



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
INSTITUTO INTERAMERICANO DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DEL AGUA**



**EVALUACIÓN Y MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DEL AGUA DE UN POZO
DE ABASTECIMIENTO, CONTIGUO A UNA DESCARGA DE DRENAJE
RURAL, A TRAVÉS DE LA ALCALINIZACIÓN DEL SUELO**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS DEL AGUA

PRESENTA:

ROSA ELVIRA MONROY SÁNCHEZ

TUTORA ACADÉMICA

DRA. IVONNE LINARES HERNÁNDEZ

TUTORA ADJUNTA

DRA. VERÓNICA MARTÍNEZ MIRANDA

OCTUBRE 2020

Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada durante la realización de este trabajo CVU 668243 y a la Secretaría de Investigación y Estudios Avanzados de la Universidad Autónoma del Estado de México, por el apoyo otorgado al proyecto de investigación con clave 4779/2019CIB.

Se agradece al “Laboratorio de Calidad del Agua” del IITCA por los análisis del agua del pozo A027.

De igual manera, el reconocimiento al “Laboratorio de Servicios Externos” de la Facultad de Química de la UAEMex por el trabajo colaborativo que se ejecutó durante la toma de muestras y el análisis de parámetros físico-químicos y microbiológicos.

Un especial agradecimiento al “Laboratorio de Geoquímica Ambiental” del Centro de Geociencias, campus Juriquilla, UNAM de la ciudad de Querétaro por el análisis de ICP.

Índice

RESUMEN	6
ABSTRACT.....	8
1. INTRODUCCIÓN	10
2. MARCO TEÓRICO.....	11
2.1. El suelo como medio filtrante.....	11
2.2. Ciclo del fósforo (P) y del nitrógeno (N).....	13
2.3. Composición química del agua subterránea.....	15
2.4. Calidad del agua subterránea	15
2.5. Nutrientes en el agua subterránea	16
2.6. Normas Nacionales e Internacionales	17
2.7. Efectos a la salud y al ambiente.....	18
2.8. Medidas o alternativas de remediación.....	19
2.9. Propuesta de barrera química.....	20
2.10. Evaluación de materiales para su utilización en barreras permeables reactivas	21
2.10.1 Cascarón de Huevo.....	23
2.10.2 Aplicaciones del cascarón de huevo	25
3 JUSTIFICACIÓN CONTEXTUAL Y CIENTÍFICA	28
4 HIPÓTESIS.....	29
5 OBJETIVOS	30
5.1 General	30
5.2 Específicos	30
6 METODOLOGÍA	31
6.1 Ubicación del área de estudio	32
6.2 Muestreo y análisis de parámetros.....	32

6.3	Análisis fisicoquímicos	32
7	RESULTADOS	34
7.1	Ubicación del área de estudio	34
7.1.1	Características sociales de la localidad Sebastián Lerdo de Tejada	34
7.1.2	Características generales del acuífero donde se ubica el pozo A027	40
7.1.3	Caracterización fisicoquímica y microbiológica del pozo A027	41
7.2	Cálculos estequiométricos de la barrera química	46
7.2.1	Cálculo para remoción de fosfato con cascarón de huevo	46
7.2.2	Cálculo para remoción de fosfato PO_4^{3-} con óxido de calcio (CaO)	47
7.2.3	Cálculo para remoción de PO_4^{3-} y NH_4^+ con óxido de magnesio (MgO)	47
7.3	Dimensión e implementación de la barrera química	48
7.3.1	Excavación de la zanja	48
7.3.2	Incorporación del cascarón de huevo	49
7.3.3	Aplicación de los reactivos químicos CaO y MgO	50
7.4	Evaluación de la barrera química	50
8	Tiempo de vida de la barrera química	56
8.1	Cálculo para fosfatos PO_4^{3-}	56
	CONCLUSIONES	58
	RECOMENDACIONES	59
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

Índice de tablas

TABLA 1. PORCENTAJE TERRITORIAL DE LOS SUELOS QUE PREDOMINAN EN MÉXICO.....	12
TABLA 2. CARACTERÍSTICAS Y LÍMITES PERMISIBLES DE SUSTANCIAS CONTAMINANTES EN EL AGUA DE USO Y CONSUMO HUMANO, EN MÉXICO, EPA Y UE.....	18
TABLA 3. APLICACIONES DEL CASCARÓN DE HUEVO COMO ADSORBENTE.....	26
TABLA 4. NORMAS MEXICANAS Y MÉTODOS DE ANÁLISIS PARA LA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS.....	33
TABLA 5. DATOS POBLACIONALES DE LA COMUNIDAD DE SEBASTIÁN LERDO DE TEJADA	35
TABLA 6. CARACTERÍSTICAS ORGANOLÉPTICAS Y FÍSICAS DEL PRIMER MUESTREO EN EL POZO A027	41
TABLA 7. CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DEL PRIMER MUESTREO EN EL POZO A027	42
TABLA 8. CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS COMPLEMENTARIAS DEL PRIMER MUESTREO DEL POZO A027	43
TABLA 9. RESULTADOS DE HIDROCARBUROS AROMÁTICOS DEL PRIMER MUESTREO DEL POZO A027.....	43
TABLA 10. RESULTADOS DE MICROBIOLÓGICOS DEL PRIMER MUESTREO DEL POZO A027	43
TABLA 11. MATERIALES Y REACTIVOS QUE COMPONEN LA BARRERA QUÍMICA	46
TABLA 12. PARÁMETROS ORGANOLÉPTICOS, ANTES Y DESPUÉS DE LA BARRERA QUÍMICA, EN EL POZO A027	51
TABLA 13. CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS ANTES Y DESPUÉS DE LA BARRERA QUÍMICA DEL POZO A027.....	53
TABLA 14. CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS COMPLEMENTARIAS, ANTES Y DESPUÉS DE LA BARRERA QUÍMICA DEL POZO A027	54
TABLA 15. RESULTADOS DE HIDROCARBUROS AROMÁTICOS, ANTES Y DESPUÉS DE LA BARRERA QUÍMICA, DEL POZO A027.....	55
TABLA 16. RESULTADOS DE MICROBIOLÓGICOS ANTES Y DESPUÉS DE LA BARRERA QUÍMICA, DEL POZO A027	55

Índice de figuras

FIGURA 1. CICLO DEL NITRÓGENO. FUENTE: MODIFICADO DE ALFARO ET AL., 2001	14
FIGURA 2. CICLO DEL FÓSFORO. FUENTE: MODIFICADO DE ALFARO ET AL., 2001.....	15
FIGURA 3. ESTRUCTURA DEL HUEVO. FUENTE: HORST F. ANATOMÍA DEL HUEVO.....	24
FIGURA 4. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO DEL CASCARÓN DE HUEVO: A) VISTA GENERAL; B, C Y D) DETALLES DE LA CAPA VERTICAL EXTERNA Y DE LA MEMBRANA, E) LOS CONOS MAMILARES QUE SE FORMAN AL INICIO DE LA FORMACIÓN DEL CASCARÓN.	25
FIGURA 5. DIAGRAMA DE LA METODOLOGÍA GENERAL.....	31
FIGURA 6. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	36
FIGURA 7. ZANJAS DE DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES DE LA COMUNIDAD DE SEBASTIÁN LERDO DE TEJADA.....	37
FIGURA 8. CUERPO COLECTOR DE AGUAS RESIDUALES, UBICADO A 28 M DEL POZO A027	38
FIGURA 9. PASO DEL AGUA RESIDUAL DE LA COMUNIDAD DE SEBASTIÁN LERDO DE TEJADA, AL TERRENO DONDE SE UBICA EL CAMPUS UNIVERSITARIO "ÉL ROSEDAL"	39
FIGURA 10. A) PASO DEL AGUA A TRAVÉS DE LAS VÍAS DEL TREN, B) AGUA ESTANCADA ALREDEDOR DEL POZO	39
FIGURA 11. VISTA AÉREA DEL ÁREA DE ESTUDIO	40
FIGURA 12. A) Y B) PROCESO DE EXCAVACIÓN DE LA ZANJA EN EL POZO A027	48
FIGURA 13 A) Y B) INCORPORACIÓN DEL CASCARÓN DE HUEVO EN LA ZANJA CIRCUNDANTE AL POZO A027	49
FIGURA 14. A) Y B) INCORPORACIÓN DE LOS REACTIVOS DE ÓXIDO DE CALCIO Y ÓXIDO DE MAGNESIO	50
FIGURA 15. COMPORTAMIENTO DE LOS IONES MAYORITARIOS Y METALES ANTES Y DESPUÉS DE LA BARRERA QUÍMICA DEL POZO A027	56

RESUMEN

El campus universitario el “Rosedal” se ubica en la zona norte del municipio de Toluca, la calidad del agua del pozo A027, afectó su infraestructura, por lo que se pudo inferir la presencia de sustancias ácidas producto de la degradación de la materia orgánica presente en el agua residual de las comunidades aledañas de San Cayetano de Morelos, Santa Juana, Sebastián Lerdo de Tejada, que generaron corrosión; especies nitrogenadas, fosfatadas, que además incorporaron especies tóxicas como metales pesados. Por lo que fue necesario rehabilitar el pozo en 2018, mediante el cambio de la infraestructura hidráulica.

El objetivo de este proyecto fue modificar la calidad microbiológica y fisicoquímica del agua del pozo A027 que abastece a la unidad académica del Rosedal, a través de la implementación de una barrera química, con la finalidad de evitar la incorporación de productos de la degradación de la materia orgánica e inorgánica proveniente de aguas residuales.

Se realizó la caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua y posteriormente la implementación de la barrera química circundante al pozo A027. El proceso inició con la excavación de una zanja perimetral a la construcción. Se realizó el diseño, cálculo y aplicación de la barrera química alcalina, utilizando 1 ton de óxido de magnesio, 2.225 to óxido de calcio y 1 ton de cascarón de huevo.

Los resultados antes de la implementación de la barrera (AB) indican que el agua cumple únicamente con la calidad fisicoquímica establecida en la NOM-127-SSA1-2000, sin embargo, existe presencia de materia microbiológica que no cumple debido a la presencia de coliformes totales y fecales, que está relacionada con la presencia de especies nitrogenadas como nitritos, nitrógeno amoniacal, cianuros y de fosfatos, además, la presencia de sílice disuelta y baja concentración de sulfatos y cloruros, indicativos de la infiltración de agua residual municipal y/o agrícola.

Se concluye que después de la implementación de la barrera química (DB), el agua cumple con la calidad fisicoquímica y microbiológica establecida en la NOM-127-SSA1-1994, modificación del 2000, mostrando que esta tecnología es eficiente además de ser sencilla, económica y amigable con el ambiente, al inhibir la infiltración de las aguas residuales. Los análisis fisicoquímicos AB y DB fueron realizados por el laboratorio de servicios externos de la Facultad de Química, de la UAEM, el

cual se encuentra acreditado ante la entidad mexicana de acreditación, a.c (ema®), que brinda la efectividad, eficiencia, ética, y la confianza técnica en los resultados reportados en este documento.

ABSTRACT

The "Rosedal" university campus is located in the northern area of the municipality of Toluca, the water quality of well A027, affected the infrastructure, so it was possible to infer the presence of acidic substances as a result of the organic matter degradation from the urban wastewater of the neighboring communities of San Cayetano de Morelos, Santa Juana, Sebastián Lerdo de Tejada. Wastewater degradation generated corrosion by phosphates which also incorporated toxic species such as heavy metals. So it was necessary to rehabilitate the well in 2018, by changing the hydraulic infrastructure.

The goal of this project was to modify the microbiological and physicochemical quality of the water from well A027 that supplies the Rosedal academic unit, through the implementation of a chemical barrier, in order to avoid the incorporation of products from the degradation of organic and inorganic matter from wastewater.

The physical-chemical and microbiological characterization of the water was carried out, followed by the implementation of the chemical barrier around well A027. The process began with the excavation of a perimeter trench to the construction. The design, calculation and application of the alkaline chemical barrier was carried out, using 1 ton of magnesium oxide, 2 225 to calcium oxide and 1 ton of eggshell.

The results before the implementation of the barrier (BB) indicated that the water complies only with the physicochemical permissible limits established in NOM-127-SSA1-2000, however, there is presence of microbiological matter above the norm, due to the presence of total and fecal coliforms, which is related to the presence of nitrogenous species such as nitrites, ammoniacal nitrogen, cyanides and phosphates, in addition, the presence of dissolved silica and low concentration of sulfates and chlorides, indicative of the infiltration of municipal wastewater and / or agricultural.

After the implementation of the chemical barrier (AB), the water complies with the physicochemical and microbiological quality established in NOM-127-SSA1-2000, showing that this technology is efficient as well as simple, economical and friendly to the environment, by inhibiting the infiltration of wastewater.

The BB and AB physicochemical analyzes were performed by the external services laboratory of the faculty of chemistry, UAEM, which is accredited by the mexican accreditation entity, ac (ema®), which provides effectiveness, efficiency, ethics, and technical confidence in the results reported in this document.

1. INTRODUCCIÓN

En estudios recientes en pozos de los municipios de Toluca, Metepec, San Antonio la Isla y Capulhuac en el Estado de México, se encontró la presencia de materia orgánica nitrogenada y/o fosfatada en el agua de suministro público, resultado de la probable infiltración del agua residual sin tratar, propiciando la incorporación de arsénico, fluoruros, materia nitrogenada, fosfatos y metales pesados (Alvarez-Bastida *et al.*, 2018; Fonseca-Montes de Oca *et al.*, 2019), en el agua de abastecimiento.

La unidad académica “El Rosedal” se ubica en la zona norte del municipio de Toluca, colinda con San Cayetano de Morelos, Santa Juana, Sebastián Lerdo de Tejada, estas comunidades descargan sus efluentes a canales que convergen a una laguna de aguas residuales, que se encuentra cerca del pozo A027, el cual tiene una profundidad 50 m y una superficie aproximada de construcción de 72.6 m². Abastece a los centros de investigación, la Facultad de Turismo y Gastronomía, Centro Infantil de Rehabilitación con Asistencia Canina (CIRAC), Centro de Investigación en Química Sustentable UAEM - UNAM (CIQS), Centro de Investigación y Estudios Avanzados en Salud Animal (CIESA), Centro de Investigación de Recurso Bióticos (CIRB), Centro de Investigación en Ciencias Biológicas Aplicadas, Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA). Se ubica geográficamente a 99° 43' 30.07" O, 19° 23' 23.24" N, a una altura de 2,618 msnm (INEGI, 2019b).

Durante el desarrollo de este proyecto, se realizó la evaluación y validación de una barrera química alcalina en el pozo A027 que abastece la unidad académica “El Rosedal”. Con la finalidad de contar con el procedimiento y metodología para la implementación de una solución científica y tecnológica de bajo costo. Para dicho estudio de diagnóstico se consideraron los parámetros establecidos en la (NOM-127-SSA1-1994, 2000) y otros complementarios como: alcalinidad, acidez, fosfatos, potasio, calcio y magnesio.

En el proceso de la investigación, se establecieron dos campañas de muestreo y análisis, con base en la (NOM-127-SSA1-1994, 2000), los estudios fisicoquímicos y microbiológicos fueron realizados por el laboratorio de servicios externos de la Facultad de Química de la UAEM, el cual se encuentra acreditado ante la entidad mexicana de acreditación, a.c (ema®), que brinda la efectividad, eficiencia, ética y la confianza técnica en los resultados reportados en este documento. Los resultados obtenidos presentan evidencia de la infiltración de agua residual de la zona, donde la continua descarga de drenaje rural, afectó progresivamente la capacidad de adsorción de nutrientes en el suelo, propiciando su infiltración en los mantos freáticos.

2. MARCO TEÓRICO

A lo largo de la historia, el hombre se ha preocupado por asegurar el acceso y la calidad del agua de uso y consumo humano. La disminución de la calidad del agua subterránea se ha incrementado debido a la explotación excesiva de los acuíferos, gestión inadecuada, localización, diseño, construcción, profundidad, operación y mantenimiento de los pozos, condiciones insalubres que prevalecen en zonas urbanas y rurales. Por su ubicación geográfica, México posee estados con suelo rico en arsénico que puede incorporarse al agua, lo que ha representado que éste elemento se encuentre en niveles superiores a los límites permisibles de acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2011).

En el Estado de México y Michoacán se han realizados estudios de caracterización del agua de abastecimiento encontrando: arsénico, material orgánico nitrogenado y material inorgánico fosfatado, así como metales pesados como plomo, cobalto, cromo, hierro y manganeso (Alvarez-Bastida *et al.*, 2018; Fonseca-Montes de Oca *et al.*, 2019), todos ellos en concentraciones superiores a las establecidas por la (OMS, 2011) modificada en 2018 y la NOM-127-SSA1-1994, modificación del 2000.

El propósito de llevar a cabo esta propuesta se sustenta en trabajos de investigación donde se observó la presencia inusual de nitrógeno amoniacal (0.2-12.70 mg/L) y fosfatos (2.50-32.20 mg/L) en algunos casos con concentraciones superiores a lo establecido por la norma nacional e internacional. Por otro lado se implementó una barrera química de compuestos calcáreos *in situ*, mediante una capa superficial y en una columna como barrera de protección en un pozo ubicado en el municipio de Capulhuac, observando la eliminación de la materia orgánica fosfatada, por lo que se considera una solución viable, de bajo costo y fácil implementación (Fonseca-Montes de Oca *et al.*, 2019).

2.1.El suelo como medio filtrante

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) contempla en sus definiciones al suelo “desde el punto de vista agrícola como la capa de material fértil que recubre la superficie de la Tierra y que es explotada por las raíces de las plantas y a partir de la cual obtienen sostén, nutrimentos y agua. Desde una perspectiva ambiental, existen varias definiciones que incorporan su papel fundamental en los procesos ecosistémicos, debido a las funciones y servicios que realiza tales como la regulación y la distribución del flujo de agua o como amortiguador de los efectos de diversos contaminantes” (SEMARNAT, 2012).

En la tabla 1 se muestra los diferentes tipos de suelos que predominan en México, así como el porcentaje de distribución territorial. En México existen 26 de los 32 grupos de suelo reconocidos a nivel internacional, en conjunto, ocupan 81.7% de la superficie nacional (SEMARNAT, 2012).

TABLA 1. PORCENTAJE TERRITORIAL DE LOS SUELOS QUE PREDOMINAN EN MÉXICO

Tipo de Suelo	% Territorial
Leptosoles	28.3
Regosoles	13.7
Phaeozems	11.7
Calcisoles	10.4
Luvisoles	9
Vertisoles	8.6

Fuente: SEMARNAT 2012.

El Estado de México se asienta sobre suelo fértil del tipo andosoles, feozems, regosoles, vertisoles y cambisoles, entre otros (Sotelo Ruíz *et al.*, 2006). El municipio de Toluca está ubicado sobre suelo de tipo: feozem, vertisol y planosol, de mediana fertilidad agrícola, susceptibles de agrietamiento e inundación (INAFED, 2010).

La ubicación espacial del área de estudio “El Rosedal” se localiza sobre suelo de tipo vertisol, de clima semiárido a subhúmedo y de tipo mediterráneo, con marcada estacionalidad de sequía y lluvias. La vegetación natural que se desarrolla en ellos incluye sabanas, pastizales y matorrales. Se pueden encontrar en los lechos lacustres, en las riberas de los ríos o en sitios con inundaciones periódicas. Se caracterizan por su alto contenido de arcillas que se expanden con la humedad y se contraen con la sequía, lo que puede ocasionar grietas en esta última temporada. Esta propiedad hace que aunque son muy fértiles, también sean difíciles de trabajar debido a su dureza durante el estiaje ya que son muy adherentes en las lluvias (SEMARNAT, 2012).

El (INEGI, 2019c) describe que el suelo está conformado por cuatro componentes:

- a) **Compuestos inorgánicos, como:** grava, arcilla, limo y arena.
- b) **Nutrientes solubles, importantes para las plantas:** N, P, K, Ca y Mg.
- c) **Materia orgánica de organismos muertos, como:** lombrices, hongos, bacterias y restos de plantas en cualquier proceso de descomposición.
- d) **Agua y gases:** hidrógeno y oxígeno, que ocupan los espacios porosos libres.

El manejo del suelo puede afectar significativamente a la cantidad y calidad de agua disponible en una cuenca, por ello el balance hidrológico se ve alterado producto de la deforestación, los cambios del uso y la cobertura vegetal, la sobre explotación de los acuíferos y el drenaje de cuerpos de agua natural (FAO, 2019), por tal motivo es importante conocer la estructura del suelo por su gran influencia en el crecimiento de las plantas, a las correlaciones positivas entre la materia orgánica y su estructura (Šimanský *et al.*, 2019).

Las partículas que forman el suelo se clasifican en tres grupos por tamaño: arena, limo y arcilla. Las de arena son las más grandes y las de arcilla son las más pequeñas, es posible encontrar un suelo integrado por solo arena, arcilla o limo, que es poco común, pues la mayoría de los suelos son una combinación de los tres. En el suelo se encuentran una gran variedad de sistemas que utilizan organismos vivos (plantas, hongos, bacterias) células de combustible microbiano (MFC) para degradar, transformar o remover compuestos orgánicos tóxicos a productos metabólicos inoocuos o menos tóxicos. Este proceso se considera como una estrategia biológica que se desarrolla de las actividades catabólicas de los organismos, y por consiguiente de su capacidad para utilizar los contaminantes como fuente de alimento y energía a su paso por el suelo en el proceso de infiltración de agua (INECC, 2007; Fazal *et al.*, 2018; Sivasankar *et al.*, 2019).

2.2. Ciclo del fósforo (P) y del nitrógeno (N)

El fósforo (P) y el nitrógeno (N) son nutrientes que por naturaleza se encuentran en el suelo, su función es fertilizar; en el caso del N la mayor parte de éste se encuentra en la atmósfera como gas inerte (N_2), en el suelo existe en formas minerales de iones nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+); en menos abundancia, el nitrito (NO_2^-), los gases óxido nitroso (NO) y óxido nítrico (N_2O), la hidroxilamina (NH_2OH) y cantidades no disociadas de amoniaco (NH_3). Siendo el ion amonio el único que el suelo retiene de manera apreciable (Hayatsu *et al.*, 2008; Cameron *et al.*, 2013).

El 98% del suelo es orgánico, las formas iónicas utilizables por las plantas son nitrato y amonio, generando una dinámica de reacciones que se producen en forma continua de entradas y salidas de nitrógeno asimilable (Alfaro *et al.*, 2001; Cerón and Gutiérrez, 2012).

En la figura 1 se describen las entradas de nitrógeno asimilable como la mineralización de la materia orgánica, la fijación biológica del nitrógeno atmosférico y movimientos de nitrógeno en el suelo. También se refieren las salidas de nitrógeno asimilable en la inmovilización por organismos, fijación o retención en el complejo coloidal (arcillas), desnitrificación, pérdidas gaseosas (volatilización), lixiviación de nitrógeno (pérdidas por lavado), (Levy-Booth *et al.*, 2014).

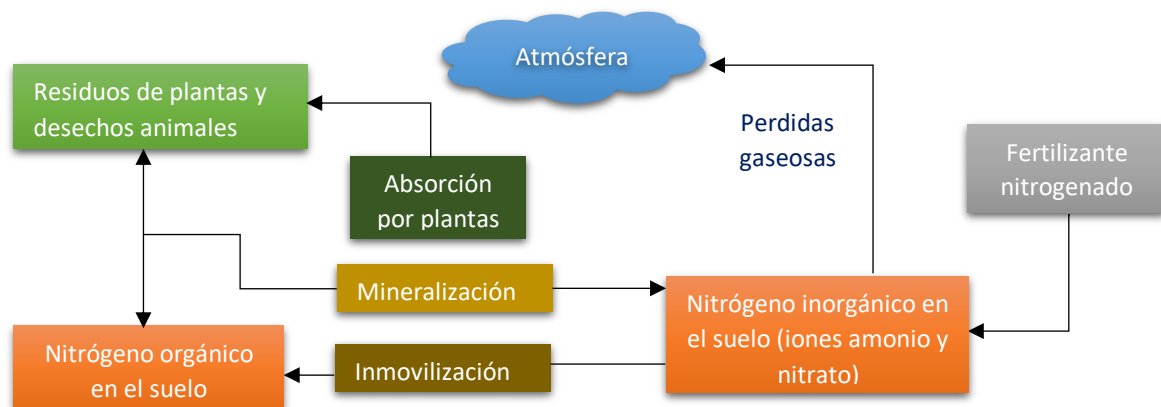


FIGURA 1. CICLO DEL NITRÓGENO. FUENTE: MODIFICADO DE ALFARO ET AL., 2001

El ciclo del fósforo es uno de los procesos más estables para la mineralización, está constituido por diversidad de formas inorgánicas como, fosfato de calcio, fosfato de aluminio, fosfato de hierro, fosfato ocluido en los coloides del suelo, con diferentes grados de insolubilidad (Alfaro *et al.*, 2001; Tapia-Torres *et al.*, 2013).

La principal entrada de fósforo en el suelo es la fijación, cualquier producto fosfatado aplicado al suelo tiende a buscar un grado de estabilidad mayor en detrimento de la disponibilidad del elemento hacia la planta. Luego que es absorbido por las plantas, los iones fosfóricos tienden a presentar reacciones de precipitación, pues la fracción presente en la solución del suelo es muy pequeña y mantiene un equilibrio poco dinámico con la fase iónica (Khan *et al.*, 2010; Sharma *et al.*, 2013).

Se puede considerar un ciclo que no tiene salidas. Por lo general, todo el fósforo que entra al suelo se transforma en formas más insolubles y permanece como reserva. La principal contribución a la dinámica del fósforo en los suelos está dada por el recambio de los procesos de mineralización-inmovilización microbianos (Richardson and Simpson, 2011). En la figura 2 se describe el ciclo del fósforo.

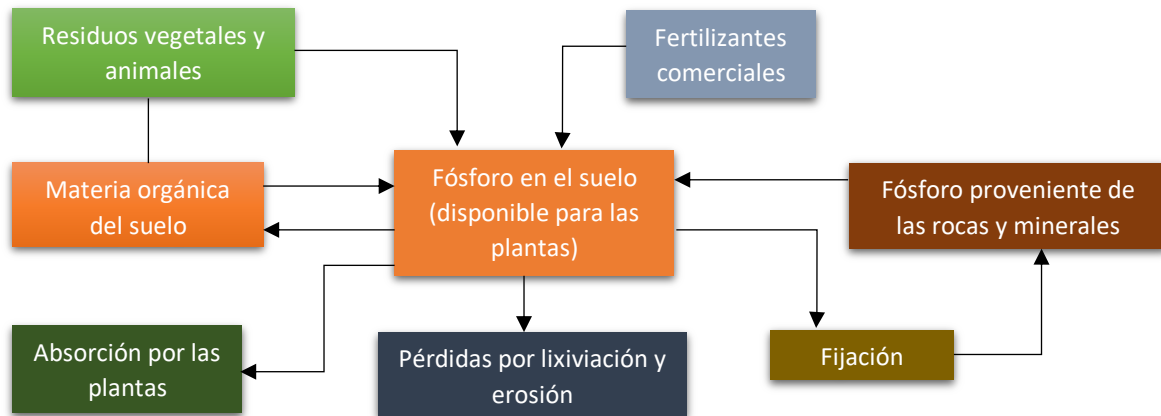


FIGURA 2. CICLO DEL FÓSFORO. FUENTE: MODIFICADO DE ALFARO ET AL., 2001.

2.3. Composición química del agua subterránea

El agua subterránea en los acuíferos desempeña un papel muy importante en el crecimiento socioeconómico del país, gracias a su composición química y sus características físicas que le permite ser aprovechada de manera versátil, pues funcionan como presas de almacenamiento y red de distribución, siendo posible extraer agua en cualquier época del año de prácticamente cualquier punto de la superficie del acuífero. Actúan como filtros purificadores, preservando la calidad del agua (CONAGUA, 2018 a). Los constituyentes en el agua se encuentran en forma de sales iónicas disociadas, compuestos moleculares, complejos orgánicos e inorgánicos: iones mayoritarios en concentraciones de 1.0 mg/L (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), iones minoritarios con concentraciones inferiores 1 mg/L (F^- , S^{2-} , Br^- , NO_3^- , NO_2^- , PO_4^{3-} , BO_3^- , Mn^{2+} , NH_4^+ , Li^+ , Sr^{2+} , Zn^{2+}) (Fonseca-Montes de Oca *et al.*, 2019).

2.4. Calidad del agua subterránea

Existen diferentes procesos físicos, químicos y biológicos en los que el agua subterránea está involucrada; tales procesos pueden ser el paso por ríos contaminados, recarga en zonas de manantiales con importante influencia antropogénica, disminución del caudal por el crecimiento del área urbana o suburbana, afectando la calidad del agua que se basa en un equilibrio de variables físicas, químicas y biológicas y en consecuencia, la evaluación de la calidad del agua subterránea se dirige invariablemente hacia factores que pueden disminuir la idoneidad del agua subterránea con respecto a su potabilidad y uso (Peñuela and Carrillo, 2013)(Peñuela and Carrillo, 2013; Fonseca-Montes de Oca *et al.*, 2019). Las fluctuaciones significativas de la composición química resultan del impacto de

factores naturales y antropogénicos en su formación. Por lo tanto, es de interés el análisis sobre el comportamiento de los principales contaminantes en el agua, además de la investigación de la composición química del agua subterránea (Sun *et al.*, 2014).

2.5. Nutrientes en el agua subterránea

De todas las actividades del hombre que tienen influencia en la calidad del agua, la agricultura es, probablemente, una de las más importantes debido a que puede causar la degradación del recurso por el uso de fertilizantes y plaguicidas. Esta degradación, es originada por cambios bioquímicos en la zona del suelo donde los fertilizantes nitrogenados y fosforados, cambian a nitratos y fosfatos que pueden percolar al agua subterránea (Pacheco, 2003).

Los iones nitratos y nitritos, son compuestos solubles conformados molecularmente por nitrógeno y oxígeno. En el ambiente, el nitrito (NO_2^-) generalmente se convierte a nitrato fácilmente (NO_3^-), lo que significa que el nitrito raramente está presente en aguas subterráneas. El nitrato es esencial en el crecimiento de las plantas, por esta razón su uso predominante es como fertilizante. Si bien es cierto, estos compuestos forman parte del ciclo natural del nitrógeno, las actividades humanas incrementan sus niveles principalmente en el suelo, y es debido a su solubilidad en agua, que alcanza concentraciones importantes en ríos o lechos profundos. Se puede hablar entonces de que existen dos tipos de fuentes de contaminación de las aguas naturales por compuestos nitrogenados: la contaminación puntual y la dispersa. El primer caso se asocia a actividades de origen industrial, ganadero o urbano (vertido de residuos industriales, de aguas residuales urbanas o de efluentes orgánicos de las explotaciones ganaderas, y lixiviación de vertederos, entre otros), mientras que en la contaminación dispersa o difusa, la actividad agronómica es la causa principal. Las principales rutas de ingreso de nitrógeno a las masas de agua son a través de aguas residuales industriales o municipales, por tanques sépticos o descargas de corrales ganaderos, residuos animales (incluyendo aves y peces) (Bolaños-Alfaro *et al.*, 2017).

Por otra parte, el ion fosfato, se forma a partir del fósforo inorgánico que existe como mineral y contribuye directamente en el ciclo de este elemento en el ambiente. El agua de lluvia puede contener distintas cantidades de fosfatos que se filtran de los suelos agrícolas a los cursos de agua próximos. Como antecedente, se sabe que el Lago Erie durante los años 70 sufrió un incremento considerable del ion fosfato, que provocó la muerte de los peces y de muchas especies marinas, por la gran cantidad de polifosfatos provenientes de los detergentes en las aguas residuales. El ion fosfato suele operar

como un nutriente del crecimiento de algas, esto quiere decir que al existir mayor concentración de fosfatos crecen las algas de manera desmedida, lo que a su vez afecta la cantidad de oxígeno presente en el agua y, por ende, el crecimiento descontrolado de materia orgánica viva, situación que conlleva una mayor tasa de descomposición, que finalmente conduce a un proceso de eutrofización (Bolaños-Alfaro *et al.*, 2017).

2.6. Normas Nacionales e Internacionales

(Ortega Márquez and Márquez Fernández, 2017; Rodriguez-Alvarez *et al.*, 2017) describen que el control del agua de uso y consumo es importante, ya sea que esta provenga de sistemas de potabilización o que carezca de tratamiento previo; por lo tanto, se deben realizar registros regulares sobre la percepción que tienen los usuarios sobre la calidad del agua. (Juárez *et al.*, 2015), cuestiona en su investigación: ¿cumplir con la legislación garantiza agua segura? menciona que el agua es el principal vehículo de exposición humana a los peligros microbiológicos, como bebida, en las actividades recreativas, en el riego de alimentos o en la conformación de aerosoles.

La (NOM-127-SSA1-1994, 2000) indica que el abastecimiento de agua para uso y consumo humano con calidad adecuada es fundamental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades gastrointestinales y otras, para lo cual se requiere establecer límites permisibles en cuanto a sus características microbiológicas, físicas, organolépticas, químicas y radiactivas, con el fin de asegurar y preservar la calidad del agua en los sistemas, hasta la entrega al consumidor.

En la tabla 2 se muestra una comparación de los datos correspondientes a los límites permisibles para agua de uso y consumo humano de la normativa en México, EE.UU de acuerdo a la Environmental Protection Agency (EPA, 2009) y Unión Europea (UE, 2009). Se considera especies que puede llegar al agua de abastecimiento por los efluentes generados de las actividades antropogénicas donde se desechan residuales industriales y municipales sin tratar y/o fertilizantes que pueden contener varios contaminantes que podrían tener efectos adversos en la salud humana y algunas jurisdicciones tienen regulaciones vigentes para normar estas y que se han incrementado en los últimos años.

TABLA 2. CARACTERÍSTICAS Y LÍMITES PERMISIBLES DE SUSTANCIAS CONTAMINANTES EN EL AGUA DE USO Y CONSUMO HUMANO, EN MÉXICO, EPA Y UE

Parámetro	México	EPA	UE
	Límite permisible mg/L		
Arsénico*	0.025	0.025	1
Nitratos (como N)	10.00	10	50
Nitritos (como N)	1.00	1	0.50
Nitrógeno amoniacal (como N)	0.50	-	-

Con respecto a los límites máximos permisibles para el arsénico*, este se ajustará anualmente, de 0.25 mg/L que es el valor actual hasta 0.01 mg/L en 2025, datos de la actualización de la NOM-127-SSA1-1994 (PROY-NOM-127-SSA1-2017).

En EE UU, la (EPA, 2016) describe que la contaminación por nutrientes es uno de los problemas ambientales más extendidos, costosos y complejos, resultado del exceso de N y P en el aire y el agua. Dadas estas condiciones, el agua subterránea fuente de abastecimiento, puede ser nociva para la salud si está contaminada por nutrientes, incluso si la contaminación es moderada. Los lactantes son vulnerables a los NO_3^- y a los compuestos a base de N, presentes en el agua potable.

Al respecto la (Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo, 2018), explica que la mayoría de los habitantes de la UE tienen acceso a agua potable de calidad, especialmente si se compara su calidad con la de otras regiones del mundo. La UE lleva aplicando normas que exigen estrictos controles de la seguridad del agua desde los años ochenta. En consecuencia, las aguas residuales urbanas se recogen y tratan; las emisiones industriales se gestionan de forma segura, el uso de sustancias químicas se aprueba según lo establecido, y se aplica un enfoque holístico a la gestión de las masas de agua transfronterizas.

2.7. Efectos a la salud y al ambiente

El P y el N, principalmente como PO_4^{3-} y NO_3^- , respectivamente, se consideran responsables de la eutrofización. En el medio ambiente, la alta concentración de PO_4^{3-} y NO_3^- , no solo favorece la eutrofización de los cuerpos de agua, sino también produce implicaciones en la salud pública. La alta concentración de NO_3^- en el agua potable es la principal causa de la metahemoglobinemia (Boeykens

et al., 2017). Este padecimiento es un cuadro de intoxicación aguda típico de niños menores de un año. Es más frecuente en lactantes debido a su inferior actividad enzimática. Aunque la clínica más frecuente es cianosis asociada a dificultad respiratoria, la metahemoglobinemia puede presentarse con cuadros más severos y confusos en mayores de un año. El tratamiento de elección es oxigenoterapia a altas concentraciones y azul de metileno como antídoto por vía intravenosa únicamente en casos seleccionados (Martínez de Zabarte *et al.*, 2018).

La hiperfosfatemia es una complicación frecuente en pacientes con enfermedad renal en etapa terminal en hemodiálisis. El pilar del manejo del PO_4^{3-} involucra una dieta baja en éste y el uso de aglutinantes de PO_4^{3-} , aunque a menudo estos son insuficientes (Brauer *et al.*, 2019). El nivel de PO_4^{3-} sérico se mantiene mediante la absorción intestinal, el manejo renal, el cambio extracelular y el que se encuentra en espacio óseo o intracelular. Son algunas de las señales que causan enfermedades hiperfosfatémicas o hipofosfatémicas (Vervloet and van Ballegooijen, 2018).

2.8. Medidas o alternativas de remediación

La eliminación de los compuestos derivados de nitrógeno (N) y fósforo (P) se debe realizar para asegurar y garantizar la salud humana y el desarrollo sostenible.

El fósforo es considerado un elemento de suma importancia para la agricultura y la industria, pero su liberación excesiva en forma de fosfatos a los cuerpos de agua genera un proceso denominado eutrofización, el cual impone riesgos a los sistemas acuáticos. Hasta el momento, se han desarrollado métodos para la eliminación y recuperación de fosfatos que incluyen: precipitación química y adsorción (Chuquimboques *et al.*, 2019).

La contaminación de los recursos hídricos por nitrógeno a través de sus formas iónicas (nitrato, nitrito y amonio) se ha convertido en un problema importante a nivel mundial en las últimas décadas. En la actualidad existen varias técnicas para la eliminación de los nitratos en el agua. Estas se pueden clasificar en dos grupos. Las técnicas de separación, como su nombre indica, pretenden separar los nitratos de la corriente de agua a depurar. Estas técnicas son: la electrodiálisis, la ósmosis inversa y las resinas aniónicas. Las técnicas de transformación pretenden transformar los nitratos en otros compuestos químicos inocuos por medio de vías biológicas o catalíticas (Palomares, 2013).

(Boeykens *et al.*, 2017) reporta la adsorción de PO_4^{3-} y NO_3^- en dolomita e hidroxiapatita. Estos materiales se seleccionaron como adsorbentes de bajo costo. Encontraron que ambos tienen una alta capacidad de adsorción de PO_4^{3-} , en presencia de NO_3^- . La hidroxiapatita demostró ser el adsorbente más eficiente, sin embargo, mostró un bajo porcentaje de desorción y pocas posibilidades de reutilización, mientras, la dolomita, permite una desorción del material adsorbido lo que favorece su reutilización.

(Amini *et al.*, 2019), realizaron una investigación para la eliminación de NO_3^- y PO_4^{3-} por microalgas, *Dunaliella salina*; los resultados mostraron que la adsorción máxima de NO_3^- y PO_4^{3-} con el uso de *D. salina* como adsorbente fue 332 y 544 mg^{-1} y la mejor eficiencia de remoción de NO_3^- y PO_4^{3-} fue de 54% y 82%, respectivamente.

2.9. Propuesta de barrera química

En las condiciones hidrogeológicas actuales, los acuíferos de mayor explotación de aguas subterráneas para el consumo de la población están propensos a ser contaminados por fosfatos, nitratos, nitritos y otras especies como consecuencia del desarrollo agropecuario, industrial y poblacional, existiendo en la actualidad zonas acuíferas contaminadas en magnitudes alarmantes, por lo que debe elaborarse con carácter prioritario, un programa para el estudio de las causas y factores que generan esta contaminación, definir las principales acciones y tomar las medidas necesarias que permitan detener el desarrollo de la contaminación y dentro de lo posible, eliminar la misma, con el objetivo de preservar las aguas subterráneas como parte integral del medio ambiente y proporcionar a la población un agua de buena calidad con formas racionales de explotación, que permitan el uso sostenible de estos geo-recursos (Fernández-Miguel *et al.*, 2006).

El término barrera química, es un concepto propuesto por los autores de este proyecto, el cual es análogo del término barreras geoquímicas o reactivas, el cual ya ha sido reportado por diferentes trabajos (Carrera *et al.*, 2001).

Una barrera geoquímica es un sistema que ofrece una tecnología in situ para el tratamiento pasivo de aguas subterráneas contaminadas. Esta permite el paso del agua pero crea condiciones químicas tales que reduce el paso de contaminantes. Por ejemplo, la generación de condiciones reductoras puede favorecer la precipitación de metales como sulfuros. También se puede plantear la construcción de

barreras para la eliminación de contaminantes orgánicos, tanto por adición de aceptadores de electrones, para mantener condiciones oxidantes, como por creación de condiciones muy reductoras (Carrera *et al.*, 2001).

(Bezzar *et al.*, 2010), realizaron un estudio hidráulico y geoquímico en 2 materiales: arcilla natural y material compuesto por una mezcla de arena y bentonita. Las capacidades de adsorción de ambas matrices exhiben la siguiente selectividad de adsorción como $Pb > Cu > Cd > Zn$.

Por otra parte (Wilkin *et al.*, 2009) estudiaron el comportamiento de una barrera reactiva de hierro zerovalente para el tratamiento de arsénico en aguas subterráneas. Los autores concluyen que la eliminación de arsénico es el resultado de varias vías, incluida la adsorción a las superficies de óxido de hierro y sulfuro de hierro, y la posible precipitación de arseniato ferroso. La corrosión del hierro granular parece dar lugar a cierta oxidación de As(III) a As(V).

(Suhogusoff *et al.*, 2019) estudiaron la dinámica de la degradación de nitrato que incorpora dos materiales de desecho como barreras reactivas permeables en un asentamiento irregular en el municipio de São Paulo (Brasil). Escorias de horno de oxígeno básico (BOF) en contacto con el efluente de las aguas residuales aumenta su nivel de pH, lo que provoca la inactivación de patógenos y la adsorción de fosfato. El aserrín bajo la saturación de agua crea condiciones reductoras que estimulan el crecimiento de bacterias desnitrificantes.

El sistema de barrera aún enfrenta limitaciones debido al conocimiento restringido sobre los mecanismos operativos, la falta de un conjunto completo de propiedades y el rendimiento a largo plazo (Carrera *et al.*, 2001).

2.10. Evaluación de materiales para su utilización en barreras permeables reactivas

El material del relleno de la barrera debería cumplir las siguientes funciones (Carrera *et al.*, 2001):

- a) Regular la acidez del agua
- b) Disminuir el elevado contenido en fosfatos y materia nitrogenada
- c) Atenuar los niveles de metales pesados
- d) Tener presente la posible movilización del arsénico y su atenuación. Atendiendo a la experiencia descrita en este campo y a las necesidades del problema.

- e) El material a utilizar en una barrera reactiva se define según una serie de criterios: ser lo suficientemente reactivo para disminuir la concentración del agente contaminante del acuífero
- f) Ser permeable para acoplarse al flujo del agua subterránea (del orden de 1 m/d).
- g) mantener la permeabilidad y la reactividad durante un cierto período de tiempo (en la escala de años).
- h) Tener un coste razonable.

(Carrera *et al.*, 2001) promueven para el control de la acidez dos materiales: uno natural, la calcita, y otro sintético, la portlandita en una base de cemento. A diferencia de otras barreras se ha utilizado la calcita para reducir la acidez. Para la disminución de la concentración de metales tóxicos, se utilizaron varias formas de precipitación (sulfuros, carbonatos e hidróxidos). La más estable parece la precipitación en forma de sulfuros, que requiere la reducción del sulfato a sulfuro. Para ello se ensayaron por una parte hierro metálico y por otra, materia orgánica. La elección de estos materiales ha permitido definir tres tipologías de material de barrera atendiendo a los procesos físicos, químicos y biológicos involucrados.

Barrera tipo 1. Control de la acidez: calcita y mezclas de calcita con portlandita inmovilizada en matrices de cemento.

Barrera tipo 2. Reducción de sulfatos con hierro: calcita y hierro metálico

Barrera tipo 3. Reducción del sulfato con materia orgánica: una fuente de materia orgánica (lodos de depuradora, compost, madera), una fuente de bacterias (lodos de zonas anaerobias de las riberas locales y arroyos) y un agente neutralizador de la acidez que como en los casos anteriores fue la caliza. Para aumentar la capacidad reductora del sistema, en un experimento se añadió hierro metálico; el hierro ha sido propuesto en barreras reactivas para la reducción de cromato.

En este trabajo de investigación, se propone la aplicación de una barrera química alcalina como una contribución al estado del arte, la cual permite remover metales pesados, nutrientes, materia microbiológica y control de acidez: utilizando cascarón de huevo, el cual es un excelente adsorbente; con alto contenido de carbonato de calcio, que en conjunto con el óxido de calcio, favorece la precipitación de fosfato de calcio ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$). Además la incorporación de óxido de magnesio para efectuar la complejación de materia nitrogenada y fosfatada como fosfato de magnesio amonio (MgNH_4PO_4).

Un estudio previo donde se aplicó este tipo de barrera, mostró la mejora en la calidad del agua en pozo privado del Estado de México utilizando una barrera química alcalina in situ, a través de una mezcla de compuestos a base de Ca, la cual requirió hacer la apertura y sellado del terreno con trascabo, intercalando la colocación de los reactivos. (Fonseca-Montes de Oca *et al.*, 2019).

Y recientemente en este trabajo en el pozo A027 del campus “El Rosedal”, en donde la distancia entre los posibles focos de contaminación (aguas urbanas y agrícolas) y el pozo es de 28 m y de acuerdo a la (NOM-003-CNA-1996, 1997), establece una distancia mínima de 30 m por lo que no se da cumplimiento a esta norma. Las aguas residuales provenientes de las comunidades cercanas se estancan en una laguna de aguas residuales y en época de recarga el agua sigue su flujo y se estanca alrededor del pozo.

(Abdelwaheb *et al.*, 2019) confirma que las especies que representan mayor riesgo al agua subterránea cuando son transportadas a través de un suelo arenoso en orden mayoritario son: Pb, Ni, PO_4^{3-} , NO_3^- mientras que para un suelo arcilloso, el orden mayoritario es: PO_4^{3-} , Pb, Ni, NO_3^- . El suelo donde se ubica la unidad académica “El Rosedal” es vertisol con alto contenido de arcilla, susceptible a inundaciones con lluvias intensas y a generar grietas durante las estaciones secas (INEGI, 2019d).

2.10.1 Cascarón de Huevo

En la figura 3 se muestra el esquema del cascarón de huevo. Toda la superficie de la cáscara, incluso los mismos poros, se encuentra recubierta por una cutícula orgánica que está formada principalmente por proteínas (90%) y pequeñas cantidades de lípidos y carbohidratos (Instituto de Estudios del Huevo, 2009).

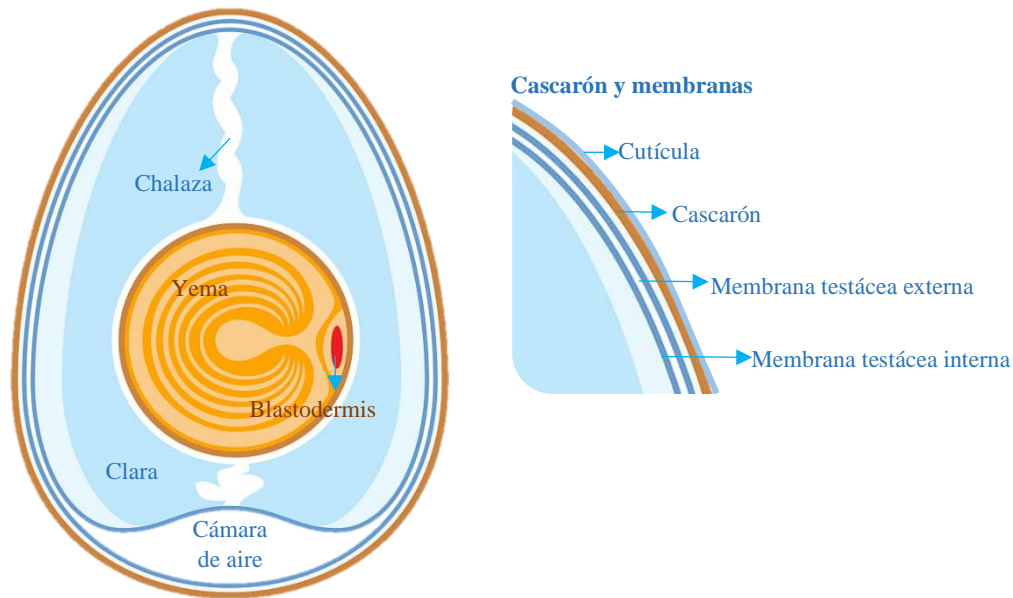
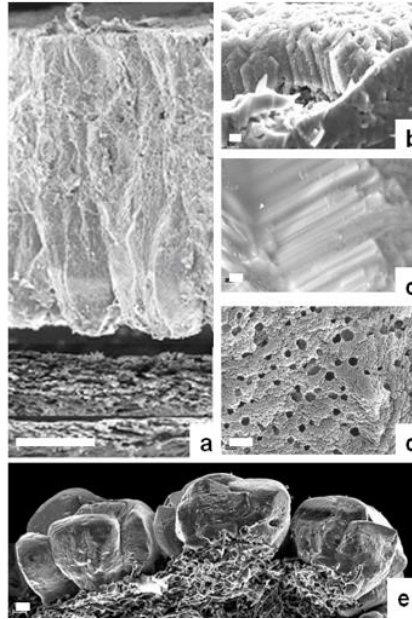


FIGURA 3. ESTRUCTURA DEL HUEVO. FUENTE: HORST F. ANATOMÍA DEL HUEVO

El cascarón de huevo está constituido en más de un 94% de carbonato de calcio CaCO_3 , 1% de carbonato de magnesio (MgCO_3), 1% de fosfato de calcio ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) y el 4% de materia orgánica compuesta principalmente de proteínas. Constituye un 11.5% del peso total del huevo (Vega, 2009; Vaclavik, 2014; Pérez-Macedo *et al.*, 2017). El cascarón de huevo es una matriz de fibras proteicas y cristales de calcita entrelazadas en una proporción 1:50. La matriz fibrosa, está compuesta principalmente por calcio (Ca) y complejos de proteína mucopolisacáridos, que ayudan a la formación de las fibras, así como una pequeña cantidad de minerales entre los que se encuentran, sodio (Na) magnesio (Mg), zinc (Zn), manganeso (Mn), hierro (Fe), cobre (Cu), aluminio (Al), fósforo (P) y boro (B) (Vega, 2009).

La cáscara es porosa (se pueden contar entre 7,000 – 17,000 poros), no es impermeable, y por lo tanto, esta película actúa como un verdadero revestimiento. Además está cubierta por una fina capa que cubre los poros y aumenta su capacidad de protección contra agentes exteriores (Pramanpol and Nitayapat, 2006; Instituto de Estudios del Huevo, 2009; Valdés, 2009). Esta capa externa se pierde al contacto con el agua. En la figura 4 se muestra una microscopía electrónica de barrido donde se puede apreciar la porosidad del cascarón de huevo.



Fuente: Cristales, fundación descubre: Biomateriales

FIGURA 4. MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA DE BARRIDO DEL CASCARÓN DE HUEVO: A) VISTA GENERAL; B, C Y D) DETALLES DE LA CAPA VERTICAL EXTERNA Y DE LA MEMBRANA, E) LOS CONOS MAMILARES QUE SE FORMAN AL INICIO DE LA FORMACIÓN DEL CASCARÓN.

2.10.2 Aplicaciones del cascarón de huevo

El cascarón de huevo se puede utilizar para diversos fines, a través de los años mediante diversos trabajos de investigación se ha comprobado que su uso minimiza los efectos de la contaminación ambiental (King'ori, 2011). El cascarón de huevo, una alternativa a la cal como estabilizador del suelo, para enmendar la acidificación de este. Como fertilizante debido a la importante cantidad de carbonato de calcio que contiene (Amu *et al*, 2008; King'ori, 2011).

Durante la última década los materiales de desecho de huevos, particularmente el cascarón de huevo y la membrana del cascarón, se han utilizado en el tratamiento de aguas residuales para eliminar sustancias peligrosas orgánicas e inorgánicas. En los últimos años, los adsorbentes modificados químicamente han atraído considerable atención. Se han realizado varios intentos para modificar químicamente el cascarón de huevo y lograr una adsorción selectiva o mejorada (Mittal *et al.*, 2016). La tabla 3 muestra algunas de las aplicaciones y usos que se le ha dado al cascarón de huevo como adsorbente de diversos contaminantes.

TABLA 3. APLICACIONES DEL CASCARÓN DE HUEVO COMO ADSORBENTE

Contaminante	Aplicación
<p>Colorantes orgánicos</p> <p>Los tintes ácidos se utilizan en el teñido de la industria textil, poseen una alta solubilidad en agua, por lo que su eliminación mediante métodos fisicoquímicos comunes es difícil.</p>	<p>El cascarón de huevo posee la capacidad para remover colorantes ácidos tóxicos de manera efectiva y eficiente, adsorbiendo el tinte reactive yellow 205 del agua residual industrial (Pramanpol and Nitayapat, 2006).</p>
<p>Ácido oxálico</p> <p>Es un químico de laboratorio, se utiliza como agente de limpieza o blanqueador especialmente para la eliminación de óxido.</p>	<p>Se utilizó polvo de cascarón de huevo (125 μm) para adsorber el ácido oxálico de agua residual, la cinética del proceso se controló a diversas temperaturas. La adsorción del ácido oxálico fue factible y espontánea (Ikram <i>et al.</i>, 2016).</p>
<p>Fenol</p> <p>Contaminante orgánico tóxico presente en los efluentes de textiles, industrias petroquímicas, plaguicidas. Por su naturaleza tóxica se ha designado como contaminante prioritario en todo el mundo.</p>	<p>Se observó una capacidad de adsorción de 0.55 mg/g después de 90 min, pH 9, 25 °C, 3.5 g de cascarón de huevo y una concentración inicial de fenol de 30 mg/L. La adsorción del fenol sobre el cascarón de huevo es un proceso exotérmico y espontáneo (Daraei <i>et al.</i>, 2013).</p>
<p>Plaguicida (Malathion)</p> <p>Es un plaguicida de uso común.</p>	<p>La capacidad de adsorción del cascarón de huevo sobre malathion, se encontró hasta 1.928 mmol/g a 25 °C (Elwakeel and Yousif, 2010).</p>
<p>Ácido húmico</p> <p>Principal componente del agua de turba, formado por residuos aromáticos y alifáticos. Presentan un grave problema ambiental al beber el agua debido a su mal olor y sabor.</p>	<p>El cascarón de huevo en polvo, resultó un adsorbente de alto potencial para la eliminación de ácido húmico, 5g de polvo adsorbió casi 95% de ácido húmico del agua de turba (Zulfikar <i>et al.</i>, 2013).</p>
<p>Actínidos</p> <p>Uranio y Torio importantes elementos de la serie actínidos, son sustancias radiactivas naturales</p>	<p>Las absorciones máximas por el modelo Langmuir fueron de aproximadamente 240 mgU/g y 60 mgTh/g de peso seco de cascarón de huevo. El método desarrollado fue propuesto para ser utilizado en tecnología de filtración para eliminar los actínidos de la solución acuosa (Ishikawa <i>et al.</i>, 1999).</p>

Contaminante	Aplicación
<p>Cromo</p> <p>La eliminación no regulada de efluentes que contienen Cr, ha provocado la contaminación del suelo y agua subterránea.</p>	<p>En un estudio de biosorción de Cr (III) se descubrió que el cascarón de huevo triturado poseía el doble de capacidad de adsorción (21-160 mg/g) que el carbón activado y los huesos de los animales (Chojnacka, 2005).</p>
<p>Cobre</p> <p>Metal tóxico, amenaza potencial para la salud humana y el medio ambiente, incluso en bajas concentraciones. Sus síntomas de toxicidad están a la par del Hg y el Pb.</p>	<p>Se usó polvo de cascarón de huevo para tratar efluentes simulados e industriales, se evaluó su capacidad de adsorción de iones de Cu y Al. Eliminando varios contaminantes de diferentes tipos de sistemas acuosos con gran eficiencia (Carvalho <i>et al.</i>, 2011).</p>
<p>Cadmio</p> <p>Metal altamente tóxico con límite de exposición muy bajo. Utilizado en galvanoplastia, baterías y pinturas.</p>	<p>La adsorción de Cd mediante cascarón de huevo es buena al aumentar el tiempo de reacción, la cantidad de cascarón, temperatura y pH. Sin embargo la adsorción disminuyó al aumentar el tamaño de poro del cascarón (Flores-Cano <i>et al.</i>, 2013).</p>
<p>Plomo</p> <p>Debido a su naturaleza no biodegradable y persistente es altamente tóxico y perjudicial al medio ambiente y al sistema nervioso. Se encuentra en aguas residuales derivadas de procesos de refinación de gasolina, fabricación de cerámica, plásticos, baterías.</p>	<p>Eliminación de Pb de aguas residuales producto de la fabricación de baterías, a través de dos mecanismos adsorción y precipitación, con el componente principal del cascarón de huevo que es el carbonato de calcio (Soares <i>et al.</i>, 2016).</p>
<p>Metales ligeros</p> <p>Al³⁺, Fe²⁺ y Zn²⁺</p>	<p>Eliminación de Al³⁺, Fe²⁺ y Zn²⁺ mediante la aplicación de diversos tamaños de cascarón de huevo, dando excelentes resultados en mezclas que contenían los tres metales (Pettinato <i>et al.</i>, 2015).</p>
<p>Fluoruro</p> <p>Contaminante inorgánico tóxico presente en la naturaleza, de riesgo significativo para la salud humana. El agua con F⁻ es altamente endémica. De acuerdo con la OMS el límite máximo permitido en agua potable es de 1.5 mg/L.</p>	<p>La adsorción de F⁻ con el polvo de cascarón de huevo fue exotérmica y espontánea, se puede usar para la eliminación de F⁻ de las soluciones acuosas y del agua subterránea (Bhaumik <i>et al.</i>, 2012).</p>

3 JUSTIFICACIÓN CONTEXTUAL Y CIENTÍFICA

El desarrollo acelerado de la reurbanización y las numerosas descargas de aguas residuales industriales producidas por los municipios del centro de la entidad, se desechan sin que exista un debido control, medición, o algún tipo de tratamiento. Esta práctica ha afectado significativamente el abastecimiento de agua potable para uso y consumo humano, tanto en cantidad como calidad. Diferentes estudios fisicoquímicos del agua de uso y consumo humano, realizados previamente en los municipios de Toluca, Metepec y Capulhuac, en el Estado de México, han demostrado deficiencia de Ca^{2+} y Mg^{2+} , así como la presencia de cloro residual crudo (generado *in situ* por reacciones óxido-reducción). Indicando cambios drásticos y continuos de la calidad del agua subterránea, debido a actividades antropogénicas que descargan residuos con alto contenido de nutrientes: nitratos, nitritos, amonio y fosfatos, que coadyuvan a la disolución de minerales, pudiendo incorporar arsénico o metales pesados al agua. Es importante considerar que la disolución de minerales a consecuencia de la infiltración del agua residual, también afecta la cantidad del agua. Esto inicia con la disminución del flujo de extracción hasta llegar al colapso del pozo.

Recientemente, la calidad del agua del pozo de la Unidad Académica “El Rosedal”, era desconocida, sin embargo se observó deterioro de su infraestructura, por lo que se pudo inferir la presencia de sustancias que generaron corrosión; especies nitrogenadas, fosfatadas, especies tóxicas como metales pesados, que interfieren en la alcalinidad y acidez del agua.

Sabiendo que estos agentes pueden provocar daños a la salud, enfermedades intestinales, renales, cáncer y otras patologías, en el presente proyecto se realiza la caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua y posteriormente la implementación de la barrera química. Con la finalidad de que las descargas de aguas residuales de las comunidades de San Marcos y Sebastián Lerdo de Tejada, no continúen afectando la calidad microbiológica y fisicoquímica del agua. La aplicación de la barrera química alcalina ofrece una solución a mediano plazo, de bajo costo, que consiste en una mezcla de materiales inocuos con elevada concentración de calcio y magnesio que promueven la precipitación, adsorción, y complejación de los productos de la degradación de la materia orgánica e inorgánica proveniente de aguas residuales.

4 HIPÓTESIS

La barrera química es una mezcla de materiales inocuos como el cascarón de huevo, óxido de calcio y óxido de magnesio, aplicada a nivel del suelo en pozos de abastecimiento. Con una elevada concentración de calcio y magnesio se promueve la precipitación, adsorción, y complejación de contaminantes, producto de la degradación de materia orgánica e inorgánica proveniente de aguas residuales.

5 OBJETIVOS

5.1 General

Modificar la calidad microbiológica y fisicoquímica del agua del pozo A027 que abastece la unidad académica del Rosedal, a través de la implementación de una barrera química alcalina a base de cascarón de huevo, óxido de calcio y óxido de magnesio, con la finalidad de evitar la incorporación de productos de la degradación de la materia orgánica e inorgánica proveniente de aguas residuales.

5.2 Específicos

- a) Ubicar el área de estudio del pozo de abastecimiento de agua y la fuente de contaminación. Mediante el uso de imágenes que puedan describir las condiciones naturales y antropogénicas que impacta en la calidad del agua de abastecimiento.
- b) Evaluar la calidad del agua con base a la NOM-127-SSA1-2000, en la época de estiaje.
- c) Dimensionar e implementar la barrera química, a base de cascarón de huevo, óxido de calcio y óxido de magnesio.
- d) Estimar la remoción de nutrientes y agentes contaminantes que se pueden disminuir con la barrera química, con base a los resultados del análisis fisicoquímico y microbiológico, así como cálculos estequiométricos.
- e) Verificar el efecto de la barrera química en la calidad del agua del pozo, después de la época de recarga.
- f) Determinar la eficiencia y tiempo de vida de la barrera química implementada en el pozo A027 de la unidad académica “El Rosedal”.

6 METODOLOGÍA

El desarrollo del proyecto permitió evaluar la calidad del agua del pozo UAEM A027, antes y después de la aplicación de la barrera química, mediante los siguientes procesos (figura 5):

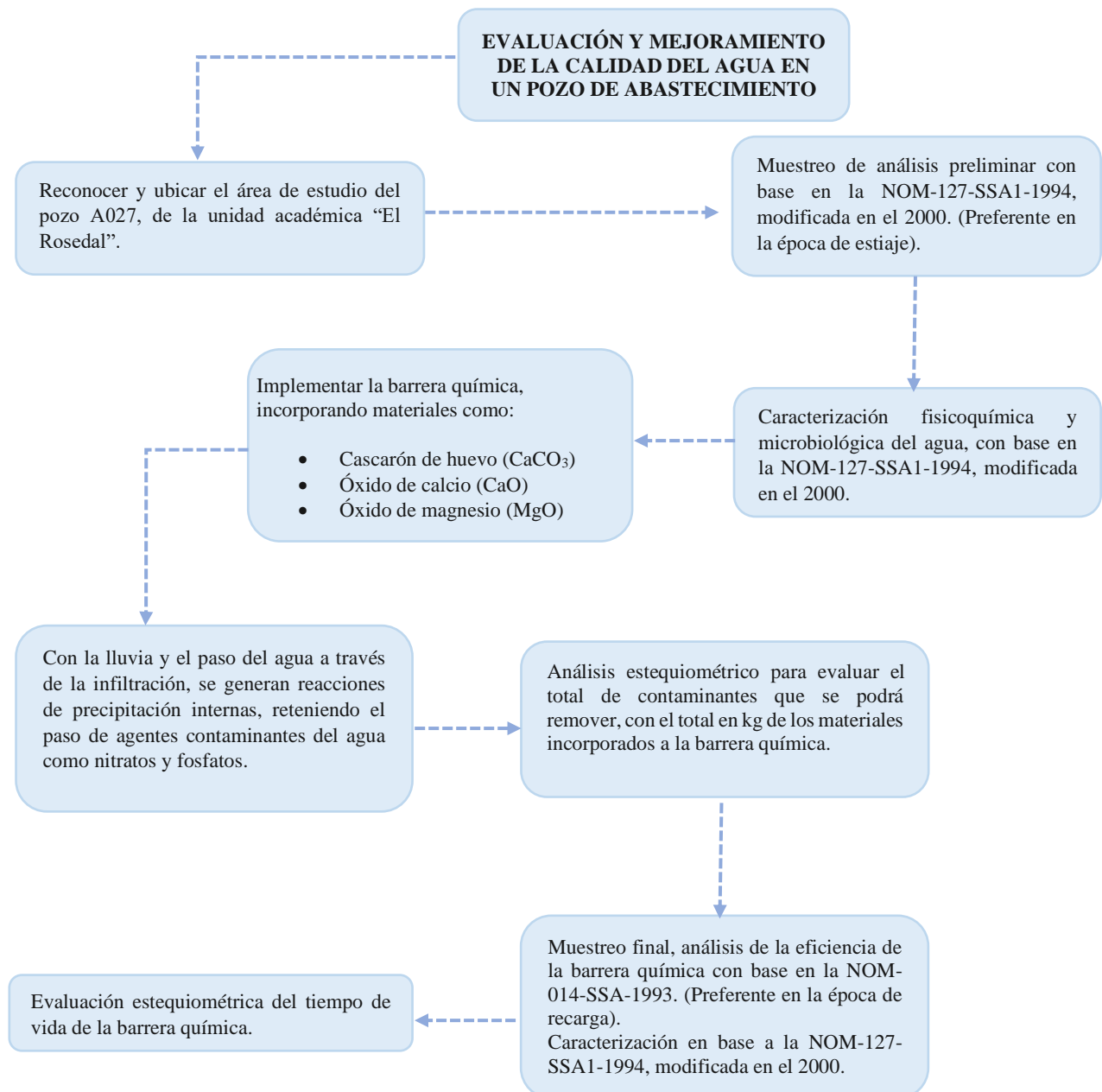


FIGURA 5. DIAGRAMA DE LA METODOLOGÍA GENERAL

6.1 Ubicación del área de estudio

La Unidad Académica “El Rosedal” se ubica en la zona norte del municipio de Toluca, colinda con San Cayetano de Morelos, Santa Juana y Sebastián Lerdo de Tejada. Esta última, se encuentra aproximadamente a 100 m de donde se sitúa el pozo A027.

El pozo presenta una profundidad 50 m y una superficie aproximada de construcción de 72.6 m²; abastece a los Centros de Investigación, la Facultad de Turismo y Gastronomía, Centro Infantil de Rehabilitación con Asistencia Canina (CIRAC), Centro de Investigación en Química Sustentable UAEM - UNAM (CIQS), Centro de Investigación y Estudios Avanzados en Salud Animal (CIESA), Centro de Investigación de Recurso Bióticos (CIRB), Centro de Investigación en Ciencias Biológicas Aplicadas y al Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA). Se ubica geográficamente a 99° 43' 30.07" O, 19° 23' 23.24" N, a una altura de 2,618 msnm (INEGI, 2019d).

6.2 Muestreo y análisis de parámetros

Se establecieron dos campañas de muestreo preferentes en la época de estiaje y de recarga con base en la (NOM-014-SSA1-1993), además un muestreo posterior a la incorporación de la barrera química, obteniendo análisis fisicoquímicos y microbiológicos del agua del pozo A027 con base en la norma (NOM-127-SSA1-1994, 2000).

6.3 Análisis fisicoquímicos

Los parámetros analizados están definidos por la NOM-127-SSA1-1994, modificada en el 2000, los resultados describen la calidad del agua que se extrae del pozo A027 del Rosedal, tabla 4.

TABLA 4 NORMAS MEXICANAS Y MÉTODOS DE ANÁLISIS PARA LA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS

Parámetro	Norma
Aluminio	NOM-117-SSA1-1994
Arsénico	NOM-117-SSA1-1994
Bario	IDO-1066
Cadmio	NOM-117-SSA1-1994
Cianuros	MON-201-SSA1-2002
Cloro libre residual <i>in situ</i>	Estuche analizador colorimétrico
Cloruros	NMX-F-532-1992
Cobre	NOM-117-SSA1-2004
Cromo total	NOM-117-SSA1-2004
Dureza total	NMX-F-517-1992
Fenoles	NMX-AA-050-SCFI-2001
Fierro	NOM-117-SSA1-2004
Fluoruros	NOM-201-SSA1-2002
Manganeso	IDO-1066
Zinc	NOM-117-SSA1-2004
Nitrógeno de Nitratos	NOM-201-SSA1-2002
Nitrógeno de Nitritos	NOM-201-SSA1-2002
Nitrógeno Amoniacal	IDO-2026
pH 19° C <i>in situ</i>	NMX-F-534-1992
Plomo	NOM-117-SSA1-2004
Sodio	SM 3500 Na-D-1992

Parámetro	Norma
Sólidos Disueltos Tot.	NMX-F-527-1992
Sulfatos	NMX-F-518-1992
Detergentes (S.A.A.M)	NOM-201-SSA1-2002
Olor	Sensorial
Sabor	Sensorial
Color (Platino Cobalto)	NOM-201-SSA1-2002
Turbiedad	NOM-201-SSA1-2002
Alcalinidad total	NMX-F-533-1992
Acidez total	NMX-AA-036-SCFI-2001
Sílice Soluble	IDO-2019
Calcio	NMX-F-517-1992
Magnesio	NMX-F-517-1992
Potasio	SM 3500 K-D-1992
Fosfatos	NMX-AA-029-SCFI-2001
Fósforo	NMX-AA-029-SCFI-2001
Benceno	C.G
Etil Benceno	C.G
Tolueno	C.G
Xileno	C.G
Coliformes Totales	NOM-112-SSA1-1994
Coliformes Fecales	NOM-112-SSA1-1994

7 RESULTADOS

7.1 Ubicación del área de estudio

El campus universitario “El Rosedal” se ubica en la zona norte del municipio de Toluca, perteneciente a la localidad Rancho el Rosedal, colinda con San Cayetano de Morelos, Santa Juana, Sebastián Lerdo de Tejada, esta última se encuentra cerca del pozo A027 que abastece a los centros de investigación y facultades de la UAEMex en la región.

Sebastián Lerdo de Tejada se ubica geográficamente a 99° 43' 31.0" O, 19° 23' 23.0" N, a una altura de 2,620 msnm (INEGI, 2019b). Se ubica en una planicie, con un suelo fértil de tipo vertisol; su nombre, se refiere a los constantes movimientos internos del material del suelo, significa que al ser removido genera cambios en su composición orgánica por su alto contenido de arcilla en los primeros 20 cm de profundidad.

7.1.1 Características sociales de la localidad Sebastián Lerdo de Tejada

Sebastián Lerdo de Tejada crece en las afueras del municipio de Toluca, donde las comunidades por su lejanía céntrica presentan un alto nivel de marginación y un rezago social importante según datos de (SEDESOL, 2013). Esta condición poblacional pone en riesgo los recursos naturales con los que cuenta la región, pues la falta de servicios públicos como el drenaje o plantas de tratamiento de aguas residuales, obligan a la comunidad a desechos las aguas crudas de manera directa sobre los cuerpos de agua cercanos, que anteriormente eran el paso del agua limpia extraída del pozo A027 para distribuirse a los hogares y usarse en época de riego. Actualmente, la falta de manejo de las aguas residuales ha propiciado altos niveles de contaminación al suelo, la vegetación y fauna endémica del área.

La tabla 5 presenta datos del crecimiento poblacional del municipio de Toluca y la localidad de Sebastián Lerdo de Tejada. Se tienen datos poblacionales de 20 años atrás que permiten apreciar cómo se ha ido desarrollando la periferia del municipio.

TABLA 5. DATOS POBLACIONALES DE LA COMUNIDAD DE SEBASTIÁN LERDO DE TEJADA

Municipio de Toluca de Lerdo	% de crecimiento	Año	Comunidad de Sebastián Lerdo de Tejada	% de crecimiento
487, 612 hab.	-	1990	-	-
-	-	1995	1050 hab.	-
666, 596 hab.	36 %	2000	1438 hab.	36%
-	-	2005	1561 hab.	8%
819, 561 hab.	22 %	2010	1673 hab.	7%
873, 536 hab.	6 %	2015	1773 hab.	6%

Fuente: (INEGI, 2019a) (SEDESOL, 2013). (-) sin datos.

La (figura 6) describe el área de estudio correspondiente al pozo A027, donde se puede observar a corta distancia la ubicación de la comunidad de Sebastián Lerdo de Tejada, aproximadamente 80 - 100 m. El suelo alrededor del pozo es de uso agrícola y de pastoreo; además la zona se encuentra localizada en el paso de las vías del tren a 28 – 32 m de la construcción del mismo.

El pozo de agua que abastece a la Unidad Académica el Rosedal, tiene una profundidad 50 m (valor estimado por los tubos que se reemplazaron) y una superficie aproximada de construcción de 72.6 m². En México, la norma NOM-003-CNA-1996, establece que el área de protección entre el sitio seleccionado para construir un pozo y las fuentes potenciales de contaminación existentes que no pueden ser suprimidas, tendrá un radio mínimo de 30 m, con respecto al pozo. Las fuentes de contaminación citadas por la NOM-003-CNA-1996 podrían ser: alcantarillado sanitario, campos de percolación, canales de agua residual, cloacas, depósitos de jales, fosas sépticas, gasolineras y depósitos de hidrocarburos, lechos de absorción, letrinas, rastros, rellenos sanitarios, ríos y causes con aguas residuales provenientes de agricultura, uso agroindustrial, doméstico, acuacultura, industrial, pecuario, público urbano y servicios. Sin embargo se ha observado contaminación e infiltración de aguas residuales, en pozos que exhiben distancias tanto menores como mayores.

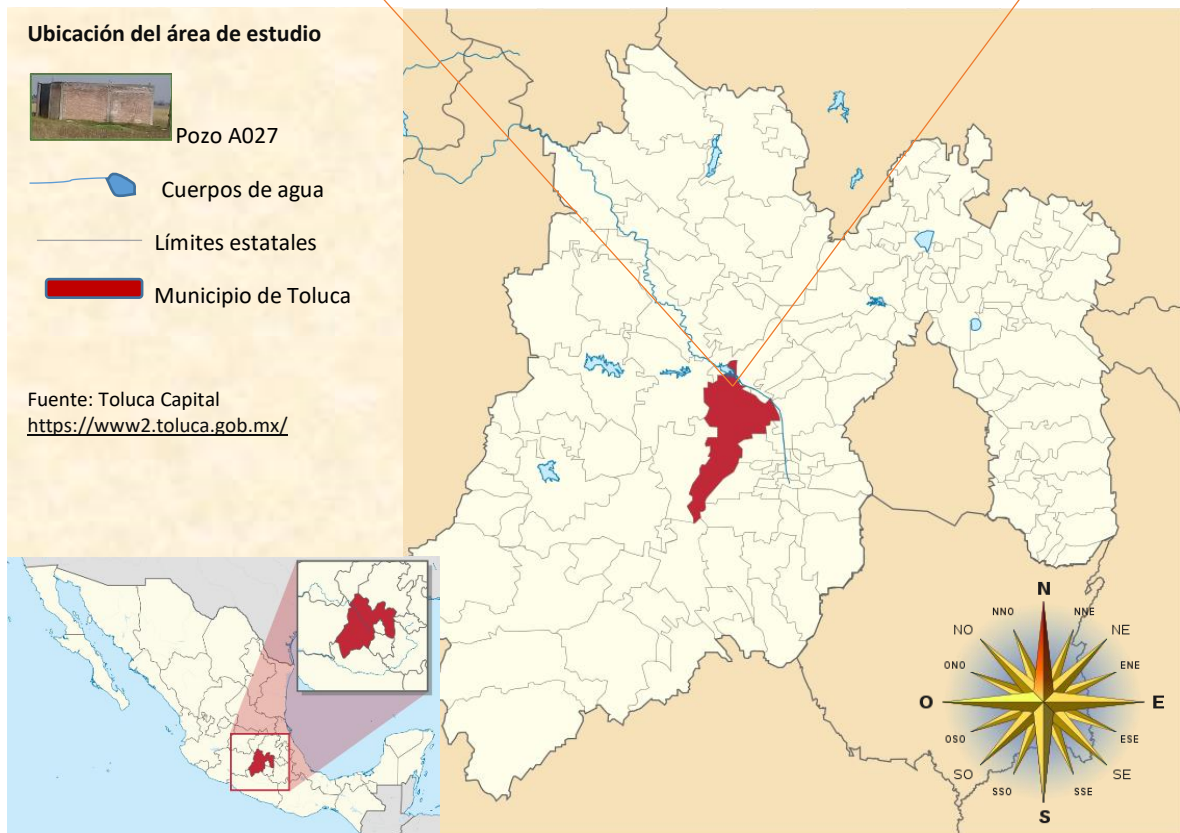


FIGURA 6. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La población en esta zona no cuenta con servicio de drenaje ni alcantarillado, la salida de sus aguas residuales son contiguas a la ubicación del pozo, que pasan por una zanja en torno a la comunidad recibiendo las descargas directas de las casas habitación y una nave industrial que aparentemente es un depósito de material de construcción (figura 7).



FIGURA 7. ZANJAS DE DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES DE LA COMUNIDAD DE SEBASTIÁN LERDO DE TEJADA

A 50 m de distancia se ubica un pequeño cuerpo de agua que recibe también las aguas cloacales de la comunidad (figura 8).



FIGURA 8. CUERPO COLECTOR DE AGUAS RESIDUALES, UBICADO A 28 M DEL POZO A027

El pozo se encuentra a 28 m de las vías del tren, por debajo de su construcción se localiza el tubo de paso de la zanja del agua contaminada. Es el principal factor del transporte de nutrientes y otros contaminantes que se infiltran en el acuífero de donde se extrae el agua del pozo A027, al estancarse en el área contigua a la construcción del mismo (figura 9).

En la época de estiaje es muy común ver que las áreas por donde corre el agua están llenas de vegetación como algas, lirios y tule, flora característica de las aguas con alto contenido de nutrientes. Es importante destacar que el agua además de fluir o almacenarse sobre el cuerpo de agua, también se va infiltrando hasta llegar al manto freático, de donde se extrae el agua del pozo A027 que surte la unidad académica del Rosedal (figura 10).



FIGURA 9. PASO DEL AGUA RESIDUAL DE LA COMUNIDAD DE SEBASTIÁN LERDO DE TEJADA, AL TERRENO DONDE SE UBICA EL CAMPUS UNIVERSITARIO "EL ROSEDAL"



FIGURA 10. A) PASO DEL AGUA A TRAVÉS DE LAS VÍAS DEL TREN, B) AGUA ESTANCADA ALREDEDOR DEL POZO

7.1.2 Características generales del acuífero donde se ubica el pozo A027

El 38.7% del agua que es utilizada en el país, proviene de las aguas subterráneas, fluye en forma permanente en el subsuelo y eventualmente sale a la superficie de manera natural, también puede dirigirse artificialmente a pozos, galerías y otros tipos de captaciones (IMTA, 2020).

El área de estudio pertenece al acuífero del Valle de Toluca, en la zona norte del estado de México, forma parte de la Cuenca Alta del Río Lerma junto con el Valle de Ixtlahuaca, su potencial de extracción ha sido superado por la exportación de grandes volúmenes mediante el sistema de pozos Lerma (CONAGUA, 2018b). Los acuíferos subterráneos, son el recurso hídrico más importante para la vida, sin embargo se deben tomar precauciones pues las aguas subterráneas no son inmunes a la contaminación ni tampoco inagotables (Gárfias *et al.* 2008).

El agua subterránea, en las áreas rurales siempre ha sido un recurso importante que frecuentemente se ve amenazado por la contaminación y las ciudades superpuestas (Zendehbad *et al.* 2019). En el caso del pozo A027 situado cerca de comunidades sin servicios públicos como drenaje y alcantarillado, se reconoce el proceso de infiltración de nitratos y fosfatos a través de la mineralización natural de fertilizantes y aguas residuales, principalmente el contenido de urea por desechos humanos. En la (figura 11) se puede apreciar la vista aérea del área de estudio.



FIGURA 111. VISTA AÉREA DEL ÁREA DE ESTUDIO

7.1.3 Caracterización fisicoquímica y microbiológica del pozo A027

El primer muestreo fue realizado el 13 de mayo de 2019, durante la época de estiaje. En las tablas 6-10, se muestran los valores obtenidos en la caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua que se extrae del pozo que abastece a la unidad académica “El Rosedal” (Pozo A027), realizada con base a la (NOM-127-SSA1-1994, 2000) y parámetros fisicoquímicos complementarios que no están normados, sin embargo, permiten tener una mejor comprensión de la fisicoquímica del agua y de los procesos de incorporación.

Los resultados muestran que el agua cumple con la calidad fisicoquímica establecida en la (NOM-127-SSA1-1994, 2000), sin embargo, existe presencia de materia microbiológica (coliformes totales y fecales), especies nitrogenadas como nitritos, nitrógeno amoniacal, cianuros, fosfatos, sílice disuelta y baja concentración de sulfatos y cloruros, indicativos de la infiltración de agua residual municipal y/o agrícola.

TABLA 6. CARACTERÍSTICAS ORGANOLÉPTICAS Y FÍSICAS DEL PRIMER MUESTREO EN EL POZO A027

Parámetro	Resultado	Límites máximos permisible	Unidades	Dictamen
Olor	Agradable	Agradable	Adimensional	Si cumple
Sabor	Agradable	Agradable	Adimensional	Si cumple
Color (Platino Cobalto)	<3.0	20	U Pt-Co	Si cumple
Turbiedad	<0.5	5	UNT	Si cumple

TABLA 7. CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DEL PRIMER MUESTREO EN EL POZO A027

Parámetro	Resultado mg/L	Límites máximos permisible en mg/L
Aluminio	<0.004	0.20
Arsénico	<0.002	0.025
Bario	<0.3	0.70
Cadmio	<0.002	0.005
Cianuros	0.044	0.07
Cloro libre residual in situ	<0.2	0.2-1.50
Cloruros	3.0	250.00
Cobre	<0.1	2.00
Cromo total	<0.002	0.05
Dureza total (como CaCO ₃)	156.5	500.00
Fenoles	<0.01	0.3
Hierro	<0.1	0.30
Fluoruros	0.358	1.50
Manganeso	<0.1	0.15
Zinc	<0.1	5.00
Nitrógeno de Nitratos	<0.1	10.0
Nitrógeno de Nitritos	0.012	1.00
Nitrógeno Amoniacal	0.16	0.50
pH 19° C <i>in situ</i>	7.75	6.5-8.5
Plomo	<0.005	0.01
Sodio	36	200.00
Sólidos Disueltos Totales	315	1000
Sulfatos	9.3	400.00
Detergentes (SAAM)	0.1	0.50

TABLA 8. CARACTERÍSTICAS FISCOQUÍMICAS COMPLEMENTARIAS DEL PRIMER MUESTREO DEL POZO A027

Parámetro	Resultado	Límites máximos permisible	Unidades	Dictamen
Alcalinidad total	226.6	N/A	mg/L CaCO ₃	N/A
Acidez total	7.10	N/A	mg/L CaCO ₃	N/A
Sílice Soluble	97.5	N/A	mg/L Si	N/A
Calcio	28.83	N/A	mg/L Ca	N/A
Magnesio	22.34	N/A	mg/L Mg	N/A
Potasio	12.5	N/A	mg/L K	N/A
Fosfatos	<1.3	N/A	mg/L PO ₄ ³⁻	N/A
Fósforo	<0.3	N/A	mg/L P	N/A

N/A = No Aplica

TABLA 9. RESULTADOS DE HIDROCARBUROS AROMÁTICOS DEL PRIMER MUESTREO DEL POZO A027

Parámetro	Resultado	Límites máximos permisible µg/L
Benceno	N.D	10.00
Etil Benceno	N.D	300.00
Tolueno	N.D	700.00
Xileno	N.D	500.00

N.D = No Detectado

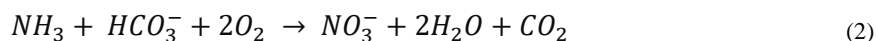
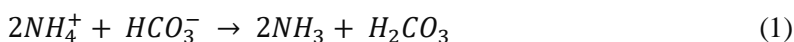
TABLA 10. RESULTADOS DE MICROBIOLÓGICOS DEL PRIMER MUESTREO DEL POZO A027

Parámetro	Resultado NMP/100mL (NMP/100cm ³)	Límites máximos permisible
Coliformes Totales	8	Ausencia o N.D.
Coliformes Fecales	1.1	Ausencia o N.D.

N.D = No Detectado

Los resultados muestran dos escenarios a considerar el primero es que, debido a la presencia de coliformes totales (8 NMP/100mL) y coliformes fecales (1.1 NMP/100 mL), se recomienda se lleve a cabo el proceso de desinfección, pues el agua abastece al campo universitario “El Rosedal” donde se encuentra las instalaciones de los centros de investigación de la UAEMex. Adicionalmente, se recomienda programar la limpieza de las cisternas periódicamente, debido a que el agua es almacenada por periodos mayores a dos días sin ningún proceso de desinfección, favoreciendo la reproducción bacteriana.

El segundo escenario muestra la existencia de especies nitrogenadas como nitritos (0.012 mg/L), nitrógeno amoniacal (0.16 mg/L) y cianuros (0.044 mg/L). Los nitritos provienen de una oxidación incompleta del amoníaco o por la reducción de los nitratos (<0.1) a amonio generada por la oxidación de los iones cloruros (3 mg/L) (Fonseca-Montes de Oca *et al.*, 2019). Lo que explica la baja concentración de los iones cloruros y la presencia de nitrógeno amoniacal (0.16 mg/L). El agua contaminada es uno de los principales problemas ambientales y el nitrato es uno de los iones más comunes encontrados en el agua subterránea (Rodríguez-Alvarez *et al.*, 2017). Las siguientes ecuaciones 1-2 muestran las reacciones oxido reducción:



La literatura muestra que las aguas naturales no contienen cianuros, su contenido en el agua es resultado de procesos industriales en la minería, sedimentos que permanecen en el agua residual y pueden migrar hasta el agua subterránea, incluso después de someterse a tratamiento primario y secundar (Ramírez, 2011; An *et al.*, 2018). Los peces y biota son sensibles a concentraciones mayores a 0.1 mg/L. La presencia de cianuros no es tolerable en agua de uso y consumo humano a concentraciones superiores a 0.05 mg/L, la concentración de cianuros detectada en el agua del pozo A027 es de 0.044 mg/L.

En 1998, las normas internacionales consideraban que la presencia de cianuros no debería tolerarse en el agua de uso y consumo humano en dosis superiores a 0.05 mg/L, este valor fue tomado por las normas europeas, mientras que la reglamentación francesa indica que el agua no debe contener cianuro en absoluto. En los Estados Unidos de Norte América el criterio deseable se fijó en 0.01 mg/L (Rodier, 1998). Actualmente la (OMS, 2011) establece su valor de referencia en 0.07 mg/L, se

considera que ofrece protección a la exposición tanto breve como prolongada, considerando su presencia ocasionalmente en el agua de consumo y que su ingesta mínima no es tóxica para el hombre.

Lo anterior, indica la importancia de conocer el proceso por medio del cual se incorporan los iones cianuro al agua que se extrae del pozo A026, debido a que no existe en apariencia algún establecimiento industrial que use cianuro como parte de sus procesos; aunque su presencia en el agua también es causada por hongos, algas y bacterias (ATSDR, 2019).

La concentración de fosfatos como fósforo fue de 0.3 mg/L muestra la posible infiltración del agua residual municipal y/o agrícola, que proviene de detergentes, materia orgánica en proceso de descomposición, plaguicidas y fertilizantes fosfatados.

Debido a que los fosfatos forman parte de los aniones fácilmente fijados por el suelo, su presencia en las aguas naturales se debe a los terrenos por los que fluye y la descomposición de la materia orgánica. Este valor es superior a la concentración crítica de los procesos de eutrofización que se observa en concentración 0.1-0.2 mg/L P-PO₄³⁻, en agua en movimiento y en agua almacenada a 0.005 - 0.01 mg/L P-PO₄³⁻ (AEMA, 2015). Sin embargo, algunos autores reportan concentraciones por arriba de 500 mg/L P-PO₄³⁻ que son descargadas a cuerpos de aguas superficiales.

Por otro lado se observa una baja concentración de sulfatos (9.3 mg/L), posiblemente por la disminución de su disolución por la presencia de N y P. De acuerdo a lo reportado por (Gárfias et al., 2010) se puede inferir que la presencia los sulfatos está relacionada con la concentración calcio, magnesio y bicarbonato, de ahí que se hayan encontrado también bajas concentraciones de calcio y magnesio. Además, (Rodier, 1998) indica que las aguas naturales presentan una concentración entre 30 y 50 mg/L de sulfatos y el límite permisible establecido por la (OMS, 2011) es de 250 mg/L.

El alto contenido de sílice disuelta (97.5 mg/L), no debe exceder a 20 mg/L (Rodier, 1998), su presencia está relacionada con la presencia de polifosfatos en el agua. El contenido de sílice en el agua ha sido poco estudiado y se carece de información que indique cuales son los mecanismos de incorporación al agua en terrenos no graníticos. De acuerdo con las investigaciones de (Maguire and Fulweiler, 2019), la influencia humana en el ciclo global del silicio (Si) incluyen el cambio del uso de la tierra, la deforestación y la descarga de aguas residuales.

7.2 Cálculos estequiométricos de la barrera química

La tabla 11 muestra los materiales y reactivos utilizados en la construcción de la barrera química. Para ello se aplicó 1 tonelada de cascarón de huevo triturado, se sabe que este contiene el 96% como carbonato de calcio. Además se adicionaron 2225 kg de óxido de calcio (90% pureza) y 1000 kg de óxido de magnesio (83.52% de pureza) grado industrial.

TABLA 11. MATERIALES Y REACTIVOS QUE COMPONEN LA BARRERA QUÍMICA

Componente natural 96 % CaCO_3	Cantidad (kg)	Reactivos químicos	Cantidad (kg)
Cascarón de huevo	1000 kg	Óxido de Calcio	2225 kg
		Óxido de Magnesio	1000 kg

7.2.1 Cálculo para remoción de fosfato con cascarón de huevo

Uno de los principales compuestos de la barrera química es el cascarón de huevo, el 96 % de su composición es carbonato de calcio CaCO_3 , dada esta propiedad es un agente ideal para adsorber el excedente de nutrientes que se encuentran en el suelo, evitando su paso hasta los mantos freáticos, mejorando así su calidad para uso y consumo.

El fosfato de calcio es el resultado de la precipitación de iones fosfato, con el calcio proveniente del cascarón y óxido de calcio, dando como resultado $(\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2)$. Los valores estimados de retención de nutrientes como fosfatos se presenta mediante el siguiente proceso estequiométrico, ecuación 3-4:

$$1000 \text{ kg} | 0.96 \text{ CaCO}_3 | = 960 \text{ kg CaCO}_3 \quad (3)$$

$$960 \text{ kg CaCO}_3 = \left| \frac{1 \text{ Kmol CaCO}_3}{100 \text{ kg CaCO}_3} \right| \left| \frac{1 \text{ Kmol Ca}^{2+}}{1 \text{ Kmol CaCO}_3} \right| \left| \frac{2 \text{ Kmol PO}_4^{3-}}{3 \text{ Kmol Ca}^{2+}} \right| \left| \frac{95 \text{ kg PO}_4^{3-}}{1 \text{ Kmol PO}_4^{3-}} \right| = 608 \text{ kg PO}_4^{3-} \quad (4)$$

El resultado indica que de los 1000 kg de cascarón incorporados en la zanja, se podrán aprovechar 960 kg de CaCO_3 , con los que se pueden remover hasta 608 kg de fosfatos PO_4^{3-} .

7.2.2 Cálculo para remoción de fosfato PO_4^{3-} con óxido de calcio (CaO)

A la barrera química se le integró como agente precipitante, óxido de calcio (CaO), se establece una relación estequiométrica entre el CaO y el PO_4^{3-} , tomando un adicional de 0.90 que representa la pureza del material incorporado. Para conocer la cantidad de fosfato que se podrá remover a través de la reacción de precipitación que se genere con la acción exotérmica de la barrera.

$$2225 \text{ kg CaO} = \left| \frac{1 \text{ Kmol CaO}}{56 \text{ kg CaO}} \right| \left| \frac{1 \text{ Kmol Ca}^{2+}}{1 \text{ Kmol CaO}} \right| \left| \frac{2 \text{ Kmol PO}_4^{3-}}{3 \text{ Kmol Ca}^{2+}} \right| \left| \frac{95 \text{ kg PO}_4^{3-}}{1 \text{ Kmol PO}_4^{3-}} \right| 0.90 = 2264 \text{ kg PO}_4^{3-} \quad (5)$$

De los 2225 kg de óxido de calcio incorporado en la zanja, se pueden remover aproximadamente 2264 kg de fosfatos PO_4^{3-} en una proporción ideal de ambos agentes.

7.2.3 Cálculo para remoción de PO_4^{3-} y NH_4^+ con óxido de magnesio (MgO)

La adición de óxido de magnesio a la barrera química en la ecuación 6-9, permite estimar la relación estequiométrica entre el MgO con PO_4^{3-} y MgO con NH_4^+ , tomando un adicional de 0.8352 que representa la pureza del material incorporado. Para conocer la cantidad de fosfato y amonio que se pueda remover a través de la reacción de precipitación que se genere con la acción exotérmica de la barrera.

$$Mg \text{ NH}_4\text{PO}_4^{3-} = Mg \text{ 24} + NH_4 \text{ 18} + PO_4^{3-} \text{ 95} = 137 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \quad (6)$$

Para conocer el peso molecular del MgO se desarrolla la siguiente ecuación (7):

$$PM_{MgO} = Mg \text{ 24} + O \text{ 16} = 40 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \quad (7)$$

El resultado se aplica en el cálculo estequiométrico de la ecuación (8), para conocer el total de PO_4^{3-} y de NH_4^+ que se puede remover.

$$1000 \text{ kg MgO} = \left| \frac{1 \text{ Kmol MgO}}{40 \text{ kg MgO}} \right| \left| \frac{1 \text{ Kmol Mg}^{2+}}{1 \text{ Kmol MgO}} \right| \left| \frac{1 \text{ Kmol PO}_4^{3-}}{1 \text{ Kmol Mg}^{2+}} \right| \left| \frac{95 \text{ kg PO}_4^{3-}}{1 \text{ Kmol PO}_4^{3-}} \right| 0.8352 = 1983.6 \text{ kg PO}_4^{3-} \quad (8)$$

$$1000 \text{ kg MgO} = \left| \frac{1 \text{ Kmol MgO}}{40 \text{ kg MgO}} \right| \left| \frac{1 \text{ Kmol Mg}^{2+}}{1 \text{ Kmol MgO}} \right| \left| \frac{1 \text{ Kmol NH}_4^+}{1 \text{ Kmol Mg}^{2+}} \right| \left| \frac{18 \text{ kg NH}_4^+}{1 \text{ Kmol NH}_4^+} \right| 0.8352 = 375.8 \text{ kg NH}_4^+ \quad (9)$$

La cantidad de 1000 kg de óxido de magnesio incorporados en la zanja, puede remover alrededor de 1983.6 kg de PO_4^{3-} y 375.84 kg de NH_4^+ en una proporción ideal.

7.3 Dimensión e implementación de la barrera química

El desarrollo de una barrera química implica tres procesos: la excavación de la zanja, la incorporación del cascarón de huevo y los reactivos químicos, al final, la barrera se cierra y la reacción entre agentes se desarrolla internamente al paso de las lluvias e infiltración del agua residual. Desencadena una reacción exotérmica, permitiendo la precipitación, adsorción y complejación de los elementos y reteniendo el paso de los contaminantes que se encuentren como excedentes en el suelo.

7.3.1 Excavación de la zanja

La barrera química, fue realizada el 30 de mayo del 2019, se colocó circundante al pozo A027 de la UAEMex. El perímetro de excavación es de 14 m de largo por 11 de ancho, (figura 12 a-b).

La zanja donde se depositan los materiales tiene un ancho de 80 cm y una profundidad de 1m.

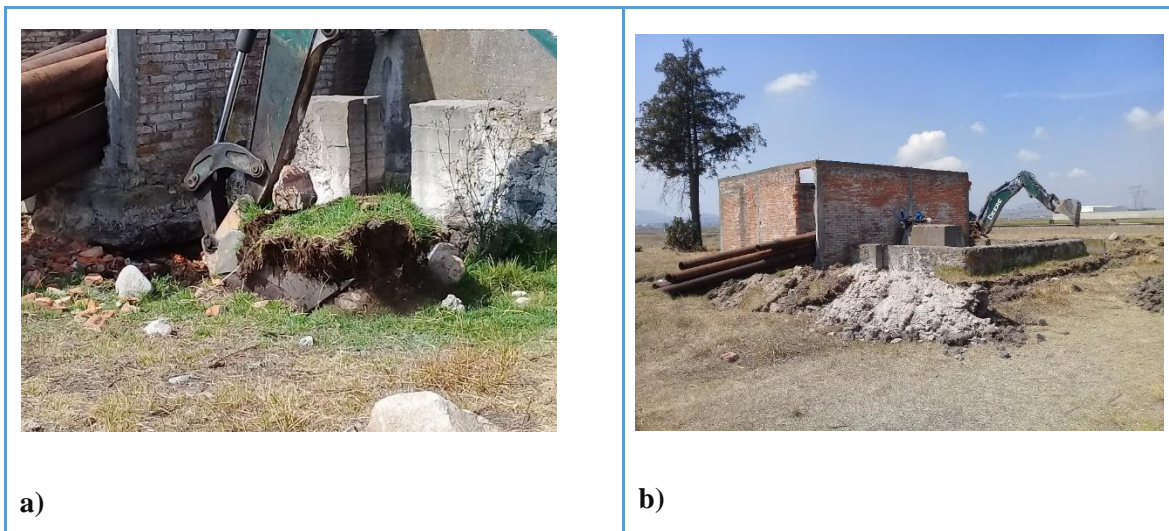


FIGURA 122. A) Y B) PROCESO DE EXCAVACIÓN DE LA ZANJA EN EL POZO A027

7.3.2 Incorporación del cascarón de huevo

El cascarón de huevo fue el primero en integrarse a la zanja, debido a que su capacidad de adsorción es inmediata una vez que reacciona con la filtración del agua.

Se debe incorporar triturado, así se aprovecha al máximo su capacidad de adsorción. Fue distribuido de manera uniforme alrededor de la barrera química, (figura 13 a-b).

Su principal componente es el CaCO_3 se estima que al precipitarse se convierte en $(\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2)$, permitiendo disminuir la cantidad de fosfato que se infiltra a los mantos acuíferos a través del agua, ya sea agua residual o de lluvia que arrastra sedimentos con este material.



FIGURA 133 A) Y B) INCORPORACIÓN DEL CASCARÓN DE HUEVO EN LA ZANJA CIRCUNDANTE AL POZO A027

7.3.3 Aplicación de los reactivos químicos CaO y MgO

Los reactivos químicos fueron aplicados el 15 de julio de 2019, posterior a este proceso la barrera se cubrió nuevamente, dando paso al proceso interno de alcalinización del suelo.

Los materiales aplicados fueron óxido de calcio 2225 kg y óxido de magnesio 1000 kg, ambos materiales tienen la capacidad de retención de nutrientes (N y P), (figura 14 a-b).

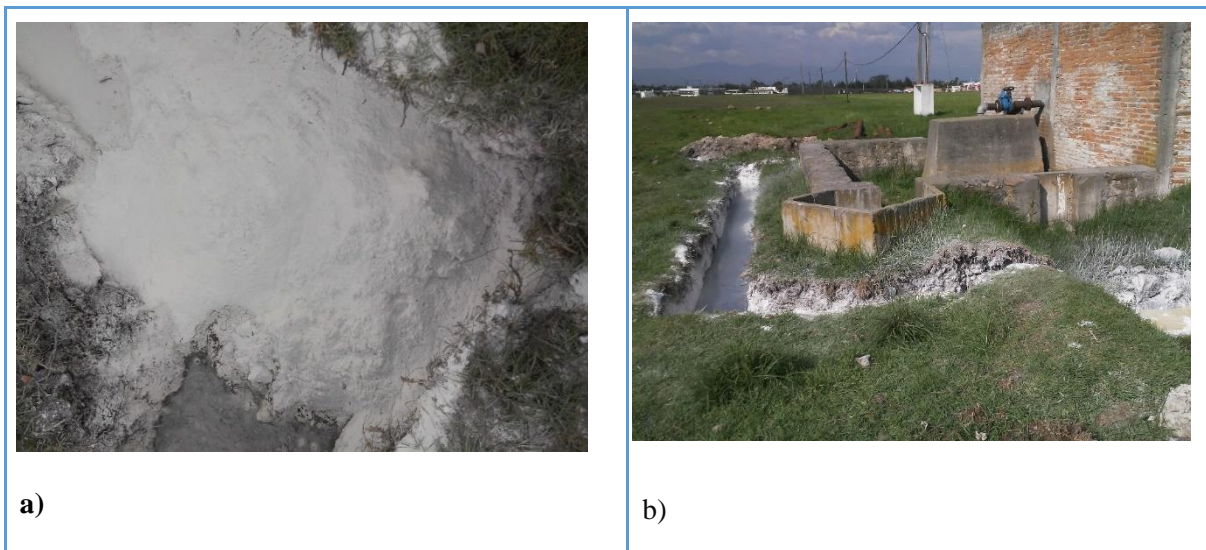


FIGURA 144. A) Y B) INCORPORACIÓN DE LOS REACTIVOS DE ÓXIDO DE CALCIO Y ÓXIDO DE MAGNESIO

Los reactivos químicos fueron distribuidos uniformemente alrededor del pozo, asegurando que toda el área estuviera protegida por la barrera química.

7.4 Evaluación de la barrera química

El primer muestreo del pozo se realizó el 13 mayo 2019 y un segundo muestreo el 4 de noviembre para evaluar la eficiencia de la barrera. Los resultados de ambos muestreos realizados antes (AB) y después (DB) de implementar la barrera química (16 de julio 2019), se presentan en la tabla 12, realizados con base a la (NOM-127-SSA1-1994, 2000) y parámetros fisicoquímicos complementarios que no están normados; sin embargo, aportan información con respecto al comportamiento fisicoquímico y a la infiltración del agua residual sin tratar de las comunidades de San Marcos y Sebastián Lerdo de Tejada.

La tabla 12, presenta los parámetros organolépticos, los cuales están dentro de la norma al presentar un olor y sabor agradable, estos parámetros se mantuvieron estables en ambos muestreos. El color (<3.0) y la turbiedad (<0.5) prevalecen por debajo los límites máximos permisibles establecidos en la (NOM-127-SSA1-1994, 2000).

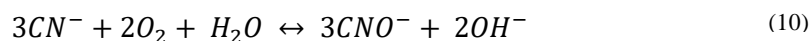
TABLA 12. PARÁMETROS ORGANOLÉPTICOS, ANTES Y DESPUÉS DE LA BARRERA QUÍMICA, EN EL POZO A027

Parámetro	Resultado		Límites máximos permisible	Unidades	Dictamen
	AB	DB			
Olor	Agradable	Agradable	Agradable	Adimensional	Si cumple
Sabor	Agradable	Agradable	Agradable	Adimensional	Si cumple
Color (Platino Cobalto)	<3.0	<3.0	20	U Pt-Co	Si cumple
Turbiedad	<0.5	<0.5	5	UNT	Si cumple

Los resultados muestran que después de la implementación de la barrera química, el agua cumple con la calidad fisicoquímica y microbiológica establecida en la (NOM-127-SSA1-1994, 2000), mostrando que esta tecnología es eficiente además de ser sencilla, económica y amigable con el ambiente.

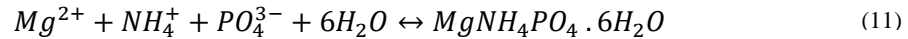
El contenido de cianuros en el agua del pozo en el muestreo DB disminuyó de 0.044 mg/L a <0.02 mg/L, proveniente del agua residual o bien a las reacciones de óxido reducción de la materia nitrogenada y carbonosa, y que migran hasta el agua subterránea, siendo detectadas a bajas concentraciones. La presencia de cianuros no es tolerable en agua de uso y consumo humano a concentraciones superiores a 0.05 mg/L.

Sin embargo, se observa que en presencia de oxígeno y a las condiciones de la barrera, el valor de pH pudo alcanzar valores entre 10.5 y 12.5 en donde los iones CN^- probablemente se oxidan a cianatos, según la ecuación 10 (Pérez and Higuera, 2008).

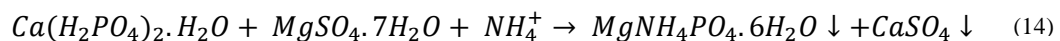
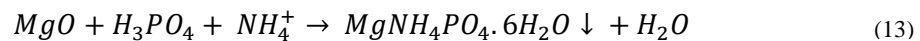
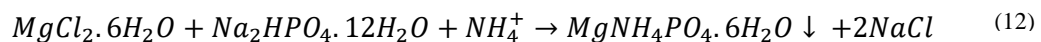


También existe la posibilidad de que la materia nitrogenada en forma de amonio se acompleje con el magnesio y los iones fosfatos, evitando la formación de los iones cianuro, por reacciones de óxido

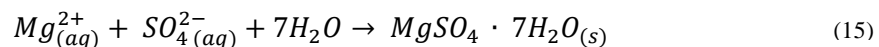
reducción. Se promueve la formación de la estruvita ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$), que es una de las formas más importantes de precipitación del amonio y del fósforo disuelto, la reacción de formación fue propuesta de acuerdo a la ecuación 11 (Martí-Ortega, 2002).



Aún con la cantidad de calcio y magnesio que se incorporaron al suelo a través de la barrera química, la dureza total disminuyó de 156.5 a 143.42 mg/L como $CaCO_3$. Los resultados son similares a los reportados porque muestra la remoción de amonio de lixiviados de rellenos sanitarios por precipitación química, mediante la adición de diferentes agentes químicos que favorecen la formación de estruvita (Li et al., 1999) ecuación 12-14. En el caso de la barrera, se está proponiendo también la formación *in situ* de la estruvita.



Los iones sulfatos al inicio presentan una concentración de 9.3 mg/L y al final de 8.5 mg/L, por lo que de acuerdo a la ecuación 14 y 15, se lleva a cabo la precipitación de estos iones.



Además, existe una ligera disminución de los iones nitritos de 0.012 a 0.01 mg/L de $N-NO_2^-$ posiblemente por la oxidación incompleta del nitrógeno amoniacal, el cual aumentó de 0.16 a 0.45 mg/L de $N-NH_4^+$.

Por otro lado, se observó el incremento de los iones cloruros (3.0 a 4.5 mg/L) y fluoruros de (0.358 a 0.68 mg/L), tabla 13. En caso de los iones cloruros es un efecto positivo debido que la concentración de este ión mayoritario es muy bajo, ya que aguas naturales se tienen valores superiores a los 50 mg/L, sin embargo, en esta última década se han observado valores cada vez más bajos y una inversión salina (Alvarez-Bastida *et al.*, 2013; Fonseca-Montes de Oca *et al.*, 2019). Mientras que el aumento de los fluoruros es un efecto negativo, que no impacta en la calidad fisicoquímica del agua debido a que está por debajo del límite máximo permisible establecido en la (NOM-127-SSA1-1994, 2000), (1.5 mg/L).

Los sólidos disueltos totales en el agua presentó un valor mayor de 315 a 328 mg/L, este valor se encuentra dentro del límite máximo permisible que es de 1000 mg/L.

TABLA 13. CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS ANTES Y DESPUÉS DE LA BARRERA QUÍMICA DEL POZO A027

Parámetro	Resultado mg/L		Límites máximos permisible en mg/L
	AB	DB	
Aluminio	<0.004	<0.004	0.20
Arsénico	<0.002	<0.002	0.025
Bario	<0.3	<0.3	0.70
Cadmio	<0.002	<0.002	0.005
Cianuros	0.044	<0.02	0.07
Cloro libre residual in situ	<0.2	<0.2	0.2-1.50
Cloruros	3.0	4.5	250.00
Cobre	<0.1	<0.1	2.00
Cromo total	<0.002	<0.002	0.05
Dureza total (como CaCO ₃)	156.5	143.42	500.00
Fenoles	<0.01	<0.01	0.3
Fierro	<0.1	<0.1	0.30
Fluoruros	0.3586	0.68	1.50
Manganeso	<0.1	<0.1	0.15
Zinc	<0.1	<0.1	5.00
Nitrógeno de Nitratos	<0.1	<0.1	10.0
Nitrógeno de Nitritos	0.012	0.01	1.00
Nitrógeno Amoniacal	0.16	0.45	0.50
pH 19° C in situ	7.75	7.55	6.5-8.5
Plomo	<0.005	<0.005	0.01
Sodio	36	38	200.00
Sólidos Disueltos Totales	315	328	1000
Sulfatos	9.3	8.5	400.00
Detergentes (S.A.A.M)	<0.1	<0.1	0.50

De los parámetros fisicoquímicos complementarios; la acidez, potasio y calcio, disminuyeron de 7.10 a 5.2 mg/L como CaCO_3 ; de 12.5 a 12.0 mg/L; de 28.83 a 6.32 mg/L, respectivamente, lo que impacta en la disminución del valor del pH de 7.75 a 7.55. Observándose así un efecto positivo en la calidad del agua, debido a que la barrera química alcalina base de calcio y magnesio interacciona con el ácido carbónico, favoreciendo la disminución de la acidez, así mismo, evitando que el contenido de calcio se incremente en el agua, tabla 14.

La alcalinidad se incrementó de 226.6 a 238 como CaCO_3 , este cambio se produjo en el entorno de la barrera a base de calcio y magnesio, que generan la disminución de la acidez principalmente, debido a que no hay un incremento del valor del pH que indique el aumento de especies alcalinas al agua como bicarbonatos e hidróxidos.

La sílice soluble presentó un valor superior en un 30% (97.5 a 140.1 mg/L), es el parámetro que mayor incremento observado, que podría estar asociado a la infiltración del agua de escorrentías turbias (silicatos en suspensión, coloidales y parcialmente disueltos); por lo que los niveles de sílice son más altos durante la época de recarga, descendiendo por sedimentación ante el cese de la estación de lluvias.

TABLA 14. CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS COMPLEMENTARIAS, ANTES Y DESPUÉS DE LA BARRERA QUÍMICA DEL POZO A027

Parámetro	Resultado AB	Resultado DB	Límite permisible	Unidades	Dictamen
Alcalinidad total	226.6	238.7	N/A	mg/L CaCO_3	N/A
Acidez total	7.10	5.2	N/A	mg/L CaCO_3	N/A
Sílice Soluble	97.5	140	N/A	mg/L Si	N/A
Calcio	28.83	6.32	N/A	mg/L Ca	N/A
Magnesio	22.34	26.8	N/A	mg/L Mg	N/A
Potasio	12.5	12	N/A	mg/L K	N/A
Fosfatos	<1.3	<0.9	N/A	mg/L PO_4^{3-}	N/A
Fósforo	<0.3	<0.3	N/A	mg/L P	N/A

N/A = No Aplica

En la tabla 15 se muestran los resultados de hidrocarburos aromáticos, los cuales no presentaron ningún cambio.

TABLA 15. RESULTADOS DE HIDROCARBUROS AROMÁTICOS, ANTES Y DESPUÉS DE LA BARRERA QUÍMICA, DEL POZO A027

Parámetro	Resultado AB	Resultado DB	Límites permisible µg/L
Benceno	N.D	N.D	10.00
Etil	N.D	N.D	300.00
Benceno			
Tolueno	N.D	N.D	700.00
Xileno	N.D	N.D	500.00

N.D = No Detectado

La tabla 16 presentan los resultados de los parámetros microbiológicos los cuales después de la barrera alcalina mostraron el cumplimiento de la NOM-127-SSA1-2000, indicando la eliminación del 100% de la materia microbiológica. Se resguarda con ello la salud de la comunidad universitaria de los centros de investigación y de posgrado de la unidad académica “El Rosedal”.

Esto indica que la barrera química alcalina es eficiente en la eliminación de coliformes totales y fecales, al inhibir la infiltración de las aguas residuales de las comunidades aledañas.

TABLA 16. RESULTADOS DE MICROBIOLÓGICOS ANTES Y DESPUÉS DE LA BARRERA QUÍMICA, DEL POZO A027

Parámetro	Resultado NMP/100mL (NMP/100cm ³)		Límite permisible
	AB	DB	
Coliformes Totales	8	<2 si cumple	Ausencia o N.D.
Coliformes Fecales	1.1	<1.1 si cumple	Ausencia o N.D.

En la (figura 15), se puede apreciar el comportamiento de los iones antes y después de la barrera química, destacando la disminución de la acidez e incluso de la dureza, beneficiando la alcalinidad y la presencia de magnesio. Además es evidente que el calcio disminuyó, esto nos da un indicio de que al haber una alta concentración de este ion se propició la precipitación extensiva del calcio con los

nitratos y principalmente los fosfatos que son los que presentan una disminución considerable, en el agua del pozo antes y después de la barrera.

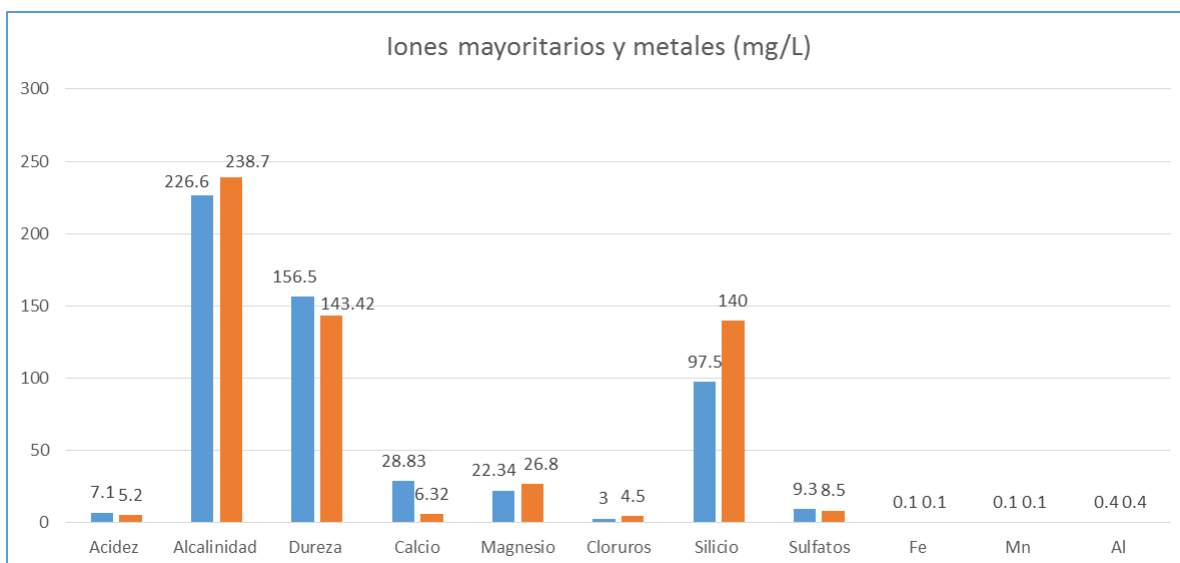


FIGURA 155. COMPORTAMIENTO DE LOS IONES MAYORITARIOS Y METALES ANTES Y DESPUÉS DE LA BARRERA QUÍMICA DEL POZO A027

8 Tiempo de vida de la barrera química

El tiempo de vida de la barrera química está definido por la cantidad de cascarón de huevo que se incorporó, los reactivos químicos (CaO y MgO), así como la concentración de especies contaminantes (nitritos, amonio, fosfatos, coliformes totales y fecales, entre otros), que se encontraron en el agua que se extrae del pozo A027 después del análisis de laboratorio.

8.1 Cálculo para fosfatos PO_4^{3-}

La evaluación estequiométrica (ecuación 16-20) del tiempo de vida de la barrera comprende el valor de la especie contaminante en este caso $1.3 \text{ mg/L PO}_4^{3-}$ (dato del análisis previo a la barrera química), el volumen de agua $\text{m}^3/\text{año}$ que se extrae del pozo y la cantidad de $\text{PO}_4^{3-} \text{ kg/año}$ que se infiltra con el agua residual, además de la cantidad de $\text{PO}_4^{3-} \text{ kg}$ total (ecuación 20) que se puede remover con los reactivos químicos y el cascarón que se agregó a la barrera química. El volumen del agua que se extrae del pozo fue medido directamente en la cisterna de almacenamiento, que se llena dos veces por semana para distribuir a los centros de investigación.

$$\text{Volumen de agua} = 18,144 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$

$$\text{Fosfatos } \text{PO}_4^{3-} = 1.3 \text{ mg/L}$$

$$\text{Donde: } 1.3 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \text{PO}_4^{3-} = 1.3 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{PO}_4^{3-} \quad (16)$$

Para conocer la cantidad de PO_4^{3-} en kg que se incorpora durante un año.

$$\text{Por lo tanto: } 1.3 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{PO}_4^{3-} \left| 18.144 \frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right| = 23.58 \frac{\text{kg}}{\text{año}} \text{PO}_4^{3-} \quad (17)$$

Sumando los valores de PO_4^{3-} total que se puede remover (ecuación 8):

$$608 \text{kg } \text{PO}_4^{3-} + 2264 \text{kg } \text{PO}_4^{3-} + 1983.6 \text{ kg } \text{PO}_4^{3-} = 4855.6 \text{kg } \text{PO}_4^{3-} \quad (18)$$

Aplicando una eficiencia del 0.2, se obtiene el tiempo de vida de la barrera química. El valor de la eficiencia está considerado debido a que el cálculo solo se presenta para fosfatos.

$$\frac{4855.6 \text{kg } \text{PO}_4^{3-} * 0.2}{23.58 \frac{\text{kg}}{\text{año}} \text{PO}_4^{3-}} = 41.2 \text{ años} \quad (19)$$

CONCLUSIONES

Se evaluó la calidad del agua con base a la (NOM-127-SSA1-1994, 2000), en la época de estiaje. Y se encontró la disminución de iones importantes como sulfatos (9.3 mg/L), cloruros (3.0 mg/L) y sodio (36.0 mg/L) y la presencia inusual de cianuro (0.044 mg/L) y fluoruro (0.358 mg/L), modificando la calidad del agua de uso y consumo.

Se determinó el contenido de sílice soluble (97.5 mg/L), el cual genera problemas de calidad al contener arenas finas. Adicionalmente se detectó la presencia de amonio (0.016 mg/L), nitritos (0.012 mg/L), coliformes totales (8 NMP/100 mL) y fecales (1.1 NMP/100 mL), lo cual coincide con lo propuesto en la hipótesis sobre la probable infiltración de aguas residuales al pozo A027.

Se realizó el diseño, cálculo y aplicación de la Barrera Química Alcalina, utilizando 1 ton de óxido de magnesio, 2.225 ton de óxido de calcio y 1 ton de cascarón de huevo.

Después de la aplicación de la barrera química se observó la disminución atípica de cianuros de 0.044 a <0.02, existe la posibilidad de que la materia nitrogenada en forma de amonio se acompleje con el magnesio y los iones fosfatos, evitando la formación de los iones cianuro, por reacciones de óxido reducción.

La dureza total disminuyó de 156.5 a 143.42 mg/L como CaCO_3 y los iones sulfatos al inicio presentan una concentración de 9.3 mg/L y al final de 8.5 mg/L.

Los parámetros microbiológicos después de la barrera alcalina mostraron el cumplimiento de la NOM-127-SSA1-2000, indicando la eliminación del 100% de la materia microbiológica. Pudo observarse una ligera disminución de los iones nitritos de 0.012 a 0.01 mg/L de N- NO_2 posiblemente por la oxidación incompleta del nitrógeno amoniacal, el cual aumentó de 0.16 a 0.45 mg/L de N- NH_4^+ .

Los resultados muestran que después de la implementación de la barrera química, el agua cumple con la calidad fisicoquímica y microbiológica establecida en la NOM-127-SSA1-2000, mostrando que esta tecnología es eficiente además de ser sencilla, económica y amigable con el ambiente, al inhibir la infiltración de las aguas residuales.

RECOMENDACIONES

Dar mantenimiento a la cisterna de almacenamiento y al tanque de distribución a los centros de investigación.

Implementar el proceso de desinfección el agua que llega a la cisterna para su distribución.

Modelación del comportamiento hidrogeoquímico de la barrera.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelwaheb, M. *et al.* (2019) 'Adsorption of nitrate, phosphate, nickel and lead on soils: Risk of groundwater contamination', *Ecotoxicology and Environmental Safety*. Elsevier Inc., 179(April), pp. 182–187. doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.04.040.
- AEMA, A. E. de M. A. (2015) *Descargas de fósforo y nitrógeno*. Available at: https://www.eea.europa.eu/es/articles?b_start:int=60 (Accessed: 22 July 2020).
- Alfaro, J.M. Limón, B. Martínez G.A. Ramos, M.M. Reyes, J.M. Tijerina, G. (2001) *Ciencias del Ambiente*. 1ra edn. Edited by S. A. de C. V. Grupo Patria Cultural. México.
- Alvarez-Bastida, C. *et al.* (2013) 'The corrosive nature of manganese in drinking water', *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V., 447, pp. 10–16. doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.01.005.
- Alvarez-Bastida, C. *et al.* (2018) 'Drinking water characterization and removal of manganese. Removal of manganese from water', *Journal of Environmental Chemical Engineering*. Elsevier B.V., 6(2), pp. 2119–2125. doi: 10.1016/j.jece.2018.03.019.
- Amini, M., Amini Khoei, Z. and Erfanifar, E. (2019) 'Nitrate (NO₃⁻) and phosphate (PO₄³⁻) removal from aqueous solutions by microalgae *Dunaliella salina*', *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. Elsevier Ltd, 19(3), p. 101097. doi: 10.1016/j.bcab.2019.101097.
- Amu, O. O., Fajobi, A. B. and Oke, B. O. (2008) 'Effect of eggshell powder on the stabilizing potential of lime on clay soil', *International Journal of Natural and Applied Sciences*, 3(3), pp. 80–84. doi: 10.4314/ijonas.v3i3.36207.
- An, X. *et al.* (2018) 'Treating organic cyanide-containing groundwater by immobilization of a nitrile-degrading bacterium with a biofilm-forming bacterium using fluidized bed reactors', *Environmental Pollution*. Elsevier Ltd, 237, pp. 908–916. doi: 10.1016/j.envpol.2018.01.087.
- ATSDR, A. para S. T. y el R. de E. (2019) *Resumen de Salud Pública: Cianuro (Cyanide) | PHS / ATSDR*. Available at: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs8.html (Accessed: 22 July 2020).
- Bezzar, A. I., François, D. and Ghomari, F. (2010) 'Étude Géochimique Des Argiles Utilisées Comme Barrières Dans Les Centres De Stockage Des Déchets', *Comptes Rendus - Geoscience*, 342(9), pp. 695–700. doi: 10.1016/j.crte.2010.03.008.
- Bhaumik, R. *et al.* (2012) 'Eggshell powder as an adsorbent for removal of fluoride from aqueous solution: Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies', *E-Journal of Chemistry*, 9(3), pp. 1457–1480. doi: 10.1155/2012/790401.
- Boeykens, S. P. *et al.* (2017) 'Eutrophication decrease: Phosphate adsorption processes in presence of nitrates', *Journal of Environmental Management*, 203, pp. 888–895. doi: 10.1016/j.jenvman.2017.05.026.

- Bolaños-Alfaro, J. D., Cordero-Castro, G. and Segura-Araya, G. (2017) ‘Determinación de nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos en agua potable como indicadores de contaminación ocasionada por el hombre, en dos cantones de Alajuela (Costa Rica)’, *Revista Tecnología en Marcha*, 30(4), p. 15. doi: 10.18845/tm.v30i4.3408.
- Brauer, A. *et al.* (2019) ‘Improvement in Hyperphosphatemia Using Phosphate Education and Planning Talks’, *Journal of Renal Nutrition*. National Kidney Foundation, Inc., 29(2), pp. 156–162. doi: 10.1053/j.jrn.2018.06.004.
- Cameron, K. C., Di, H. J. and Moir, J. L. (2013) ‘Nitrogen losses from the soil/plant system: A review’, *Annals of Applied Biology*, 162(2), pp. 145–173. doi: 10.1111/aab.12014.
- Carrera, J. Bolzicco, J. *et al.* (2001) ‘Barrera geoquímica’, *Boletín geológico y minero*, 112(1), pp. 229–256.
- Carvalho, J. *et al.* (2011) ‘Adsorption process onto an innovative eggshell-derived low-cost adsorbent in simulated effluent and real industrial effluents’.
- Chojnacka, K. (2005) ‘Biosorption of Cr(III) ions by eggshells’, *Journal of Hazardous Materials*, 121(1–3), pp. 167–173. doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.02.004.
- Chuquimboques, J. M., Vergara, J. R. and Mendoza, J. B. (2019) ‘Optimization Simultaneous Removal of Nitrate, Nitrite, Ammonium and Phosphate in Sewage’, 85(1), pp. 85–96.
- CONAGUA (2018a) *Estadísticas del agua en México*. México. Available at: http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf.
- CONAGUA (2018b) *Gerancia de aguas subterráneas. Actualización de la disponibilidad media anual del agua en el acuífero del Valle de Toluca (1501) Estado de Mexico*. Available at: https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/edomex/DR_1501.pdf.
- Daraei, H. *et al.* (2013) ‘Kinetic and equilibrium studies of adsorptive removal of phenol onto eggshell waste’, *Environmental Science and Pollution Research*, 20(7), pp. 4603–4611. doi: 10.1007/s11356-012-1409-8.
- Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo (2018) *Relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano*. Bruselas. Available at: <https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2017/ES/COM-2017-753-F1-ES-MAIN-PART-1.PDF> (Accessed: 22 July 2020).
- Elwakeel, K. Z. and Yousif, A. M. (2010) ‘Adsorption of malathion on thermally treated egg shell material’, *Water Science and Technology*, 61(4), pp. 1035–1041. doi: 10.2166/wst.2010.005.
- EPA (2009) *National Primary Drinking Water Regulations Contaminant MCL or TT 1 (mg/L) 2 Potential health effects from long-term 3 exposure above the MCL Common sources of contaminant in drinking water Public Health Goal (mg/L) 2*.

- EPA, A. de P. A. de E. U. (2016) *Contaminación por nutrientes | EPA en español | US EPA*. Available at: <https://espanol.epa.gov/espanol/contaminacion-por-nutrientes> (Accessed: 19 July 2020).
- FAO (2019) *Conservación de suelos y aguas en América Latina y el Caribe | Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. Available at: <http://www.fao.org/americas/prioridades/suelo-agua/es/> (Accessed: 7 July 2020).
- Fazal, T. *et al.* (2018) ‘Bioremediation of textile wastewater and successive biodiesel production using microalgae’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd, 82(October), pp. 3107–3126. doi: 10.1016/j.rser.2017.10.029.
- Fernández-Miguel, C., Vázquez-Taset, Y. and Miguel -Fernandez (2006) ‘Origen De Los Nitratos Y Nitritos Y Su Influencia En La Potabilidad’, *Miner{í}a y Geolog{í}a*, 22(3), pp. 1–9.
- Flores-Cano, J. V. *et al.* (2013) ‘Sorption mechanism of Cd(II) from water solution onto chicken eggshell’, *Applied Surface Science*, 276, pp. 682–690. doi: 10.1016/j.apsusc.2013.03.153.
- Fonseca-Montes de Oca, R. M. G. *et al.* (2019) ‘Chemical activity relation of phosphorus and nitrogen presence in trace elements incorporation into underground water’, *Environmental Monitoring and Assessment*. Environmental Monitoring and Assessment, 191(2). doi: 10.1007/s10661-018-7170-9.
- Gárfias, J. S. *et al.* (2008). ‘Uso racional y sostenible de los recursos hídricos del acuífero del valle de Toluca’. *CIENCIA ergo-sum*, 15(1), pp. 61-72.
- Gárfias, J., *et al.* (2010). ‘Hydrochemistry and origins of mineralized waters in the Puebla aquifer system, Mexico’. *Environ Earth Sci* 59, pp. 1789–1805. doi.org/10.1007/s12665-009-0161-y
- Hayatsu, M., Tago, K. and Saito, M. (2008) ‘Various players in the nitrogen cycle: Diversity and functions of the microorganisms involved in nitrification and denitrification’, *Soil Science and Plant Nutrition*, 54(1), pp. 33–45. doi: 10.1111/j.1747-0765.2007.00195.x.
- Ikram, M. *et al.* (2016) ‘The adsorptive potential of chicken egg shells for the removal of oxalic acid from wastewater’, *Journal of Biomedical Engineering and Informatics*, 2(2), p. 118. doi: 10.5430/jbei.v2n2p118.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua) (2019) *Aguas Subterráneas*. Available at: <https://www.gob.mx/imta/es/articulos/aguas-subterranas?idiom=es>(Accessed: 18 August 2020).
- INAFED (Instituto para el Federalismo y el Desarrollo Municipal) (2010) *Enciclopedia de municipios y delegaciones del estado de México*.
- INECC, I. N. de E. y C. C. (2007) *Tecnologías de remediación*. Available at: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/372/tecnolog.html> (Accessed: 18 July 2020).
- INEGI (2019a) *Banco de indicadores*, INEGI. Available at: <https://www.inegi.org.mx/app/indicadores/?ind=1002000001&tm=6#divFV1002000001%23D1002>

000001 (Accessed: 20 July 2020).

INEGI (2019b) *México en cifras*. Available at: <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=15> (Accessed: 20 July 2020).

INEGI (2019c) *Suelo. Cuéntame de México. Territorio México*. Available at: <http://cuentame.inegi.org.mx/territorio/suelo.aspx?tema=T> (Accessed: 22 July 2020).

INEGI (2019d) *Suelos, Territorio de México*. Available at: <http://www.cuentame.org.mx/territorio/suelo.aspx?tema=T> (Accessed: 7 July 2020).

Instituto de Estudios del Huevo (2009) *El gran libro del huevo*. 1ra edn. Madrid, España: Everest, S.A. Available at: <http://institutohuevo.com/wp-content/uploads/2017/07/EL-GRAN-LIBRO-DEL-HUEVO.pdf> (Accessed: 19 July 2020).

Ishikawa, S. I., Suyama, K. and Satoh, I. (1999) 'Biosorption of actinides from dilute waste actinide solution by egg-shell membrane', *Applied Biochemistry and Biotechnology - Part A Enzyme Engineering and Biotechnology*, 77–79, pp. 521–533. doi: 10.1007/978-1-4612-1604-9_47.

Juárez, M. M., Pomaa, H. R. and Rajal, V. B. (2015) '¿Cumplir con la legislación nos garantiza consumir agua segura?', *Ribagua*, 2(2), pp. 71–79. doi: 10.1016/j.riba.2015.10.002.

Khan, M. S. *et al.* (2010) 'Plant growth promotion by phosphate solubilizing fungi - Current perspective', *Archives of Agronomy and Soil Science*, 56(1), pp. 73–98. doi: 10.1080/03650340902806469.

King'ori, A. M. (2011) 'A Review of the uses of poultry eggshells and shell membranes', *International Journal of Poultry Science*, 10(11), pp. 908–912. doi: 10.3923/ijps.2011.908.912.

Laura Emilia Cerón and Gutiérrez, F. A. A. (2012) 'Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos', *Revista Colombiana de Biotecnología*, XIV(1), pp. 285–295. Available at: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=77624081026>.

Levy-Booth, D. J., Prescott, C. E. and Grayston, S. J. (2014) 'Microbial functional genes involved in nitrogen fixation, nitrification and denitrification in forest ecosystems', *Soil Biology and Biochemistry*, 75, pp. 11–25. doi: 10.1016/j.soilbio.2014.03.021.

Li, X. Z., Zhao, Q. L. and Hao, X. D. (1999) 'Ammonium removal from landfill leachate by chemical precipitation', *Waste Management*. Elsevier Ltd, 19(6), pp. 409–415. doi: 10.1016/S0956-053X(99)00148-8.

Maguire, T. J. and Fulweiler, R. W. (2019) 'Urban groundwater dissolved silica concentrations are elevated due to vertical composition of historic land-filling', *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V., 684, pp. 89–95. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.272.

Martí-Ortega, N. (2002) 'Phosphorus Precipitation in Anaerobic Digestion Process', *Disertation.com*.

Martínez de Zabarte Fernández, J. M., García Íñiguez, J. P. and Domínguez Cajal, M. (2018)

‘Metahemoglobinemia in infants over one year’, *Medicina Clinica*, 151(7), pp. 278–280. doi: 10.1016/j.medcli.2017.12.009.

Mittal, A. *et al.* (2016) ‘Applications of egg shell and egg shell membrane as adsorbents: A review’, *Journal of Molecular Liquids*. Elsevier B.V., 223, pp. 376–387. doi: 10.1016/j.molliq.2016.08.065.

MON-201-SSA1-2002 (2002) *Norma Oficial Mexicana. Productos y servicios. Agua y hielo para consumo humano, envasados y a granel. Especificaciones sanitarias*. Available at: <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/201ssa12.html> (Accessed: 22 July 2020).

NMX-AA-029-SCFI-2001 (2001) *Análisis de aguas-determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba*. México.

NMX-AA-036-SCFI-2001 (2001) *Análisis de agua-determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba*. México.

NMX-AA-050-SCFI-2001 (2001) *Norma Oficial Mexicana. Determinación de fenoles totales en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - método de prueba*.

NMX-F-517-1992 (1992) *Norma Oficial Mexicana. Alimentos-determinación de dureza total, temporal y permanente en agua*.

NMX-F-518-1992 (1992) *Norma Oficial Mexicana. Alimentos. Determinación turbidimétrica de sulfato en agua*. México.

NMX-F-527-1992 (1992) *Norma Oficial Mexicana. Alimentos. Determinación de sólidos totales, sólidos disueltos y sólidos en suspensión en agua*. . México.

NMX-F-532-1992 (1992) *Norma Oficial Mexicana. Determinación de cloruros en agua - método de prueba*.

NMX-F-533-1992 (1992) *Bebidas no alcohólicas. Determinación de alcalinidad en agua*. México.

NMX-F-534-1992 (1992) *Norma Oficial Mexicana. Alimentos. Determinación de ph en agua. Normas mexicanas. Dirección general de normas*. México.

NOM-003-CNA-1996 (1997) *Secretaría de medio ambiente y recursos naturales. Norma Oficial Mexicana. Requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación de acuíferos*.

NOM-014-SSA1-1993 (1993) *Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados*. México. Available at: <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/014ssa13.html> (Accessed: 20 July 2020).

NOM-112-SSA1-1994 (1994) *Norma Oficial Mexicana. Bienes y servicios. Determinación de bacterias coliformes. Técnica del numero mas probable*. Available at: <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/112ssa14.html> (Accessed: 22 July 2020).

NOM-117-SSA1-1994 (1995) *Norma Oficial Mexicana, Bienes y servicios. Método de prueba para*

- la determinación de cadmio, arsénico, plomo, estaño, cobre, fierro, zinc y mercurio en alimentos, agua potable y agua purificada por espectrometría de absorción atómica. México. Available at: <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/117ssa14.html> (Accessed: 22 July 2020).
- NOM-127-SSA1-1994 (2000) *MODIFICACION a la Norma Oficial Mexicana NOM*. Available at: <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/m127ssa14.html> (Accessed: 19 July 2020).
- OMS (2011) ‘Guías para la calidad del agua de consumo humano. Cuarta edición. Incorpora la primera adenda.’, *Organización Mundial de la Salud*, p. 608. Available at: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/272403/9789243549958-spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Ortega Márquez, M. and Márquez Fernández, O. (2017) ‘Percepción social del servicio de agua potable en el municipio de Xalapa, Veracruz’, *Revista Mexicana de Opinión Pública*, (23), p. 41. doi: 10.22201/fcpys.24484911e.2017.23.58515.
- Pacheco, J. C. A. (2003) ‘Fuentes principales de nitrógeno de nitratos en aguas subterráneas’, *Ingeniería Revista Académica*, 7(002), pp. 47–54. Available at: https://www.researchgate.net/publication/237786993_Fuentes_principales_de_nitrogeno_de_nitratos_en_aguas_subterranneas (Accessed: 21 July 2020).
- Palomares, A. E. (2013) ‘Contaminación del agua por nitratos y técnicas para su tratamiento.’, *Esfera del agua*.
- Peñuela, A. L. and Carrillo, R. J. J. (2013) ‘Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea a partir de indicadores superficiales: Centro-sur de la Mesa Central, México’, *Investigaciones Geograficas*, 81, pp. 18–32. Available at: <http://www.revistas.unam.mx/index.php/rig/article/view/30518/41962>.
- Pérez-Macedo, P. M. *et al.* (2017) ‘Propiedades Adsorptivas del Carbón Activado Obtenido a partir de Bagazo de Agave y Cascaron de Huevo’, pp. 15–18.
- Pérez, J. C. and Higuera, Ó. F. (2008) ‘Comportamiento electroquímico del cianuro’, *Revista Científica Ingeniería y Desarrollo*, 24(24). Available at: <http://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/1729/4472> (Accessed: 20 July 2020).
- Pettinato, M. *et al.* (2015) ‘Eggshell: A green adsorbent for heavy metal removal in an MBR system’, *Ecotoxicology and Environmental Safety*. Elsevier, 121, pp. 57–62. doi: 10.1016/j.ecoenv.2015.05.046.
- Pramanpol, N. and Nitayapat, N. (2006) ‘Adsorption of reactive dye by eggshell and its membrane’, *Kasetsart Journal - Natural Science*, 40(SUPPL.), pp. 192–197.
- Ramírez, A. V. (2011) ‘Toxicidad del cianuro. Investigación bibliográfica de sus efectos en animales

- y en el hombre', *Anales de la Facultad de Medicina*, 71(1), p. 43. doi: 10.15381/anales.v71i1.74.
- Richardson, A. E. and Simpson, R. J. (2011) 'Soil microorganisms mediating phosphorus availability', *Plant Physiology*, 156(3), pp. 989–996. doi: 10.1104/pp.111.175448.
- Rodier, J. (1998) *Análisis de las aguas*. Edited by Omega.
- Rodriguez-Alvarez, M. S. *et al.* (2017) 'Spatial and seasonal characterization of the drinking water from various sources in a peri-urban town of Salta', *Revista Argentina de Microbiología*, 49(4), pp. 366–376. doi: 10.1016/j.ram.2017.03.006.
- SEDESOL (2013) *Secretaría de Desarrollo Social. Catálogo Localidades*. Available at: [http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/LocdeMun.aspx?buscar=1&tipo=nombre&campo=loc&valor=sebastián lerdo de tejada&ent=15&mun=106](http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/LocdeMun.aspx?buscar=1&tipo=nombre&campo=loc&valor=sebastián%20lerdo%20de%20tejada&ent=15&mun=106) (Accessed: 20 July 2020).
- SEMARNAT (2012) *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Suelos. Suelos de México. Informe 2012*. Available at: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_12/03_suelos/cap3_1.html (Accessed: 7 July 2020).
- Sharma, S. B. *et al.* (2013) 'Phosphate solubilizing microbes: Sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils', *SpringerPlus*, 2(1), pp. 1–14. doi: 10.1186/2193-1801-2-587.
- Šimanský, V. *et al.* (2019) 'How relationships between soil organic matter parameters and soil structure characteristics are affected by the long-term fertilization of a sandy soil', *Geoderma*, 342(February), pp. 75–84. doi: 10.1016/j.geoderma.2019.02.020.
- Sivasankar, P. *et al.* (2019) 'Bioremediation of wastewater through a quorum sensing triggered MFC: A sustainable measure for waste to energy concept', *Journal of Environmental Management*. Elsevier, 237(June 2018), pp. 84–93. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.01.075.
- SM 3500 K-D-1992 (2017) *3500-K POTASSIUM*, *Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater*. doi: 10.2105/SMWW.2882.060.
- SM 3500 Na-D-1992, A. P. H. A., American Water Works Association and Water Environment Federation (2017) *3500-Na SODIUM*, *Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater*. doi: 10.2105/SMWW.2882.062.
- Soares, M. A. R. *et al.* (2016) 'Evaluation of Eggshell-Rich Compost as Biosorbent for Removal of Pb(II) from Aqueous Solutions', *Water, Air, and Soil Pollution*. Water, Air, & Soil Pollution, 227(5). doi: 10.1007/s11270-016-2843-x.
- Sotelo Ruíz, E. D. *et al.* (2006) 'Los Suelos Del Estado De México Y Su Actualización a La Base Referencial Mundial Del Recurso Suelo 2006', *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(8), pp. 71–84. doi: 10.29298/rmcf.v2i8.538.

- Suhogusoff, A. V. *et al.* (2019) 'Dynamics of nitrate degradation along an alternative latrine improved by a sawdust permeable reactive barrier (PRB) installed in an irregular settlement in the municipality of São Paulo (Brazil)', *Ecological Engineering*, 138(June), pp. 310–322. doi: 10.1016/j.ecoleng.2019.08.001.
- Sun, Z. *et al.* (2014) 'Impact of Human Activity on the Groundwater Chemical Composition of the South Part of the Poyang Lake Basin', *IERI Procedia*. Elsevier B.V., 8, pp. 113–118. doi: 10.1016/j.ieri.2014.09.019.
- Tapia-Torres, Y. *et al.* (2013) 'La disponibilidad del fósforo es producto de la actividad bacteriana en el suelo en ecosistemas oligotróficos: Una revisión crítica', *Terra Latinoamericana*. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C., 31(3), pp. 231–242. Available at: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792013000400231&lng=es&nrm=iso&tlng=es (Accessed: 21 July 2020).
- UE (2009) *Directiva 98/83/CE del consejo de 3 de noviembre de 1998. Relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano. Este documento es un instrumento de documentación y no compromete la responsabilidad de las instituciones.*
- Vaclavik, V. A. C. E. W. (2014) *Essentials of Food Science*. 4th edn. Dallas, Texas USA: Springer. Available at: https://books.google.com.mx/books?id=ABa4BAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false (Accessed: 19 July 2020).
- Valdés, M. V. E. J. V. M. A. (2009) 'La cáscara del huevo: ¿Desecho o valor agregado para la salud humana y la producción avícola?', *Revista cubana de ciencia avícola*, 19, pp. 84–102. Available at: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3080692> (Accessed: 19 July 2020).
- Vega, L. R. M. E. (2009) 'Recuperando valor de la basura para competir: el desarrollo de un proyecto en el área de producción de harinas y pastas de cascarón de huevos de desecho | Vega González | Red Internacional de Investigadores en Competitividad', *Red nacional de investigadores en competitividad*, 3(1). Available at: <https://www.riico.net/index.php/riico/article/view/853/521> (Accessed: 19 July 2020).
- Vervloet, M. G. and van Ballegooijen, A. J. (2018) 'Prevention and treatment of hyperphosphatemia in chronic kidney disease', *Kidney International*. Elsevier Inc, 93(5), pp. 1060–1072. doi: 10.1016/j.kint.2017.11.036.
- Wilkin, R. T. *et al.* (2009) 'Performance of a zerovalent iron reactive barrier for the treatment of arsenic in groundwater: Part 1. Hydrogeochemical studies', *Journal of Contaminant Hydrology*. Elsevier, 106(1–2), pp. 1–14. doi: 10.1016/j.jconhyd.2008.12.002.
- Zendehbad, M. *et al.* (2019). 'Source identification of nitrate contamination in the urban aquifer of

Mashhad, Iran', *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 25, pp. 2214-5818. doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100618.

Zulfikar, M. A. *et al.* (2013) 'Removal of humic acid from peat water using untreated powdered eggshell as a low cost adsorbent', *International Journal of Environmental Science and Technology*, 10(6), pp. 1357–1366. doi: 10.1007/s13762-013-0204-5.