Methods of soil P analysis in archaeology, Archaeological Science, Vol. 34 pp. 301-333.
- Iyamuremye F., Dick R.P., (1996) Organic amendments and phosphorus sorption by soils, Advances in Agronomy 56 139-185.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1983, Carta geológica, Ciudad de México E14-2, Escala 1: 250,000: México, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, 1 mapa.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), (1990), XI censo general de población y vivienda. Síntesis de resultados. Estado de México: México, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, 228 p.
- Kamprath E.J. y Watson M.E. (1980) The Role of Phosphorus in Agriculture, Soil Science Society of America, Madison, WI, , pp. 433e469.
- Lab. For Soil And Crop Testing, Oostrbeek, 1979.
- Lehmann J., Campos C.V., Vasconcelos J.L. de Maceˆdo, German L., (2004) Sequential P fractionation of relict anthropogenic Dark Earths of Amazonia, in:
- Lounejeva B. E., Morales P. P., Cienfuegos A. E., Sedov S., y Solleiro R. E. (2007). Late Quaternary Environment in the Teotihuacan Valley, México, Inferred from d13C in Soils. Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México. SAS Bulletin. 30: 6-11.
- Mc Clung de Tapia, Solleiro R. E., Gama C. J. E., Villalpando J. L., Sedov S. (2003). Paleosol in the Teotihuacan Valley, Mexico: evidence for paleoenviromet and human impact. Revista Mexicana de Ciencias Geologicas. 20 2-70.

- Manzanilla L. (1996). corporate groups and domestic activities in Teotihuacán. *Latin American Antiquity* 7: 228-246.
- Manzanilla L., Barba, L. (1990). The study of activities in Classic households: two cases studies from Coba and Teotihuacán. *Ancient Mesoamerica* 1: 41-49.
- Mehlich A., (1984) Mehlich 3 soil test extractant: a modification of Mehlich 2 extractant, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 15, 1409-1416.
- Miller N.F., Gleason K.L., (1994) Fertilizer in the identification and analysis of cultivated soil, in: N.F. Miller, K.L. Gleason (Eds.), *The Archaeology of Garden and Field*, University of Pennsylvania Press, Philadelphia, , pp. 25e43.
- Mooser, F., 1975, *Historia geológica de la Cuenca de México*, in *Memorias de las obras del sistema de drenaje profundo del Distrito Federal: México*, Departamento del Distrito Federal, 1, 9-30.
- Nettleton W.D., Olson C.G., Wysocki D.A. (2000) Paleosol classification: Problems and solutions. USDA, NRCS, NSSC, 100 Centennial Mall North, Lincoln, NE 68508, USA *Catena* 41: 61–92
- Ottaway J.H., (1984) Persistence of organic phosphate in buried soils, *Nature* 307 257e259.
- Pérez, J., (2006). Informe de la primera y segunda etapa de investigación del proyecto *Agricultura en terraza en el cerro San Lucas, Valle de Teotihuacan*.

- Proudfoot B., (1976). The analysis and interpretation of soil phosphorus in archaeological contexts, in: D.A. Davidson, M.L. Shackley (Eds.), *Geoarchaeology*, Westview Press, Boulder, CO, pp. 93e113.
- Provan D.M., (1971) Soil phosphate analysis as a tool in archaeology, *Norwegian Archaeological Review* 4 37e50.
- Ruhe, R.V., Olson, C.G., 1980. Soil welding. *Soil Science* 130, 132–139.
- Sánchez A. (2004), *Indicadores Químicos para la Arqueología*, Universidad de Jaén, España, 190 pp.
- Scow K.M., Johnson C.R., (1997) Effect of sorption on biodegradation of soil pollutants, *Advances in Agronomy* 58 1e56.
- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), (1996), *Estudios de uso actual del suelo en la Cuenca Tributaria Oriental del exlago de Texcoco: México*, Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca; Nacional del Agua, Gerencia de Aguas del Valle de México, Gerencia del Lago de Texcoco, Consultoría en Planeación y Desarrollo Agropecuario, 142 p.
- Secretaría de Finanzas y Planeación (SFP), (1993), *Atlas general del Estado de México: Toluca, Estado de México*, Gobierno del Estado de México, Secretaría de Finanzas y Planeación, Instituto de Informática e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral, 2, 235 p.
- Seybold, C.A., Mausbach M.J., Karlen D.L. y Rogers H.H., (1997). Quantification of soil quality. In: Rattan, L., J.M. Kimble, R. F. Follett. B.A. Stewart. (ed.). *Soil processes and the carbon cycle*. CRC. U.S.A. pp. 387-404.
- Schuldenrein J., (1995), Geochemistry, phosphate fractionation, and the detection of activity areas at prehistoric North American sites, in: M.E.

- Collins, B.J. Carter, B.G. Gladfelter, R.J. Southard (Eds.), *Pedological Perspectives in Archaeological Research*, Soil Science Society of America, Madison, WI, pp. 107e132 (Special Publication 44).
- Stevenson F.J., y Cole M.A., (1999) *Cycles of Soil: Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulfur, Micronutrients*, second ed., John Wiley and Sons, New York.
 - Soil Survey Staff., (1993) *Handook No. 18. The Soil Taxonomy*, 8a ed., United States Department of Agriculture, Natural Resouces Conservation Service, Washinton. D.C.
 - Soil Survey Division Staff, (1998). *Keys to soil taxonomy*, 8a ed., United States Department of Agriculture, Natural Resouces Conservation Service, Washinton. D.C.
 - Tapia G., y López J., (2001). Mapeo geomorfológico analítico de la porción central de la Cuenca de México: unidades morfogenéticas a escala 1:100,000 *Revista de Ciencias Geológicas*, 19 : 50-65.
 - Terry R. E., Parnell J. and Jacob J. (2002). *Soil Chemical Analysis Applied as an Interpretive Tool for Ancient Human Activities in Piedras Negras, Guatemala* doi:10.1006/jasc.2002.0735, available online at <http://www.idealibrary.com> on Department of Agronomy and Horticulture, Brigham Young University, Provo, UT 84602, U.S.A. *Journal of Archaeological Science* 29, 379–404
 - WRB, (1998). *World Referente Base for Soil Resources. Wprld Soil Resources Reports 84. Food and Agriculture Organization of the United Nations*, Rome, 88 p.
 - Woods W.I., (1977) *The quantitative analysis of soil phosphate*, *American Antiquity* 42, 248e251.

ANEXO

Evaluación de P por los métodos seleccionados.

La mayoría de los métodos químicos para la determinación de P-disponible usan una solución extractante que está constituida de una o más sustancias. La base de los métodos químicos de extracción de P es la agitación de una muestra de suelo con una solución para disolver ciertas fracciones de este elemento (Anzastiga, 1984).

Las formas fácilmente solubles de ácido se extraen por una combinación NH_4F , el cual reacciona con el Ion aluminio Al para formar un complejo. La solución extractante más común de esta clase utiliza el NH_4F en presencia de HCl cuya concentración varia de 0.025 a 0.1 N, mientras la concentración del NH_4F es generalmente 0.03 N. El P en el extracto se determina colorimetricamente desarrollando color azul con molibdato de amonio ácido ascórbico como agente reductor. Con la solución de molibdato, el fósforo forma ácido molibdofosfórico que es reducido a azul molibdofosfórico con el ácido ascórbico dando una coloración azul. El antimonio acelera el desarrollo del color azul y los estabiliza hasta por 24 horas. Con este procedimiento no se esperan interferencias de Si. Una nueva solución extractora ha sido indicada por Mehlich (1978) para extraer macro y micro nutrientes simultáneamente y que utiliza una mezcla NH_4Cl , HOAc, NH_4F y HCl a pH aproximadamente de 2.5 (Anzastiga, 1984).

**Método: Determinación de fósforo disponible (método de Bray-Kurtz) Van
Reeuwijk, (1992)**

Equipo y material.

Balanza

Espectrofotómetro

Celdas para espectrofotómetro

Campana de extracción de gases

Balanza analítica

Pipetas microdosificadoras

Tubos de ensaye de 30 ml o envases para agitación

Parafilm

Papel filtro Whatman No. 40

Embudos de plástico

Gradillas

Tubos de ensaye de 15 o 20 ml

Reactivos

NH_4F

HCl

H_2SO_4

$(\text{NH}_4)_6\text{MoO}_{24}$

$\text{KSbOC}_4\text{H}_4\text{O}_6$

H_3BO_3

Preparación de los reactivos

Fluoruro de amonio (NH_4F) 1 M: disolver 3.7g de fluoruro de amonio en agua destilada y aforar la solución a 100 ml. Almacenar esta solución en un envase de polietileno.

Ácido clorhídrico (HCl) 0.5 M: agregar a aproximadamente 80 ml de agua destilada 4.3 ml de HCl concentrado (37%) y aforar a 100 ml con agua destilada.

Solución extractora: agregar a 460 ml de agua destilada 15 ml de NH_4F 1 M y 25 ml de HCl 0.5 M. que da una concentración 0.03 M en NH_4F y 0.025 M en HCl . Almacenar en envase de polietileno.

Acido sulfúrico (H_2SO_4) 2.5 M. Lentamente y con cuidado agregar 35 ml de H_2SO_4 concentrado (96%) a 150 ml de agua destilada con agitación constante. Dejar enfriar y aforar a 250 ml con agua.

Solución de molibdato de amonio al 4%. Disolver 4 g de $(\text{NH}_4)_6\text{MoO}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ en agua destilada y aforar a 100 ml. Almacenar en envase de polietileno o pyrex en la oscuridad.

Solución de tartrato de potasio y antimonio 0.275% (1000 mg/l Sb). Disolver 0.275 g de $\text{KSbOC}_4\text{H}_4\text{O}_6$ en agua destilada y aforar a 100 ml.

Solución de ácido ascórbico 1.75%. disolver 1.75 g de ácido ascórbico en agua y aforar a 100 ml. Prepararla fresca cada día.

Mezcla reactiva. Agregar sucesivamente con una probeta a un envase de plástico o pirex y homogeneizar después de cada adición:

- 200 ml de agua destilada,
- 50 ml de H_2SO_4 2.5 M,
- 15 ml de solución de molibdato de amonio,
- 30 ml de la solución de ácido ascórbico,
- 5 ml de la solución de tartrato de potasio y antimonio.

Esta mezcla no es estable por lo que hay que prepararla cada día.

Solución de ácido bórico 1%. Disolver 1 g de H_3BO_3 en 100 ml de agua.

Solución estándar de fósforo, 100mg/P/l disolver 0.4390 g KH_2PO_4

(previamente secado a 105°C durante dos horas) en agua destilada en un matraz aforado de 1 l y aforar.

Solución estándar de fósforo 12 mgP/l. Pipetear 30 ml de solución estándar de 100mg/P/l dentro de un matraz aforado de 250 ml y aforar con solución extractora.

Serie de estándares. Pipetear dentro de matraces aforados de 100 ml 0, 10, 20, 30, 40 y 50 ml de la solución estándar de 12 mgP/l respectivamente. Aforar con solución extractora. La serie de estándares es entonces de 0, 1.2, 2.4, 3.6, 4.8, y 6.0 mgP/l.

Muestra

El suelo debe estar secado al aire y tamizado (<2 mm). A una alícuota de este material se le determina la humedad actual de acuerdo al PRESOP MET-008.

Procedimiento

Pesar 2 g de suelo en un tubo (30 ml) o en un envase para agitación. Incluir la muestra patrón y 2 blancos de reactivos, agregar 14 ml de solución extractora, tapar con parafilm y agitar manualmente por 1 min, filtrar inmediatamente el contenido a través de papel filtro Whatman No. 40. Si el filtrado no está claro, volver a filtrar a través del mismo filtro. El proceso de filtración no debe exceder los 10 min. Tomar con una micropipeta 1 ml de cada uno de los puntos de la curva, del filtrado de las muestras, de la muestra patrón y de los blancos (cada uno en un tubo diferente), agregar a cada tubo 2ml de ácido bórico y 3 ml de la mezcla reactiva. Homogeneizar. Reposar por lo menos 1 h para que el color azul se desarrolle al máximo. Medir la absorbancia o transmitancia en un espectrofotómetro a 720 nm.

En caso de que la muestra se salga de la curva, hacer una dilución con la solución extractora y proceder como se describe anteriormente.

Cálculo

Se hace el cálculo correspondiente a las lecturas obtenidas, trazando una curva de mgP/kg contra absorbancia. (El valor del coeficiente de correlación de la curva de calibración debe ser cuando menos de 0.999 para considerarla aceptable).

$$P(\text{mgP/kg de suelo}) = (a-b) * (\text{ml de sol. extractora/peso del suelo en g}) * d * fch$$

Donde

a = mgP/l obtenido en la muestra.

b = mgP/l en el blanco.

fch = factor de corrección de humedad.

d = factor de dilución (en caso de haber diluido la muestra).

Método de Mehlich – II (Council on Soil Testing and Plant Analysis, 1974).

Equipo y material.

Balanza

Espectrofotómetro

Celdas para espectrofotómetro

Campana de extracción de gases

Balanza analítica

Pipetas microdosificadoras

Papel filtro Whatman No. 40

Embudos de plástico.

Gradillas

Parafilm

Tubos de ensaye de 15 o 20 ml

Tubos de ensaye de 30 ml o envases para agitación

Reactivos

AcOH

NH₄F

HCl

H₂SO₄

(NH₄)₆MoO₂₄

Preparación de los reactivos

Solución extractora

Agregar 0.56 g fluoruro de amonio (NH₄F) y 10.7 g de cloruro de amonio (NH₄Cl) a aproximadamente 500 ml de agua destilada, agregar 1 ml de ácido clorhídrico (HCl) concentrado (37%), 11.5 ml de ácido acético glacial (AcOH) y aforar a 1000 ml con agua destilada.

Solución molibdica. Agregar 12.5 g de (MoNH₄) y 0.3031 g de tartrato de potasio y antimonio aproximadamente 50 ml de agua destilada. Agregar lentamente y con cuidado 175 ml de ácido sulfúrico (H₂SO₄) concentrado () y

homogeneizar después de cada adición. Dejar enfriar y aforar a 250 ml de agua destilada. Almacenar en envase de polietileno o pyrex en refrigeración.

Solución de ácido ascórbico 8.8%. Disolver 8.8 g de ácido ascórbico en agua destilada y aforar a 100 ml. Prepararla fresca cada día.

Mezcla reactiva. Agregar sucesivamente con una probeta a un envase de plástico o pirex y homogeneizar después de cada adición:

- 291 ml de agua destilada
- 6 ml de solución de molibdato de amonio
- 3 ml de la solución de ácido ascórbico

Dejar que la temperatura de la solución alcance la temperatura ambiente.

Solución estándar de fósforo, 100mg/P/l disolver 0.4390 g KH_2PO_4

(previamente secado a 105°C durante dos horas) en agua destilada en un matraz aforado de 1 l y aforar.

Se prepara una curva de calibración a partir de la solución estándar que contiene de 0 a 10 ppm de P, tomando alícuotas de 0.5 ml para hacer el desarrollo de color como en las muestras. Las concentraciones finales de la curva de calibración son 0.000, 0.148, 0.296, 0.444, 0.593 y 0.741 ppm de P.

Procedimiento

Pesar 1.25 g de suelo en un tubo (30 ml) o en un envase para agitación. Incluir la muestra patrón y 2 blancos de reactivos, agregar 12.5 ml de solución extractora, tapar con parafilm y agitar durante 5 min en un aparato de acción recíproca a 180 opm, filtrar inmediatamente el contenido a través de papel filtro Whatman No. 40. Si el filtrado no está claro, volver a filtrar a través del mismo filtro. El proceso de filtración no debe exceder los 10 min. Tomar con una

micropipeta 0.5 ml de cada uno de los puntos de la curva, del filtrado de las muestras, de la muestra patrón y de los blancos (cada uno en un tubo diferente), agregar a cada tubo 6.25 ml de la mezcla reactiva. Homogeneizar. Reposar por lo menos 15 min para que el color azul se desarrolle al máximo. Medir la absorbancia o transmitancia en un espectrofotómetro a 880 nm.

Cálculo

Se hace el cálculo correspondiente a las lecturas obtenidas, trazando una curva de mgP/kg contra absorbancia. (El valor del coeficiente de correlación de la curva de calibración debe ser cuando menos de 0.999 para considerarla aceptable).

$$P(\text{mgP/kg de suelo}) = (a-b) * (\text{ml de sol. extractora/peso del suelo en g}) * d * fch$$

Donde

a = mgP/l obtenido en la muestra.

b = mgP/l en el blanco.

fch = factor de corrección de humedad.

d = factor de dilución (en caso de haber diluido la muestra).

Determinación de fósforo disponible soluble en ácido cítrico. (Lab. For Soil And Crop Testing, Oostrbeek, 1979).

Equipo y material.

Balanza

Espectrofotómetro

Celdas para espectrofotómetro

Campana de extracción de gases

Balanza analítica

Pipetas microdosificadoras

Parafilm

Papel filtro Whatman No. 40

Embudos de plástico.

Gradillas

Tubos de ensaye de 15 o 20 ml

Tubos de ensaye de 30 ml o envases para agitación

Reactivos

NH_4F

HCl

H_2SO_4

$(\text{NH}_4)_6\text{MoO}_{24}$

$\text{KSbOC}_4\text{H}_4\text{O}_6$

Preparación de los reactivos

Solución de ácido cítrico 1%.

Acido sulfúrico 5M.

Solución de tartrato de potasio y antimonio 0.5%.

Solución de molibdato de amonio al 12%.

Solución de ácido ascórbico 1.5%.

Solución estándar de fósforo, 100 mg/P/l.

Solución estándar de fósforo, 100mg/P/l disolver 0.4390 g KH_2PO_4 (previamente secado a 105°C durante dos horas) en agua destilada en un matraz aforado de 500 ml y aforar.

Serie de estándares para la curva de calibración, pipetear en matraces volumétricos de 100 ml 0, 10, 20, 30, 40 y 50 ml de solución estándar de 200mg/L de P y aforar con agua con agua. La serie de estándares tiene una concentración de 0,20, 40, 60, 80, y 100 mg/L de P.

Procedimiento

Pesar 5 g de suelo en un envase de agitación de polietileno de 100 ml, Incluir la muestra patrón y 2 blancos de reactivos, adicionar 50 ml de solución de ácido cítrico 1%. Agitar por 2 hr, dejar reposar por 20 h, agitar nuevamente por 1 hr en un aparato de acción recíproca a 180 opm, filtrar inmediatamente el contenido a través de papel filtro Whatman No. 40. Si el filtrado no está claro, volver a filtrar a través del mismo filtro. Tomar con una micropipeta 1ml de cada uno de los puntos de la curva, del filtrado de las muestras, de la muestra patrón y de los blancos (cada uno en un matraz aforado de 100 ml diferente), agregar a cada tubo 10.0 ml de la mezcla reactiva. Homogeneizar. Reposar por lo menos 2 hr para que el color azul se desarrolle al máximo. Medir la absorbancia o transmitancia en un espectrofotómetro a 882 o 720 nm.

Cálculo

Se hace el cálculo correspondiente a las lecturas obtenidas, trazando una curva de mgP/kg contra absorbancia.(El valor del coeficiente de correlación de la curva de calibración debe ser cuando menos de 0.999 para considerarla aceptable).

$$P(\text{mgP/kg de suelo}) = (a-b) \cdot (\text{ml de sol. extractora/peso del suelo en g}) \cdot d \cdot \text{fch}$$

Donde

a = mgP/l obtenido en la muestra.

b = mgP/l en el blanco.

fch = factor de corrección de humedad.

d = factor de dilución (en caso de haber diluido la muestra).