



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA
FACULTAD DE INGENIERÍA
SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
MAESTRÍA EN HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA

MONITOREO NH_4^+ , NO_3^- Y NO_2^- PARA IDENTIFICAR LA INTERACCIÓN DEL AGUA NATIVA Y EL AGUA SUPERFICIAL EN LA PORCIÓN SUR DONDE SE LOCALIZA LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE CHIHUAHUA, MÉXICO.

TESIS
PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA
I.G. GLADYS VELAZCO ARMENDÁRIZ

DIRECTORA DE TESIS
CARMEN JULIA NAVARRO GÓMEZ



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA
FACULTAD DE INGENIERIA
SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
MAESTRÍA EN HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA

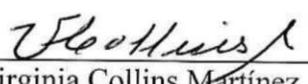
MONITOREO DE NH_4^+ , NO_3^- Y NO_2^- PARA IDENTIFICAR LA INTERACCIÓN
DEL AGUA NATIVA Y EL AGUA SUPERFICIAL EN LA PORCIÓN SUR DONDE SE
LOCALIZA LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE
CHIHUAHUA, MÉXICO.

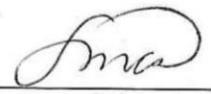
TESIS

PARA OBTENER EL GRADO EN MAESTRO DE INGENIERÍA

APROBADO:


Dra. Carmen Julia Navarro Gómez, director


Dra. Virginia Collins Martínez, sinodal


M.I Martha Lorena Calderón Fernández, sinodal

CHIHUAHUA, CHIH.
ENERO 2017

Derechos reservados
© Gladys Velazco Armendáriz
Lomas de San Guillermo No 6413. Fraccionamiento
Lomas Altas C.P. 31207
2017

Copyright ©

por

Gladys Velazco Armendáriz

2017

4 de enero de 2017

ING. GLADYS VELAZCO ARMENDÁRIZ

Presente

En atención a su solicitud relativa al trabajo de tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por el director **Dra. Carmen Julia Navarro Gómez** para que lo desarrolle como tesis, con el título: **“MONITOREO DE NH_4^+ , NO_3^- Y NO_2^- PARA IDENTIFICAR LA INTERACCIÓN DEL AGUA NATIVA Y EL AGUA SUPERFICIAL EN LA PORCIÓN SUR DONDE SE LOCALIZA LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE CHIHUAHUA, MÉXICO”**.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

Índice de Tablas

Índice de Figuras

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

- 1.1 Introducción
- 1.2 Antecedentes
- 1.3 Modelos hidrogeológicos conceptuales
- 1.4 Calidad del agua nativa
- 1.5 Agua residual tratada y su uso
- 1.6 Recarga de acuíferos naturales y artificiales
- 1.7 Normatividad
- 1.8 Problemática
- 1.9 Justificación
- 1.10 Objetivos
- 1.11 Hipótesis

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

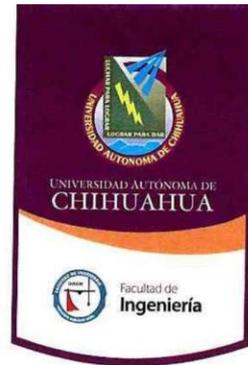
- 2.1 Estudios previos

Facultad de Ingeniería

Circuito No.1, Campus Universitario 2

Chihuahua, Chih. C.P. 31125

Tel. (614) 442-95-00 www.fing.uach.mx





CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

- 3.1 Localización de la zona de estudio
- 3.2 Integración de la información
- 3.3 Red de pozos de monitoreo
- 3.4 Programa de monitoreo
- 3.5 Proceso de recolección de las muestras
- 3.6 Determinación y análisis de los parámetros en laboratorio
- 3.7 Análisis de resultados

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- 4.1 Análisis descriptivo

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 5.1 Conclusiones
- 5.2 Recomendaciones

BIBLIOGRAFÍA

Curriculum Vitae

Solicitamos a Usted tomar nota de que el título del trabajo se imprima en lugar visible de los ejemplares de las tesis.

ATENTAMENTE
"naturam subiecit aliis"

EL DIRECTOR

M.I. JAVIER GONZÁLEZ CANTÚ

FACULTAD DE
INGENIERÍA
U.A.C.H.



DIRECCIÓN

EL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN
Y POSGRADO

DR. FERNANDO RAFAEL ASTORGA
BUSTILLOS

Porque de él, y por él, y para él, son todas las cosas.

A él sea la gloria por los siglos. Amén.

Romanos 11:36 RV 1960.

Dedico este trabajo de Tesis a Dios que me dio la vida y siempre me ha acompañado en todo mi andar.

A mis amados padres que Dios me regaló, que les dio la fuerza y la sabiduría para enseñarme a ser lo que soy, a ellos que nunca me dejaron y siempre me han animado en todas mis etapas.

A mis queridos hermanos que son de apoyo en cada situación de mi vida.

A todos mis hermanos en la fe por siempre orar por mí.

AGRADECIMIENTOS

A CONACYT por la beca otorgada para realizar mis estudios de Maestría.

A la Dra. Carmen Julia Navarro Gómez directora de tesis, por brindarme su apoyo y dedicación para la elaboración de este proyecto de Tesis.

A la Dra. Virginia Collins Martínez revisora invitada del CIMAV, al Dr. Fernando Rafael Astorga Bustillos y a la M.I Martha Lorena Calderón Fernández, por sus buenas sugerencias y comentarios positivos de este trabajo.

A mi alma mater la Universidad Autónoma de Chihuahua, principalmente a la Facultad de Ingeniería. Principalmente a mis profesores que durante la formación académica me impartieron su conocimiento y fueron de gran ayuda en todo momento.

A mis queridas compañeras Lizette Marmolejo Núñez y Raquel Rivas Salmerón por siempre brindarme su apoyo y compartir conmigo momentos especiales a lo largo de la maestría.

Por último, agradezco a JMAS Chihuahua (Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Chihuahua) por brindarme la oportunidad de realizar mi proyecto de tesis.

RESUMEN

El agua es un recurso natural, fundamental para la existencia de la humanidad. Por lo que se requieren urgentemente estrategias de manejo enfocadas a su cuidado. Las precipitaciones son la principal fuente hídrica de recarga natural en los acuíferos. La calidad del agua ha sido modificada mediante procesos antropogénicos, teniendo como principal fuente de contaminación la agricultura y el vertido de aguas negras o crudas en el suelo filtrante. Por esa razón se implementó un programa de saneamiento por las instituciones normativas SEMARNAT y Comisión Nacional del Agua (CNA) para evitar los impactos negativos que cambian la calidad del agua nativa. Derivado de lo anterior, la recarga artificial de acuíferos denominada MAR por sus siglas en inglés (Managed Aquifer Recharge, 1986) surgió para tener un control sobre el agua conducida hacia el subsuelo. El uso al agua residual tratada proveniente de la Planta de Tratamiento Sur de la ciudad de Chihuahua, es la principal fuente hídrica de recarga del proyecto piloto ubicado en la zona. Se monitorearon los parámetros NH_4^+ , NO_3^- Y NO_2^- antes y después de la recarga inducida en nueve pozos de observación ubicados a un kilómetro a la redonda de la zona de proyecto. Obteniendo como resultado que el efluente proveniente de la planta es de mejor calidad que el agua extraída de los pozos de observación. En los pozos POPS2 y POPS3 se vió un aumento de los nitratos, esto es por el material arcilloso ahí presente. Existe una remoción de los contaminantes de un 40% más en el pozo POPS1 por efecto de la profundidad a diferencia de los pozos antes mencionados que cuentan con 40 metros de profundidad.

ABSTRACT

Water is a natural resource, essential for human existence. Hence, it is urgently required strategies for water management that focus in its care. Precipitation is the main hydrological source for natural recharge of aquifers. The quality of the water has been modified through anthropogenic processes, being agriculture and the spreading of sewage or raw water in the filter ground the main source of pollution. For this reason a sanitation program was implemented by the regulatory institutions, SEMARNAT and CNA, in order to prevent the negative impacts that modify the quality of native water. As a result of the latter, the artificial recharge of aquifers (MAR, 1986) was created in order to have control over water filtered to the subsoil. The use of treated wastewater coming from the South Wastewater Treatment Plant, is the main hydric source for recharge of the pilot project located in the area. Parameters of NH_4^+ , NO_3^- and NO_2^- were monitored before and after the induced recharge made in 9 observation wells located as far as one kilometer radius from the project. The result obtained was that the effluent coming from the plant is of better quality than the water retrieved from the observation wells. At wells POPS2 and POPS3 there was an increase of nitrate, because of the clayey material present. There was 40% more removal of pollutants at well POPS1 as effect of the depth, unlike the other wells aforementioned that have a depth of 40 meters.



TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	VII
RESUMEN	VIII
ABSTRACT	IX
Índice de Tablas.....	XII
Índice de Figuras.....	XIII
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 ANTECEDENTES	4
1.3 MODELOS HIDROGEOLÓGICOS CONCEPTUALES.....	5
1.3.1 Localización del Acuífero Tabalaopa Aldama	5
1.3.2 Hidrología	7
1.3.3 Geología del Acuífero Tabalaopa Aldama	9
1.4 CALIDAD DEL AGUA NATIVA.....	12
1.4.1 Parámetros químicos indicadores de la calidad de agua.....	13
1.4.2 Ciclo Bioquímico del Nitrógeno.....	14
1.5 AGUA RESIDUAL TRATADA Y SU USO	16
1.5.1 Origen del agua residual	16
1.5.2 Uso del agua residual tratada (ART)	18
1.6 RECARGA DE ACUÍFEROS NATURALES Y ARTIFICIALES	20
1.6.1 Recarga Natural a los Acuíferos	20
1.6.2 Recarga Artificial de Acuíferos o Recarga Inducida (MAR)	22
1.7 NORMATIVIDAD.....	28
1.8 PROBLEMÁTICA	29
1.9 JUSTIFICACIÓN	30
1.10 OBJETIVOS	30
1.10.1 Objetivo General.....	30
1.10.2 Objetivos Específicos.....	30



1.1 HIPÓTESIS	31
CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE.....	31
2.1 Estudios previos.....	31
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA.....	35
3.1 Localización de la zona de estudio	35
3.2 Integración de la información.....	38
3.3 Red de pozos de monitoreo.....	38
3.4 Programa de monitoreo.....	39
3.5 Proceso de recolección de las muestras	40
3.6 Determinación y análisis de los parámetros en laboratorio	40
3.7 Análisis de resultados	41
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
4.1 Análisis Descriptivo.....	42
4.2.1 Comportamiento del Nitrógeno Amónico NH_4^+	43
4.2.2 Comportamiento del Nitrógeno de Nitrato N-NO_3	44
4.2.3 Comportamiento del Nitrógeno de Nitrito N-NO_2	47
4.2.4 Remoción conforme a la profundidad de los pozos de observación.....	49
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	51
5.1 Conclusiones.....	51
5.2 Recomendaciones	53
BIBLIOGRAFÍA	54
Curriculum Vitae	57



Índice de Tablas

Tabla 1: Límites máximos permisibles que establece la NOM-127-SSA1-1994, “Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización”	14
Tabla 2: Identificación de los pozos de observación por clave y coordenadas.....	39
Tabla 3: Muestra los límites máximos permisibles, método de análisis	41
Tabla 4: Nomenclatura utilizada para los pozos de observación	42
Tabla 5: Muestra el porcentaje de remoción del NH ₃ en los pozos de observación en diferentes fechas	44
Tabla 6: Muestra los valores de la concentración de los nitratos y nitritos en un periodo de tiempo Agosto 2015 a Mayo 2016	49
Tabla 7: Comparación de la remoción vs la profundidad de los pozos. Cambio efectuado de los pozos POPS 1 y POPS 3... ..	50
Tabla 8: Comparación de la remoción vs la profundidad de los pozos. Cambio efectuado de los pozos POPS 1- POPS 2... ..	50



Índice de Figuras

Figura 1: Composición típica del agua residual doméstica	2
Figura 2: Localización del Acuífero Tabalaopa Aldama.....	6
Figura 3: Hidrografía del Acuífero Tabalaopa Aldama.....	8
Figura 4: Geología del Acuífero Tabalaopa Aldama.....	11
Figura 5: Ciclo Bioquímico del Nitrógeno (Castillo et al., 2005)... ..	16
Figura 6: Esquema explicativo para mostrar el proceso de infiltración... ..	21
Figura 7: Modelo de Recarga Natural de un Acuífero.....	22
Figura 8: Área de la zona de estudio... ..	37
Figura 9: Concentración de Nitrógeno Amoniacal vs Tiempo. Datos de pozos de observación y Efluente de la planta Sur... ..	43
Figura 10: Concentración de Nitrato vs Tiempo. Datos de pozos de observación POPS1, POPS2, POPS3, PR3 y EPS.....	45
Figura 11: Concentración de Nitrato vs Tiempo. Datos de pozos de observación PP2, PP3, PP4 y EPS	45
Figura 12: Concentración de Nitrato vs Tiempo. Datos de pozos de observación NR, PC, POPS1, POPS2, POPS3 y EPS	46
Figura 13: Concentración Nitrato vs Tiempo. Muestra los nueve pozos de observación.....	47
Figura 14: Concentración Nitritos vs Tiempo. Pozos de observación PP4, PP2, POPS1, POPS2, POPS3 y EPS	48
Figura 15: Composición Nitritos vs Tiempo. Se muestra los nueve pozos de observación... ..	48



CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO

1.1 INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural, fundamental para la existencia de la humanidad, por lo que se requieren urgentemente estrategias de manejo enfocadas en su cuidado.

La recarga natural es una etapa del ciclo hidrológico, que se genera principalmente debido a la precipitación, a las aguas superficiales, a través de ríos y lagos, o por medio de transferencias desde otras unidades hidrogeológicas, consiste en la infiltración y percolación de la precipitación u otros flujos superficiales naturales hasta los depósitos de agua subterránea. Este proceso es de larga duración y limitado a la capacidad que puede tener el acuífero. Existen varios tipos de recarga natural, según De Vries y Simmers (2002).

- Directa: Agua que por medio de percolación vertical a partir de la precipitación termina por formar parte del acuífero, ante la saturación de la zona vadosa.
- Indirecta: Es el agua superficial que se percola a través de macroporos, estructuras geológicas como fracturas, juntas y depresiones topográficas que tienen zonas de estancamiento de agua.
- Concentrada: Esta recarga es producida debajo de los cauces de los ríos, canales o encharcamientos superficiales.

Como ya se mencionó, las precipitaciones son la principal fuente hídrica de recarga natural en los acuíferos, aunque cabe destacar que existen otras formas de recarga, que son influenciadas por actividades mismas que el ser humano hace sobre el acuífero, como lo es la recarga inducida por retorno del agua empleada en riego.

Este es un factor que altera la calidad natural del agua, pues esta infiltración no es controlada desde la superficie, aporta contaminantes al agua nativa y cambia su composición original; esto se debe a que los fertilizantes aportan al agua compuestos de Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio (K) y en algunos casos, se ha calculado que el 50% de los nitratos usados en fertilizantes, llegan al acuífero por la infiltración (Sanchez, 2006).

Otro factor que altera la calidad del agua natural, es la descarga de aguas residuales que se vierten en superficie para aprovechar el poder filtrante del suelo y aportan diversas sustancias negativas al agua nativa, donde las aguas domésticas tienen como principales componentes: detergentes, bacterias y materia orgánica disuelta (Figura 1).

Componente	Intervalo de concentraciones		
	Alta	Media	Baja
Materia sólida, mg/l	1200	720	350
disuelta total	850	500	250
inorgánica	525	300	145
orgánica	325	200	105
en suspensión	350	220	100
inorgánica	75	55	20
orgánica	275	165	80
Sólidos decantables, ml/l	20	10	5
DBO ₅ a 20°C, mg/l	400	220	110
Carbono orgánico total, mg/l	290	160	80
DQO, mg/l	1000	500	250
Nitrógeno, mg/l N, total	85	40	20
Orgánico	35	15	8
Amoníaco	50	25	12
Nitritos	0	0	0
Nitratos	0	0	0
Fósforo, mg/l P, total	15	8	4
orgánico	5	3	1
inorgánico	10	5	3
Cloruros	100	50	30
Alcalinidad, mg/l CaCO ₃	200	100	50
Grasa, mg/l	150	100	50

Metcalf-Eddy. "Tratamiento y depuración de las aguas residuales". 1991

Figura1. Composición típica del agua residual doméstica.



Por esta razón, se han implementado programas de saneamiento por parte de la instancia normativa Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), dependiente de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) para la prevención y el control de la contaminación de las aguas nacionales, y así estar en condiciones de reducir o mitigar los impactos negativos que están cambiando la composición natural del agua nativa.

Para lograrlo, se publicaron las siguientes normas NOM-001-SEMARNAT-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales y NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.

Derivado de lo anterior, surgió una estrategia para tener un control sobre el agua inducida hacia el subsuelo, como es la recarga artificial de acuíferos por sus siglas en inglés MAR (Managed Aquifer Recharge) la cual se ha convertido en una herramienta de gestión hídrica económica y de gran efectividad, aunque en gran parte del mundo aún se encuentra en estado experimental (Fernández et al., 2004). Las opciones más utilizadas para llevar a cabo esta técnica, es la infiltración de agua residual tratada, la cual es considerada como un recurso importante en regiones donde la demanda de agua potable supera su disponibilidad (Ponsatí, et al., 2010).

En los países desarrollados el 70% de las aguas residuales son tratadas, siendo éstas un recurso no reutilizado, solo un 3.8 % son reutilizadas después de su tratamiento (Winpenny *et al*, 2013). Debido a esto, es importante el monitoreo de la calidad del agua periódicamente, porque aunque no se tenga la estrategia de la MAR el agua inducida no controlada, seguirá impactando de forma negativa al agua natural del acuífero.



1.2 ANTECEDENTES

Entre los diversos estudios referentes al uso de la MAR, se tiene el de Bekele *et al.* (2011), que en su artículo “Gestión de la recarga del acuífero de aguas residuales tratadas”, determinaron los cambios que sufren las aguas residuales tratadas, después de infiltrarse verticalmente a través de la zona no saturada de 9 m de espesor con el método MAR durante una prueba piloto de 39 meses, al monitorear parámetros como iones mayores, nutrientes, metales pesados, metales traza, carbono orgánico y coliformes, antes y después de que el agua fuera infiltrada a través de la superficie. Los resultados mostraron que la infiltración del agua residual a través de una zona no saturada mejora su calidad.

Por su parte, Vergara *et al.* (2014) en la Región de Antofagasta Chile, monitorearon la calidad de agua trimestralmente en 12 pozos, cuando analizaron las concentraciones de 60 elementos y midieron sus parámetros físico-químicos, esto con la finalidad de identificar los procesos de interacción agua-roca, mediante un programa de monitoreo de calidad química y niveles de aguas subterráneas. Los datos obtenidos fueron utilizados para llevar a cabo el análisis de su evolución temporal y, se destacó en cada punto muestreado la mala calidad del agua, con respecto a la norma chilena de aguas para riego, debido a los factores naturales de interacción agua-roca.

Brenes *et al.* (2011) realizaron un estudio, donde midieron las concentraciones de nitratos y nitritos en 16 pozos pertenecientes al Acuífero del Valle de Puebla, México, mismos que fueron monitoreados mensualmente durante un año. Los parámetros mencionados no superaron los límites máximos permisibles por la Norma Oficial Mexicana (Modificación a la NOM-127-SSA1-1994). Sin embargo el 44% de los pozos analizados, presentan niveles de nitratos que pueden significar un riesgo para la salud de la población que la consume.



En tanto que Prado (2015) en su investigación “El suelo: Guardián de la calidad del agua subterránea realizada en el Valle del Mezquital en el estado de Hidalgo”, realizó un monitoreo de varios puntos de muestreo a diferentes profundidades, para conocer la variación de la concentración de los contaminantes, que se infiltran junto con el agua de riego en donde se seleccionaron dos compuestos, un fármaco, el antiepiléptico carbamazepina y un nutriente, el nitrógeno (N). Los resultados obtenidos mostraron que el suelo de la zona de estudio funciona como filtro de los contaminantes, que llegan junto con el agua residual. De los dos contaminantes estudiados, ambos disminuyeron en gran parte y fue esta concentración el límite establecido en las normas de calidad del agua potable.

1.3 MODELOS HIDROGEOLÓGICOS CONCEPTUALES

1.3.1 Localización del Acuífero Tabalaopa Aldama.

El Acuífero Tabalaopa Aldama, definido con la calve 0835 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se encuentra dentro de la porción central del Estado de Chihuahua, entre los paralelos $28^{\circ} 32' 30''$ y $29^{\circ} 0' 00''$ de altitud norte y los meridianos $106^{\circ} 10' 0''$ y $105^{\circ} 52' 00''$ de longitud oeste (CONAGUA, 2003).

El Acuífero abarca parcialmente los municipios Aldama, Aquiles Serdán y Chihuahua (CONAGUA, 2003) (Véase Figura 2).

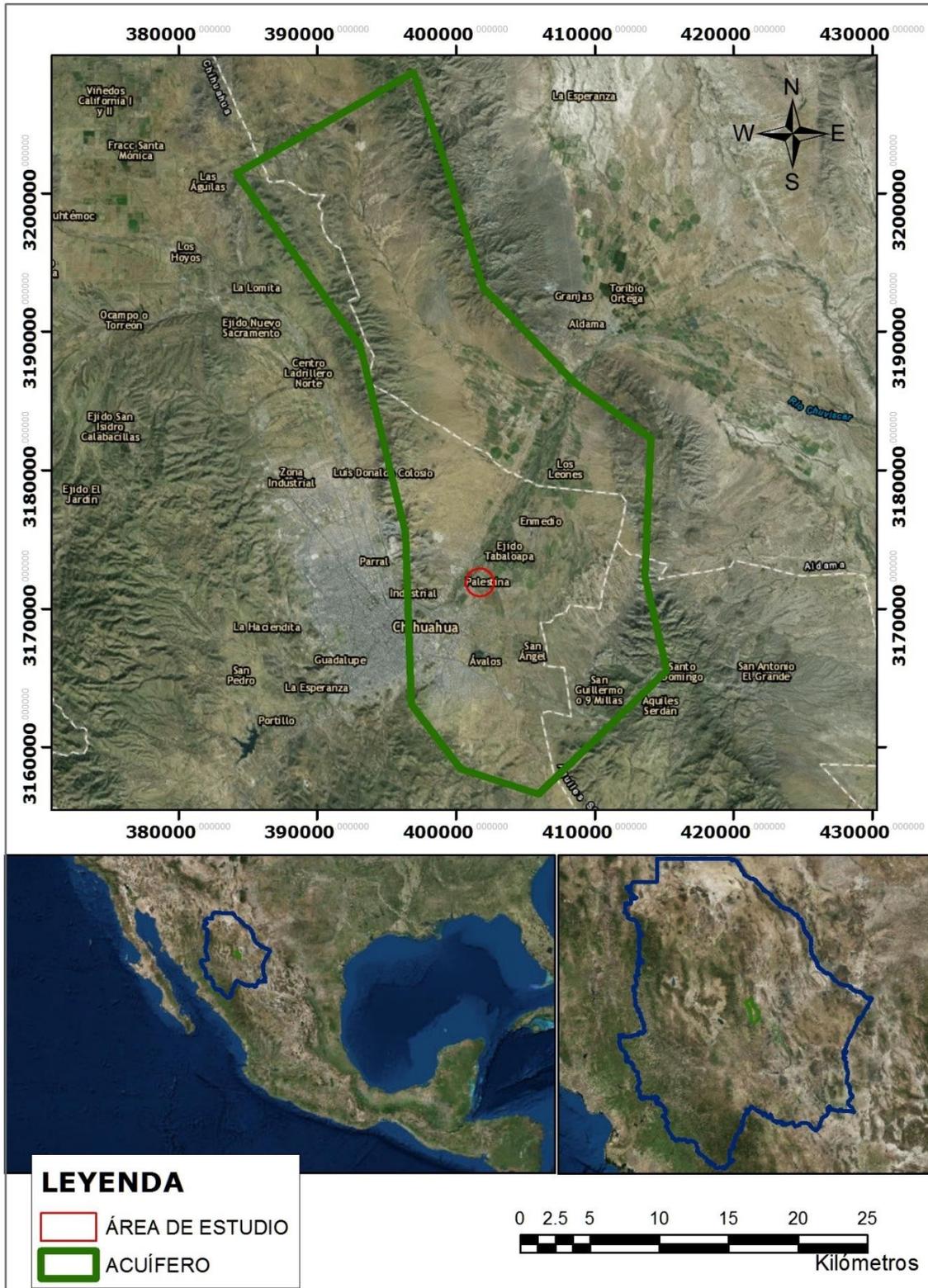


Figura 2.- Localización del Acuífero Tabalaopa Aldama.



1.3.2 Hidrología

El Acuífero Tabalaopa Aldama ubicado en la Región Hidrológica 24, Bravo-Conchos en la mesa del Norte comprende los estados de Chihuahua, Durango y Coahuila. Se considera, una de las regiones hidrológicas de mayor importancia porque tiene la corriente más destacada del estado que es la del Río Conchos (CONAGUA, 2003).

El Acuífero está localizado en la Cuenca Río Conchos-Presa el Granero, dentro de la subcuenca Río Chuviscar (INEGI, 2003). Las corrientes superficiales presentes en el Acuífero son efímeras y estacionales. El Río Chuviscar cuenta con escurrimientos continuos debido a los efluentes de aguas tratadas arrojadas por las Plantas de Tratamiento de la ciudad de Chihuahua. Tiene como principales afluentes El Mimbres, ubicado al Norte, Los Nogales al sur y Santa Eulalia al sureste (CONAGUA, 2003). La Figura 3 muestra la hidrografía del área comprendida por el Acuífero Tabalaopa Aldama.

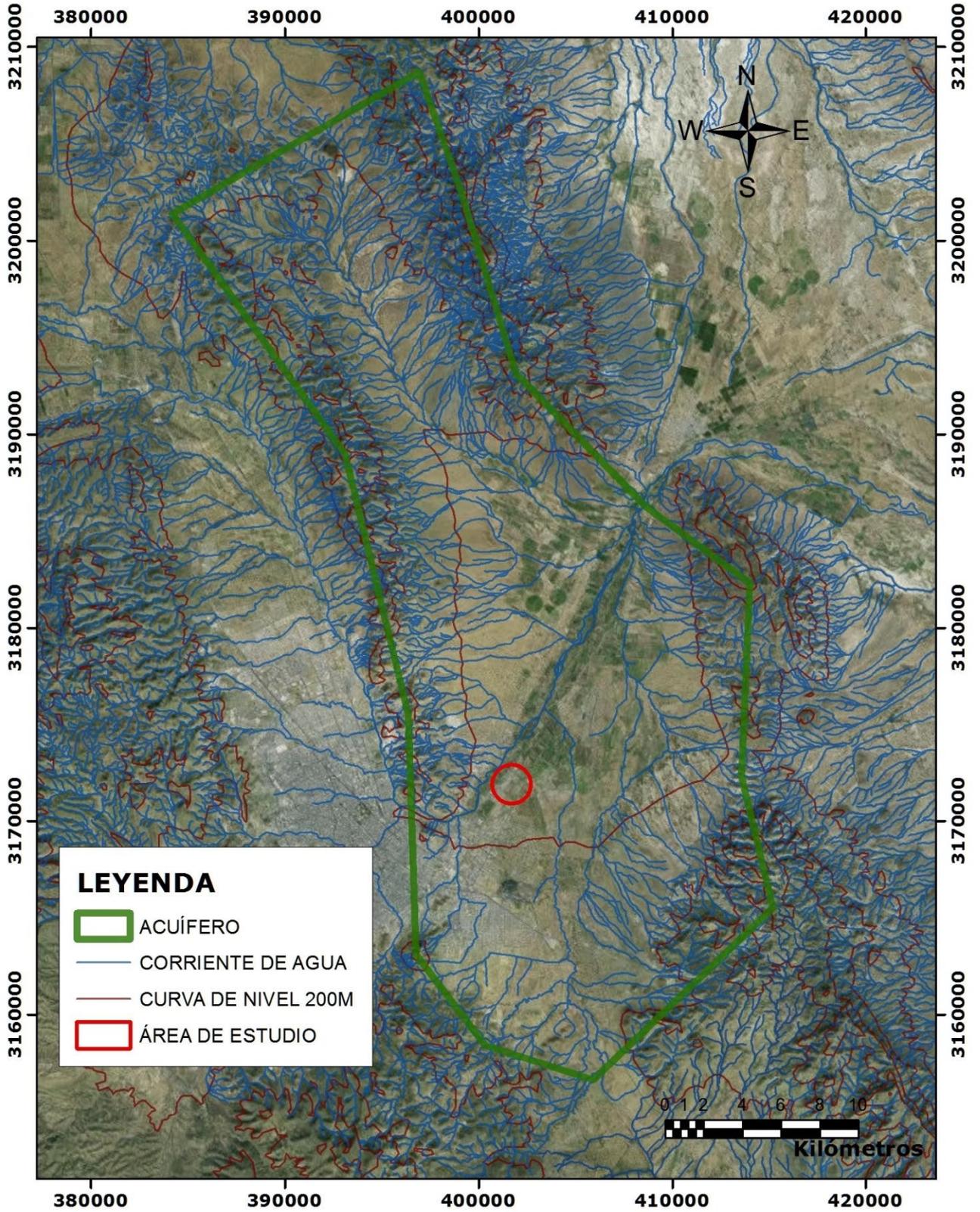


Figura 3.- Hidrografía del Acuífero Tabalaopa Aldama.

1.3.3 Geología del Acuífero Tabalaopa Aldama

El sustrato geológico de un territorio es resultado de complejos procesos ocurridos en diferentes épocas geológicas. Nos proporciona información regional referente a la naturaleza de las rocas, su origen y su edad, así como estructuras geológicas que las afectan, además de información puntual de áreas geoeconómicas (Ver Figura 4).

El área de estudio se encuentra emplazada en la suprovincia Sierras y Llanuras del Norte, donde se encuentran distintas litologías. A continuación se da una breve descripción del término.

Lutitas-Areniscas

Esta unidad aflora en la zona noreste del acuífero y es la unidad más antigua la cual data en el Pérmico. Por conformarse por lutitas y areniscas presenta baja permeabilidad.

Calizas

Las calizas afloran en varias secciones del acuífero, aunque no en grandes extensiones, se localizan al noreste, este y suroeste dentro de los límites del acuífero, al pertenecer al Albiano esta unidad sobre yace a las Lutitas –Areniscas.

Tobas Riolíticas

Esta unidad pertenece al Eoceno y aflora al sur, oeste, este y noreste dentro de los límites del acuífero, está constituida por tobas de composición riolítica y al pertenecer al Eoceno sobre yace a la unidad de las Calizas.



Conglomerado

Aflora en gran parte del acuífero y lo hace cubriendo gran parte de las tobas riolíticas, esta unidad pertenece al Holoceno.

Aluvión

Este paquete pertenece a material del cuaternario cubre en su mayoría al conglomerado y otras unidades preexistentes, conformada por gravas, arenas y limos, esta unidad es donde se localiza el área de estudio.

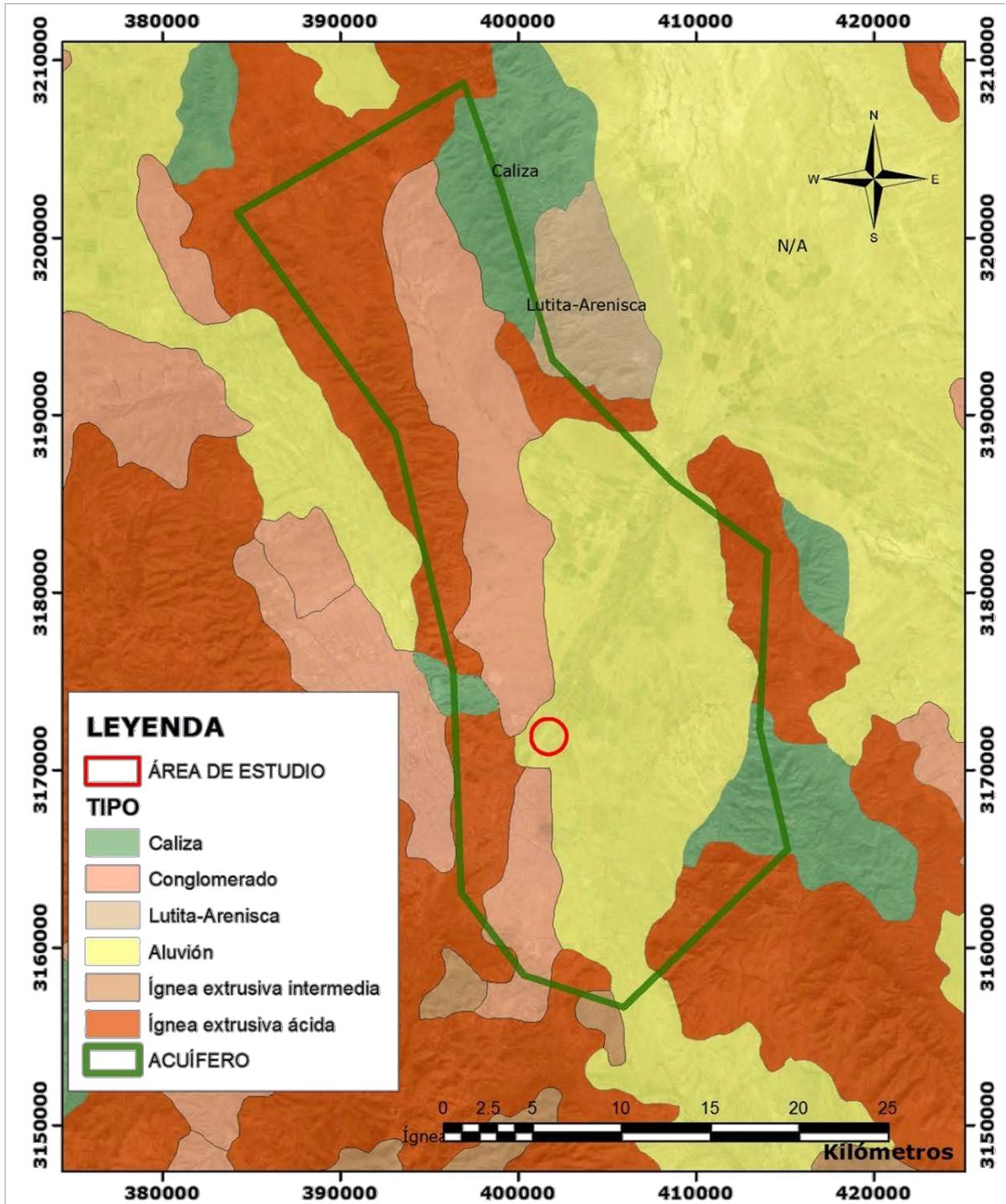


Figura 4.- Geología del Acuífero Tabalaopa Aldama.



1.4 CALIDAD DEL AGUA NATIVA

El conocimiento de la calidad del agua subterránea es tan relevante como conocer su origen y evolución. El término de calidad de agua se basa principalmente en las características del agua con relación a los valores de referencia que se tienen como límites permisibles establecidos en una normatividad. Con estos valores se puede determinar la calidad adecuada para el consumo humano u otras actividades. Es medida por factores microbiológicos, químicos y físicos.

Cada día aumenta la demanda de agua con una calidad apta para satisfacer las necesidades humanas. En primera instancia, es necesario conocer los factores que participan en la variación de la calidad del agua subterránea. Estos son, la combinación que se obtiene ante los procesos naturales como la meteorización, la interacción agua-roca en el recorrido hacia el acuífero y los procesos de recarga desde la superficie de una forma natural o antropogénica.

La FAO en su libro “Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos” menciona que la agricultura es considerada como la causa principal de contaminación de las aguas subterráneas en los Estados Unidos. Este estudio se realizó en 1992 y se reconoció que 49 de los 50 estados estudiados mencionaron que el nitrato es el principal contaminante de las aguas subterráneas, seguido de los plaguicidas. Se llegó a la conclusión que «más del 75 por ciento de los estados reconocían que las actividades agrícolas representaban una amenaza significativa para la calidad de las aguas subterráneas» (Ongley, 1997).

Existen muchos factores que pueden explicar esta situación, pero en general se puede exponer que ello se debe a las estrategias de saneamiento y protección que se han adoptado, basadas en un esquema clásico: contaminante-sistema de tratamiento- disposición al medio



ambiente o reutilización. Basándose en esta situación, se han modificado y desarrollado nuevas tecnologías enfocadas en regular dicha contaminación.

En principio, la calidad del agua está regulada por medio de Normas Oficiales Mexicanas como las que se mencionan en el apartado 1.7.

Se tienen registros de la calidad del agua nativa de la zona de estudio, en los cuales los análisis efectuados muestran una calidad baja donde se presenta un grado de contaminación. Otro factor que regula la calidad, es que antes no se contaba con la planta de tratamiento en la zona sur y el agua proveniente de la zona urbana se vertía sobre el suelo o era un recurso de regadío para las zonas agrícolas. Por esta situación se buscaron estrategias de remediación mediante la dilución por efecto del aumento del caudal subterráneo, con la estrategia MAR.

1.4.1 Parámetros químicos indicadores de la calidad de agua

El término de calidad de agua es relativo. Al momento de definir si un agua califica para un objetivo en particular, se debe considerar el uso al que se va destinar.

Existen diferentes parámetros indicadores de calidad del agua. Por mencionarlos existen los parámetros Físicos, Químicos, Biológicos y Radiológicos. En este estudio, el interés se centra en solo un grupo, los químicos y dentro de este grupo solo se hará hincapié en las formas del nitrógeno como lo son el Nitrógeno Amoniacal (NH_4^+), Nitritos (NO_2^-) y Nitratos (NO_3^-).

Los tres compuestos son formas inorgánicas de Nitrógeno, pero el contaminante inorgánico más común identificado en aguas subterráneas es el Nitrato, debido a su forma

más estable y su alta solubilidad en agua. La oxidación aeróbica de nitrógeno orgánico y amoniacal lleva a la transformación de nitritos y posteriormente estos a nitratos. Un elevado contenido de nitratos puede significar la presencia de agua contaminada por un largo periodo de tiempo.

La NOM-127-SSA1-1994 que establece los límites permisibles de calidad para el agua potable, hace referencia a los tres constituyentes químicos citados (Véase Tabla 1).

Tabla 1.- Límites máximos permisibles que establece la NOM-127-SSA1-1994, “Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización”.

PARÁMETRO	LÍMITE (mg/l)
Nitratos (como N)	10.00
Nitritos (como N)	0.05
Nitrógeno amoniacal (como N)	0.50

1.4.2 Ciclo Bioquímico del Nitrógeno

El nitrógeno es un elemento biológicamente activo y participa en una gran variedad de reacciones que son importantes para la vida, las cuales en ocasiones pueden cambiar la calidad del agua. Está considerado como el elemento más abundante en la atmósfera. Hasta las formas más simples de vida contienen N_2 en su estructura celular.

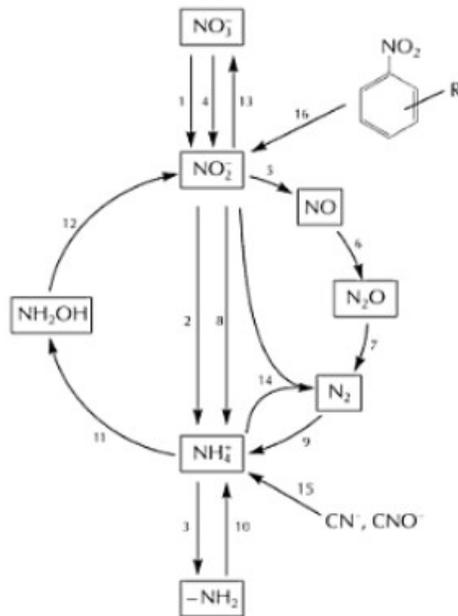
El nitrógeno, al igual que todos los elementos biológicamente importantes pasa por cambios cíclicos, se podría decir que es uno de los ciclos más complicados dado que sigue

una serie de procesos físicos, químicos y biológicos (CICEANA, 2007). Un átomo de nitrógeno pasa del estado orgánico al inorgánico y viceversa, en secuencias de procesos que implican actividades de organismos vivos y conversiones no biológicas.

Este elemento participa dinámicamente en la biosfera. Comprende diferentes procesos de transformación química que permiten la circulación del nitrógeno atmosférico a través de los ambientes terrestres y acuáticos (García & Herrera, 2015). Como primer proceso se tiene la fijación del nitrógeno (N_2), seguida de la mineralización, nitrificación, desnitrificación y la oxidación anaerobia del amonio. Estos procesos son producidos por organismos presentes en el suelo (Cerón & Aristizábal, 2012).

La mayoría de las plantas obtienen en N del amonio del suelo para sintetizar el N orgánico. Es su forma predominante en aguas domésticas. Cuando la biomasa decae, el N orgánico es transformado nuevamente a NH_4^+ convirtiendo a los desechos en buenos fertilizantes. Bajo condiciones estrictamente anaerobias el NH_4^+ es oxidado mediante el proceso de nitrificación que comienza con la oxidación del amoniaco a nitritos (bacterias Nitrosomas), seguido de la oxidación del nitrito al nitrato (bacterias Nitrobacter) (Herrera *et al.*, 2015). Después del N_2 el NO_3^- es la forma más estable del Nitrógeno en la mayoría de las aguas subterráneas seguido del NO_2^- .

Las sales del Nitrato son muy solubles y pueden existir en concentraciones muy altas en el agua. Son arrastradas por lixiviación en suelos con fuertes precipitaciones. En la agricultura el proceso de nitrificación no es muy beneficioso. El proceso de oxidación transforma una fuente de nitrógeno NH_4^+ a NO_3^- , que se absorbe al material arcilloso cargado negativamente y es trasladado fácilmente a las aguas subterráneas (Massol, 1994). Para la reducción de este proceso en la agricultura se utiliza con frecuencia NH_3 como fertilizante nitrogenado. En la Figura 5 se muestra el ciclo bioquímico del Nitrógeno.



Estados de Oxidación de compuestos de nitrógeno en la biosfera

Compuesto		Número de oxidación
N orgánico	R-NH ₂	-3
Amoniaco	NH ₃	-3
Dinitrógeno	N ₂	0
Óxido nitroso	N ₂ O	+1
Óxido nítrico	NO	+2
Nitrito	NO ₂ ⁻	+3
Dióxido de nitrógeno	NO ₂	+4
Nitrato	NO ₃ ⁻	+5

- Procesos: Asimilación de nitrato y amonio: 1, 2, 3
 Desnitrificación (respiración): 4, 5, 6, 7
 Fijación de nitrógeno: 9
 Amonificación: 8, 10
 Nitrificación: 11, 12, 13
 Oxidación anaerobia de amonio: 14
 Cianotrofia: 15
 Oxidación de nitroaromáticos: 16

Figura 5.- Ciclo bioquímico del Nitrógeno (Castillo *et al.*, 2005).

1.5 AGUA RESIDUAL TRATADA Y SU USO

1.5.1 Origen del agua residual

Se entiende por agua residual a la acción y efecto que se da por medio de acciones antropogénicas donde se cambia la composición inicial del agua. Esta consiste introducir de forma directa o indirecta materias contaminantes. Altera perjudicialmente la calidad del recurso imposibilitándolo para un uso posterior sin un tratamiento previo (Cuenca, Alvarado, & Camacho, 2012).

El agua residual es una combinación de varias fuentes hídricas. Su clasificación consiste en:



- Agua Residual Doméstica (ARD)

Fuente hídrica proveniente de actividades domésticas comunes de la vida diaria. Suelen contener gran cantidad de materia orgánica, microorganismos, detergentes y grasas. Su composición se ve influenciada por diferentes factores como lo son los hábitos alimenticios y consumo de productos de limpieza. Estos factores varían según la población que lo genera.

- Aguas Blancas o de Lluvia (AB ó ALL)

Son originadas por la precipitación (lluvia, nieve o hielo). Este escurrimiento superficial fluye desde de varias superficies arrastrando materiales orgánicos e inorgánicos acumulados en las superficies. Suelen estar generalmente muy contaminados. La composición de este recurso varía según su procedencia y de las actividades o uso de suelo que se tenga.

- Agua residual industrial (ARI)

Procedentes de diferentes procesos industriales. Su principal composición contiene aceites, detergentes, grasas, antibióticos, ácidos, productos de origen químico, mineral, entre otros más. Según el tipo de proceso industrial o el tipo de materias primas utilizadas variara la composición. Los ARI suelen ser alcalinos y tóxicos.

- Agua residual agrícola (ARA)

Procedentes de fuentes agrarias provenientes de escorrentía superficial. Las ARA tienen como fuente original las aguas procedentes de zonas urbanas. Estas son aprovechadas para



riego con o sin un tratamiento previo. Se caracterizan por la presencia de pesticidas y fertilizantes de diferentes composiciones. La clasificación

1.5.2 Uso del agua residual tratada (ART)

Muchas regiones del mundo están experimentando crecientes problemas de escasez de agua y una gran demanda en comparación a su disponibilidad se han dado a la tarea de la búsqueda de nuevas fuentes para el abastecimiento de la población. Por esta razón hay un gran interés en la utilización del agua residual tratada.

Históricamente el uso de las ART se ha orientado principalmente a la actividad agrícola. Esta ha dominado y continúa haciéndolo, pero en la última década las ART se han utilizado cada vez más para paisajes y recarga a las aguas subterráneas (FAO.org.mx).

Existen diferentes usos principales a los que se destina ART. En este apartado solo se mencionaran tres de estos usos. En primer lugar una de las prácticas que se lleva a cabo desde la antigüedad hasta el día de hoy es la introducción del agua residual sin tratamiento al terreno natural. En la actualidad, por tratarse de agua que fue sometida a un proceso de depuración se usa con propósitos productivos para el reúso del agua residual tratada (Álvarez, 2002).

En principio la agricultura constituye el usuario que mayores consumos de agua demandada, por lo que el uso de agua residual tratada presenta, entre múltiples ventajas la de ser una fuente constante y segura en periodos de escasas, cuando las lluvias son insuficientes para mantener los cultivos. También es un aporte continuo de nutrientes para los sembradíos porque tienen un valor semejante al fertilizante, esto hace que cuenten con un mejor rendimiento. Es utilizable en zonas agrarias ya que el agua que se emplea requiere un nivel

de calidad menos estricto. Es un recurso de gran valor porque permite conservar el agua dulce para un fin de mayor valor económico (Winpenny *et al.*, 2013).

Un beneficio adicional en cuanto a la utilización ART en riego, es que permite que las sustancias orgánicas puedan ser degradadas biológicamente en el suelo, durante la infiltración a través del terreno de cultivo. Teniendo en cuenta que dichos componentes pueden ser posteriormente asimilados por las plantas o cultivos.

En segundo lugar se encuentra la Recarga de Acuíferos (MAR) con la utilización de aguas recuperadas. Esta técnica ha tenido gran aceptación dentro de nuestra población. El principal fin es el abastecimiento urbano con la utilización de dicha fuente, pero cabe mencionar que la extracción será después de un largo periodo de tiempo en la cual se pueda ver reflejada la recarga (Bekele *et al.*, 2013). En zonas urbanas el uso de ART que han recibido un adecuado tratamiento ofrece beneficios para proporcionar un buen suministro y lograr la sostenibilidad del recurso, reduciendo la demanda de agua. En la reutilización con la estrategia MAR se tiene una depuración final para ART. El tratamiento previo del agua residual es importante y no dependerá del sistema de recarga utilizado y de su uso final al que se destine el agua recuperada.

Por medio de MAR se efectúa otra técnica para la reutilización de las aguas recuperadas. Esto es en zonas costeras donde se pretende controlar la intrusión salina a los acuíferos. El agua es inyectada en el reservorio a fin crear una barrera ante dicha intrusión y así mismo propiciar la recarga artificial utilizando como fuente para abastecimiento público (Ortuño *et al.*, 2009).



El tercer lugar lo ocupan los usos ambientales y recreativos. En el cual se incluyen la restauración de humedales, restauración de acuíferos y restitución de caudales ecológicos. En cuanto a los recreativos es empleado para riego de parques, campos de golf y áreas forestales.

1.6 RECARGA DE ACUÍFEROS NATURALES Y ARTIFICIALES

La recarga de un acuífero se puede clasificar en dos grandes grupos; natural e inducida.

1.6.1 Recarga Natural a los Acuíferos

La recarga natural de los acuíferos procede principalmente de la precipitación en forma de lluvia o nieve, llegando así a infiltrarse al suelo; es un proceso que forma parte del ciclo hidrológico, existen diferentes formas para recargar un acuífero. Como ya se mencionó con anterioridad, la infiltración del agua en el suelo por medio de la precipitación es la principal fuente de recarga, existen otras formas de recarga natural como lo es la transferencia de una unidad hidrogeológica a otra de un acuífero o un acuitardo.

La recarga natural depende de la capacidad de almacenamiento del acuífero, si el reservorio ya no tiene más capacidad de almacenamiento; el agua pasará a tomar distintos destinos como por ejemplo trasladar el recurso a otro acuífero. Otra forma de recarga es provocada por la infiltración desde ríos, lagos o cualquier otra masa de agua superficial (Irastortza, 2009).

Para un mejor entendimiento del proceso de recarga natural, es importante definir tres conceptos como lo son la infiltración, la percolación y la recarga.

○ **Infiltración:** Es la filtración que se da desde la superficie hacia la zona no saturada, la infiltración está más relacionada con el movimiento del agua en la parte edáfica del suelo (lugar donde se da el desarrollo radicular de las plantas), se produce por la acción conjunta de dos fuerzas que son la gravedad y la atracción molecular, que actúan en un mismo sentido u opuesto; y además la infiltración está influenciada por las precipitaciones y las condiciones naturales del terreno (Véase Figura 6).

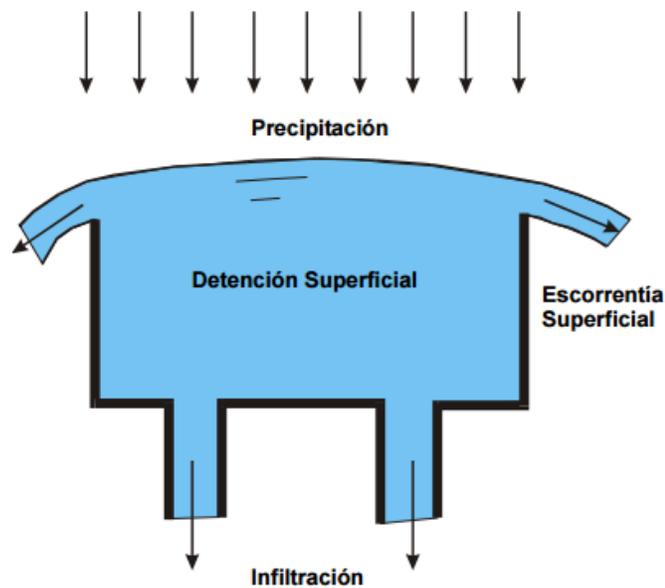


Figura 6.- Esquema explicativo para mostrar el proceso de infiltración.

○ **Percolación:** Es el movimiento vertical del agua dentro de la zona no saturada, la infiltración y la percolación van de la mano puesto que la infiltración no puede continuar libremente, hasta que la percolación haya removido el agua de las capas superiores del suelo.

- **Recarga:** El proceso que genera la recarga es la infiltración del agua hacia la zona no saturada, el agua aprovecha los poros o fisuras que tienen las rocas pasando a través de ellas y llegando así hasta el nivel del acuífero o nivel freático para así lograr el almacenamiento, de grandes volúmenes de agua formando parte de las reservas naturales. Obsérvese en la Figura 7.

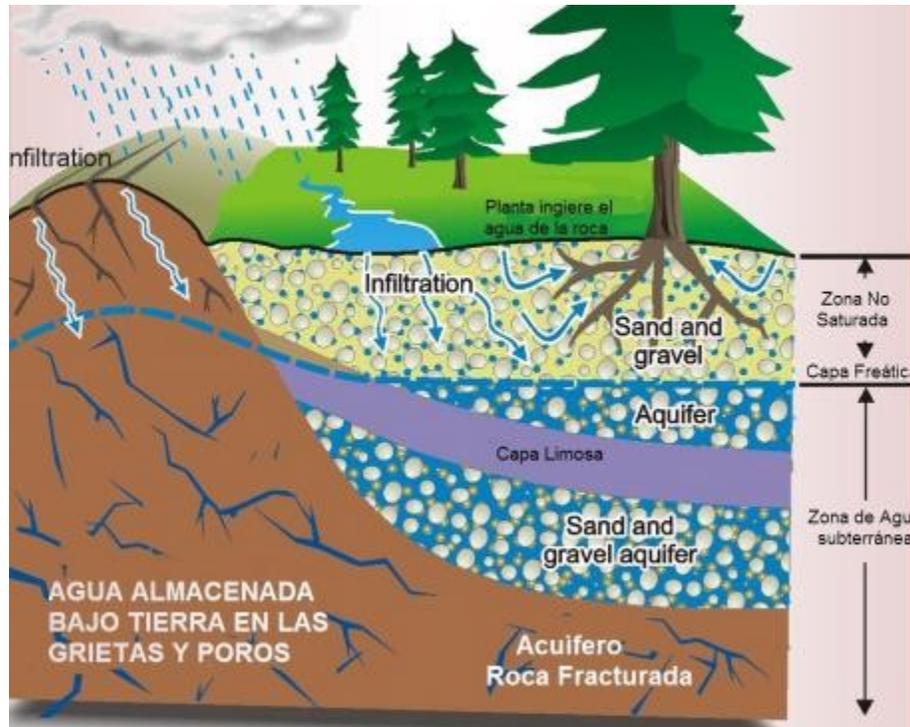


Figura 7.- Modelo de recarga natural de un Acuífero.

1.6.2 Recarga Artificial de Acuíferos o Recarga Inducida (MAR)

La Recarga Artificial de Acuíferos, se define como el proceso o conjunto de técnicas que permiten mediante intervención antropogénica, la introducción directa o inducida de agua a un acuífero donde se incrementan los niveles piezómetros y, se optimiza la calidad

del agua nativa como la purificación del agua filtrada (DOF, 2003). La recarga artificial sirve como complemento a la recarga natural de un acuífero, añade a este un rendimiento seguro y mejora sus condiciones.

Custodio en 1986 definió el concepto de recarga artificial como «la ciencia y el conjunto de técnicas que permiten aumentar la disponibilidad de agua subterránea, con la calidad apropiada a los usos a la que se destina mediante una intervención consciente, directa o indirecta en el ciclo natural del agua».

Una condición necesaria, es que el suelo cuente con espacios vacíos en el medio poroso para que se lleve a cabo la infiltración y, sean rellenados por el agua recargada (Custodio, 1976) y tomar en cuenta que es el principal medio y filtro para conducir el agua al subsuelo. También añade que la efectividad de la recarga se relaciona directamente con el medio poroso y el agua recargada, para que esté en la mejor disposición efectuándose dicha recarga y posteriormente hacer uso del agua, en cuanto a cantidad y calidad que se requiera para el uso al cual se va a destinar (Murillo Díaz *et al*, 2011).

Es importante considerar que MAR es únicamente efectiva en acuíferos sobreexplotados, donde se excede la cantidad de agua extraída a la recuperación del acuífero, por el proceso natural de recarga o donde la velocidad de circulación del flujo subterráneo; es lo suficientemente lento para no alcanzar el punto de almacenamiento o depositación en el reservorio, antes de alcanzar el período de extracción del agua subterránea, es decir, que ésta extracción no puede exceder la cantidad de recarga natural.

Entre los diversos beneficios que se obtiene de la utilización de la estrategia MAR, por mencionar algunos se cuentan: suministro adicional de agua de fuentes que de lo contrario podrían desperdiciarse, almacenamiento del agua recargada reduciendo con ello las

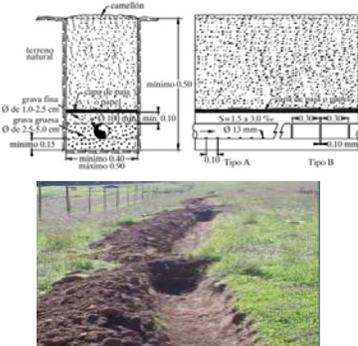
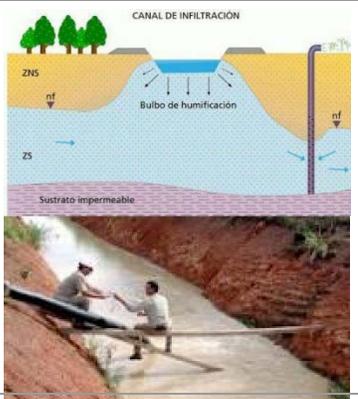


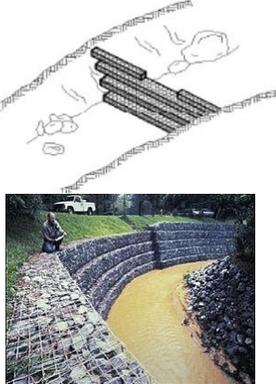
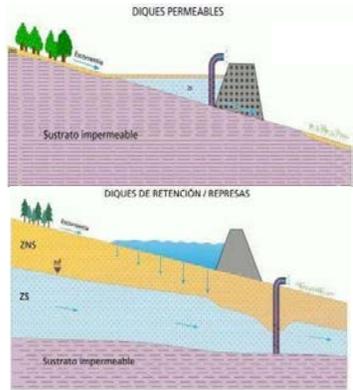
pérdidas por evaporación, la reducción de intrusión salina, suministros de agua potable, mayor disponibilidad para usos agrícolas, industriales, ambientales o de consumo humano, restaurar el equilibrio del sistema de aguas subterráneas, reducción del descenso piezométrico, aprovechamiento de las propiedades filtrantes del suelo en la utilización de aguas regeneradas, dilución de ion nitratos, cloruros u otros componentes químicos en las aguas nativas de los reservorios, entre otros más beneficios que aporta esta estrategia; hoy en día es usualmente utilizada en áreas donde las fuentes de agua son muy escasas o el acuífero se encuentra sobreexplotado (CCVM, 2010).

Existen diferentes métodos para llevar a cabo la recarga de un acuífero. Estos se seleccionan en base a las características hidrogeológicas locales y la calidad de agua disponible. En muchas de estas técnicas no se contemplaba dicha recarga, si no que la recarga se presentó accidentalmente, en otros casos el propósito es precisamente recargar el acuífero. Entre ellas se encuentra la recarga inducida, que puede efectuarse con diferentes alternativas como los son las galerías, filtración por esparcimiento en áreas de cultivo y áreas forestales, pozos de inyección, presa de gaviones, canales de infiltración, balsas de infiltración, entre otras más. Estas técnicas demuestran ser eficaces en el mantenimiento y reposición de los acuíferos (Kavuri M, 2011).

El suelo juega un papel muy importante, es el medio y filtro principal para conducir el agua al subsuelo. Se han realizado diferentes estudios a través de los años para determinar los principales factores, que hacen posible un verdadero suelo filtrante; al obtener los resultados se optaron por realizar técnicas para hacer uso del poder filtrante del suelo, las más usadas desde la antigüedad hasta la actualidad se describen en el siguiente apartado.

Métodos de recarga artificial

Dispositivos Superficiales		
Técnica	Descripción	Imagen
<i>Zanjas de infiltración</i>	Excavaciones lineales, realizadas en el terreno natural, construidas en función de la topografía del terreno. Su función es la retención de escorrentías, se pueden realizar siguiendo las curvas de nivel teniendo como beneficio mayor, infiltración y disminución de la erosión del suelo, evitando colmatación en el fondo de las estructuras.	
<i>Canales de infiltración</i>	Estructuras de conducción de agua, lineales con poca profundidad. La infiltración se da en el fondo de la estructura y por los laterales del canal, la ubicación de dichas obras debe ser en suelos permeables con capacidad de infiltración favorable, para la recarga de agua (ftp://ftp.fao.org, Noviembre 2016).	
<i>Balsas de infiltración</i>	Dispositivos rectangulares poco profundos pero de gran superficie. La infiltración se da directa sobre el terreno donde su lecho es un suelo permeable con taludes impermeables y con cierta inclinación. Las fuentes de abastecimiento pueden ser de origen superficial, ej. Ríos o algún sistema alternativo como agua regenerada.	

<p><i>Presa de Gaviones</i></p>	<p>Dispositivos permanentes, permeables. Su estructura consiste en prismas rectangulares constituidos de alambre galvanizado denominado “gaviones”, estos son rellenos de piedra, su función es ser una presa filtrante disminuyendo la velocidad del escurrimiento y erosión, favoreciendo la retención de agua e infiltración de la misma, para formar parte de la recarga de acuíferos. (López-Martínez, 2009).</p>	
<p><i>Filtración por esparcimiento</i></p>	<p>Técnica útil para aprovechar el suelo filtrante o como se denomina hoy en día “filtro verde”. Es utilizada como depuración de aguas residuales que carecen de las características esenciales para el consumo humano, ej. Problemas en la calidad bacteriana, SDT, turbidez, etc. Consiste en esparcir el recurso sobre el suelo permeable, infiltrándose por la zona no saturada donde se realizan los diferentes procesos, para la depuración del agua y así llegar a recargar el acuífero satisfactoriamente.</p>	
<p><i>Retorno de Riego</i></p>	<p>Técnica incidental que no cuenta con la infraestructura específica para la recarga de acuíferos, es una consecuencia de actividades antropogénicas, primordialmente en áreas de cultivo o forestales (www.conagua.gob.mx, Noviembre 2016).</p>	
<p><i>Diques</i></p>	<p>Estructuras que retardan el flujo natural de un río o escorrentía dando paso a la infiltración, así mismo disminuye la erosión. Existen dos diferentes métodos: Los diques permeables constan de una estructura permeable con un sustrato impermeable, donde la principal función de la estructura es filtrar el agua y permitir el paso a través de ella (Figura 1). Los diques de retención como su nombre lo dice, retienen el flujo de agua para aprovechar la infiltración directa al subsuelo; como se muestra en la figura 2 (Gale, 2005).</p>	

<p><i>Recarga Inducida</i></p>	<p>La recarga inducida es una técnica utilizada en el aporte de agua al acuífero, cuando se cuenta con drenes naturales (ríos afluentes, arroyos o humedales). Se basa principalmente en la exploración y perforación de pozos aledaños a la zona de los drenes, teniendo como objetivo disminuir el nivel freático del acuífero, por medio de bombeo y así aumentar la tasa de infiltración a través del dren. El agua obtiene un tratamiento al ser introducida en la zona vadosa, llegando a formar parte del acuífero para su posterior explotación (Irastortza, 2009).</p>	
--------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

<p style="text-align: center;">Dispositivos Profundos</p>		
<p><i>Galerías profundas</i></p>	<p>Excavaciones destinadas para captación y conducción del agua subterránea, destinándola hacia un punto determinado. Su construcción es principalmente en lechos arenosos de ríos, con suelos de alta porosidad efectiva. El agua proviene de fuentes superficiales y precipitaciones, estas son conducidas directamente hacia las zonas de captación. La parte inferior de la galería debe estar por debajo del nivel de agua en la zona saturada (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 2002).</p>	
<p><i>Pozos de Inyección</i></p>	<p>Dispositivos donde el agua se inyecta a profundidad, a través de una tubería que penetre por debajo del nivel freático, se realiza por medio de gravedad o mediante presión. La recarga se puede efectuar mediante obras hidráulicas donde el recurso este agotado, o bien realizar la obra desde el inicio. La calidad del agua a inyectar debe ser igual o mejor al agua nativa del reservorio, para evitar contaminación (Cortez, 2012).</p>	



1.7 NORMATIVIDAD

La calidad del agua está regulada, por medio de Normas Oficiales Mexicanas y otras disposiciones normativas.

El día 7 de Agosto del 2009, se publicó en el Diario Oficial de la Federación (DOF) la Norma Oficial Mexicana *NOM-014-CNA-2003*, donde se establecen los “requisitos para la recarga artificial de Acuíferos con agua residual tratada”, la cual tiene como objetivo establecer los requisitos que se deben cumplir, en los sistemas de recarga artificial de acuíferos al utilizar agua residual tratada como fuente principal. Se debe cumplir con la calidad del agua residual para la recarga, la operación y el monitoreo de dicha obra (DOF, 2009).

De igual modo el 18 de Agosto del 2009, se hizo público en el Diario Oficial de la Federación (DOF) la Norma Oficial Mexicana *NOM-015-CONAGUA-2007*, “Infiltración artificial de agua a los acuíferos.- Características y Especificaciones de las Obras y el Agua”. El objetivo es proteger la calidad del agua de los acuíferos y, así mismo aprovechar el agua pluvial y de escurrimientos superficiales; para aumentar la disponibilidad de agua subterránea a través de la infiltración artificial (DOF, 2009).

De la misma manera la Norma Oficial Mexicana *NOM-001-SEMARNAT-1996*, se publicó el proyecto en el Diario Oficial de la Federación el 6 de Enero de 1997, que “Establece los límites máximos permisibles de contaminantes, en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales”, (CONAGUA, 1997) con el objetivo de proteger su calidad y posibilitar sus usos.



1.8 PROBLEMÁTICA

Hoy en día las investigaciones relacionadas con el agua se han vuelto muy abundantes. De años atrás hasta la actualidad se ha permitido observar la evolución que ha tenido el uso de dicho recurso; pero pocos estudios científicos están relacionados con el agua subterránea, el interés que se muestra es poco en comparación con el agua superficial. Un factor que puede ser relevante es que no se cuenta con la visibilidad superficial, para entender los procesos que conlleva el entendimiento del comportamiento de las aguas subterráneas y, así mismo teniendo en cuenta que su proceso es a largo plazo. Adicionalmente, se sabe que la información disponible del agua subterránea y todos sus procesos es relativamente reciente (Dominguez & Carrillo-Rivera, 2007).

El agua subterránea con cantidad necesaria y calidad apta para el consumo humano, es una cuestión prioritaria para la sociedad en la que vivimos (García *et al.*, 2006). Cada vez son más las actividades que incluyen en la utilización de este recurso. Por esta razón, una de las prácticas que se efectuaron en tiempos pasados, fue la disposición directa sin tratamiento previo en los cuerpos de agua superficiales y esparcimiento en el terreno; esto implica numerosos riesgos tanto para la salud pública, como problemas ambientales (Campos *et al.*, 2011).

Bajo este planteamiento del problema, se incide en la necesidad de estudiar nuevas y mejores alternativas, para satisfacer el abastecimiento del recurso natural. Una de las alternativas es mejorar la calidad en los tratamientos de las aguas residuales o regeneradas por las plantas de tratamiento; en estos requerimientos se busca la sencillez en operación y mantenimiento a bajo costo, por lo cual se plantea conocer si aunado a estos procesos con un pre-tratamiento a las aguas crudas, es posible que el suelo funcione como agente depurador natural en la remoción del Nitrógeno Amoniacal, Nitratos y Nitritos, al introducir



el agua regenerada en el proyecto piloto de recarga de Acuíferos, ubicado en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Sur en la Ciudad de Chihuahua.

1.9 JUSTIFICACIÓN

Dada que no existe una línea base para el análisis específico de los parámetros determinados en la NOM-014-CONAGUA-2003, es necesario seleccionar puntos de muestreo y realizar el análisis de dichos parámetros de la norma; sin embargo dado que se cuenta con estudios y antecedentes de contenido de hidrogeoquímica del acuífero, donde se emplaza el proyecto de recarga, es posible complementar y reinterpretar dicha información, con la finalidad de dar cumplimiento a lo establecido en la NOM-014, de monitoreo y calidad tanto del agua nativa como el agua de fuente de recarga.

1.10 OBJETIVOS

1.10.1 Objetivo General

Muestrear y analizar NH_4^+ , NO_3^- y NO_2^- para definir una línea base, en el agua nativa y su interacción con el agua recargada a través de la zona vadosa.

1.10.2 Objetivos Específicos

1. Recopilar información existente de hidrogeología e hidrogeoquímica.



2. Analizar la información recopilada.
3. Definir los puntos representativos, para realizar el muestreo de agua en los pozos de observación.
4. Definir el intervalo de muestreo.
5. Recolectar muestras para su respectivo análisis químico.
6. Caracterizar la calidad del agua nativa de la zona de estudio, antes de la recarga controlada (MAR).
7. Caracterizar la calidad del agua residual a inyectar en la balsa de infiltración.
8. Utilizar herramientas y softwares disponibles, para la interpretación de los análisis de calidad de agua.
9. Con los resultados obtenidos, compararlos con los límites establecidos con la norma (NOM-127-SSA1-1994) para agua de consumo humano.

1.11 HIPÓTESIS

Es posible determinar la línea base en los niveles de NH^{4+} , NO^{3-} Y NO^{2-} , del agua nativa y la interacción de estos provenientes del agua recargada, a través de la zona no saturada.

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

2.1 Estudios previos

- a) Karina Hernández en el 2015 realizó la Tesis de “Evaluación fisicoquímica de la calidad del agua de la presa “Chihuahua”, en Chihuahua, México”; en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua.



OBJETIVO: El presente estudio se hizo con el objeto de evaluar la calidad del agua de la presa Chihuahua, mediante la medición de parámetros fisicoquímicos.

APORTACIÓN: El agua de la presa en general se encuentra en buenas condiciones, se tienen concentraciones muy altas de calcio, magnesio y sólidos suspendidos en la entrada de la presa, sin embargo son eliminadas por deposición en su trayectoria hacia la salida.

- b) En la Tesis denominada “Análisis de la calidad del agua para consumo humano y percepción local, de las tecnologías apropiadas para su desinfección a escala domiciliaria, en la microcuenca El Limón, San Jerónimo, Honduras”, realizada por Mario René Mejía Clara Turrialba en el 2005. El presente estudio plantea un análisis de la calidad del agua, en los dos tipos de fuente denominados La Cangrejera y El Limón que drenan a la micro cuenca El Limón. Se realizó este análisis para determinar el grado de contaminación existente, identificar su origen, determinar el tipo de contaminante, jerarquizar las tecnologías que contaminan menos, hasta las que contaminan más.

OBJETIVO: Analizar la calidad del agua de la micro cuenca El Limón tomando en cuenta aspectos socioeconómicos, culturales y legales. Contribuir a la identificación y caracterización de tecnologías sencillas, eficientes, amigables con el ambiente, de fácil implementación en regiones rurales de escaso desarrollo socioeconómico, que permita mejorar la calidad del agua para consumo humano.

- c) Guerrero Romano Loya realizó en el 2010 la Tesis de “Efecto del riego con el agua residual tratada, en suelos y pastos de áreas verdes de la ciudad de Chihuahua” por la institución de la Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ingeniería.

OBJETIVO: Determinar los efectos en las características físicas y químicas de suelos y pastos, de las áreas verdes de la ciudad de Chihuahua que son regadas con agua residual tratada.



APORTACIÓN: Las propiedades de los suelos regados con agua residual, no variaron significativamente con respecto a los suelos regados con agua potable, la aplicación de agua residual tratada significó un beneficio para el suelo; aportando cantidades adicionales de fósforo, hierro, zinc y boro.

- d) El Ing. Abel R. Briones Saucedo realizó en el año 2011 la Tesis denominada “Evaluación del impacto del reúso del agua residual tratada en la ciudad de Chihuahua”; perteneciente a la UACH, Facultad de Ingeniería.

OBJETIVO: Evaluar los posibles impactos que se han generado en la ciudad de Chihuahua, como consecuencia de la utilización de aguas residuales tratadas (ART), en diversas actividades que no requieren agua potable.

APORTACIÓN: Del muestreo realizado el 44% supera al menos unos de los límites máximos permisibles, aunque la aplicación de ART con fines de riego no altera las propiedades físicas de los suelos. El uso del agua residual tratada aporta impactos positivos, generando beneficios ambientales y así contribuir al ahorro del agua potable.

- e) En el 2011 Liliana Esther Zamarrón realizó una Tesis nombrada “Análisis Hidrogeoquímicos de los acuíferos Chihuahua-Sacramento y el Sauz-Encinillas”, en la Facultad de Ingeniería perteneciente a la UACH.

OBJETIVO: Realizar un análisis hidrogeoquímico de los acuíferos Chihuahua-Sacramento y El Sauz-Encinillas, mediante la interpretación de datos publicados anteriormente.

APORTACIÓN: Dentro de ambos acuíferos predomina el anión bicarbonato (HCO_3), la composición del agua subterránea se mantiene clasificada dentro de la familia bicarbonatada cálcica; mientras que los cambios se presentaron en los años recientes, en Chihuahua-Sacramento se obtuvo un exceso de nitratos según la norma de límites permisibles.



f) En la revista Latino-Americana de Hidrogeología, se publicó un artículo llamado “Caracterización hidrogeoquímica del sistema de flujo Local-Regional de la sierra del Rosario (Cuba)”; en el año 2016 por Juan Reynerio Fagundo et al.

MATERIAL Y MÉTODOS: se hicieron mediciones de los parámetros geoquímicos a partir de un muestreo realizado, la calidad de los datos fue validada mediante varios sistemas informáticos basados en modelos estadísticos, químicos-físicos e hidrogeoquímicos.

APORTACIÓN: Se estableció un comportamiento geoquímico, de nueve grupos de aguas previamente seleccionadas dependiendo del ambiente geológico; se encontró que en la Sierra del Rosario, la litología y estructuras locales rigen la composición química del agua.

g) El Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios ambientales realizó una Guía de Monitoreo y Seguimiento del Agua (2004) en Bogotá.

ALCANCE: Integrar los lineamientos básicos que se deben tener en cuenta, para un programa de monitoreo del recurso hídrico en los ámbitos continental y marino.

OBJETIVO: Reconocer mediante la captura sistemática y estandarizada de información, el estado (en cantidad y calidad) del recurso hídrico en los ambientes continental (superficial y subterráneo) y marino y, su afectación por actividades antrópicas para soportar acciones y estrategias de protección, manejo y desarrollo del recurso.

h) En el artículo “Geoquímica de los sistemas de flujo de agua subterránea en rocas sedimentarias y rocas volcanogénicas de Loreto, BCS, México” realizado por González Abraham et al. en el año 2012, tuvo como objetivo determinar el origen de la composición química del agua subterránea del área de Loreto, Baja California Sur.

Se utilizaron modelos hidrogeoquímicos de balance de masa y mezcla de aguas, así como otras herramientas de la hidrogeoquímica.



Los patrones hidrogeoquímicos resultantes, se relacionan con flujos que son típicos de procesos de disolución y procesos de intercambio iónico. Se identificó con la mezcla de agua y los procesos de interacción agua-roca flujos locales, intermedios y regionales.

- i) En la Tesis “Determinación de la cinética de remoción de Nitrógeno proveniente de aguas residuales domésticas en suelos superficiales asociados a recarga de acuíferos de la zona de expansión occidental de Pereira” realizada en el año 2015 por los alumnos Miguel Ángel García Zapata y Stefanny Salemi Herrera. El objetivo general fue determinar la cinética de remoción de nitrógeno, proveniente de aguas residuales domésticas en suelos superficiales asociado a recarga de acuíferos de la zona de expansión Occidental de Pereira. METODOLOGÍA: Se realizó un diseño experimental que consistió en la adecuación de ocho columnas en tubos de PVC sanitaria. Estas columnas fueron alimentadas manualmente con el agua de la planta con un pre-tratamiento. Se realizó la determinación de parámetros como Nitratos, Nitritos, Nitrógeno Amoniacal, Nitrógeno Total y Nitrógeno Orgánico; cada parámetro se cuantificó con diferentes métodos y reactivos.

APORTACIÓN: Se encontró que la profundidad de la columna de suelo tiene una relación directa con la eficiencia de la remoción en el nitrógeno amoniacal, se identificó que el suelo funciona como filtro por su textura arcillosa.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

3.1 Localización de la zona de estudio

La zona de Estudio se encuentra ubicada dentro del Acuífero Tabalaopa Aldama, al SE de la ciudad de Chihuahua. El Proyecto Piloto de Recarga de Acuíferos actualmente se ubica dentro del área de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales en la porción sur de la ciudad de Chihuahua que se ubica sobre la avenida Juan Pablo II, en la colonia Palestina.



Se eligió dicha zona porque el agua utilizada para la recarga proviene del efluente de la planta de tratamiento. Evitando así costos en cuanto al traslado de la misma para dicho fin. A partir de la zona de estudio a un kilómetro a la redonda se encuentra emplazados siete pozos de monitoreo, tres más se ubican alrededor de la balsa de infiltración. (Ver Figura 8).

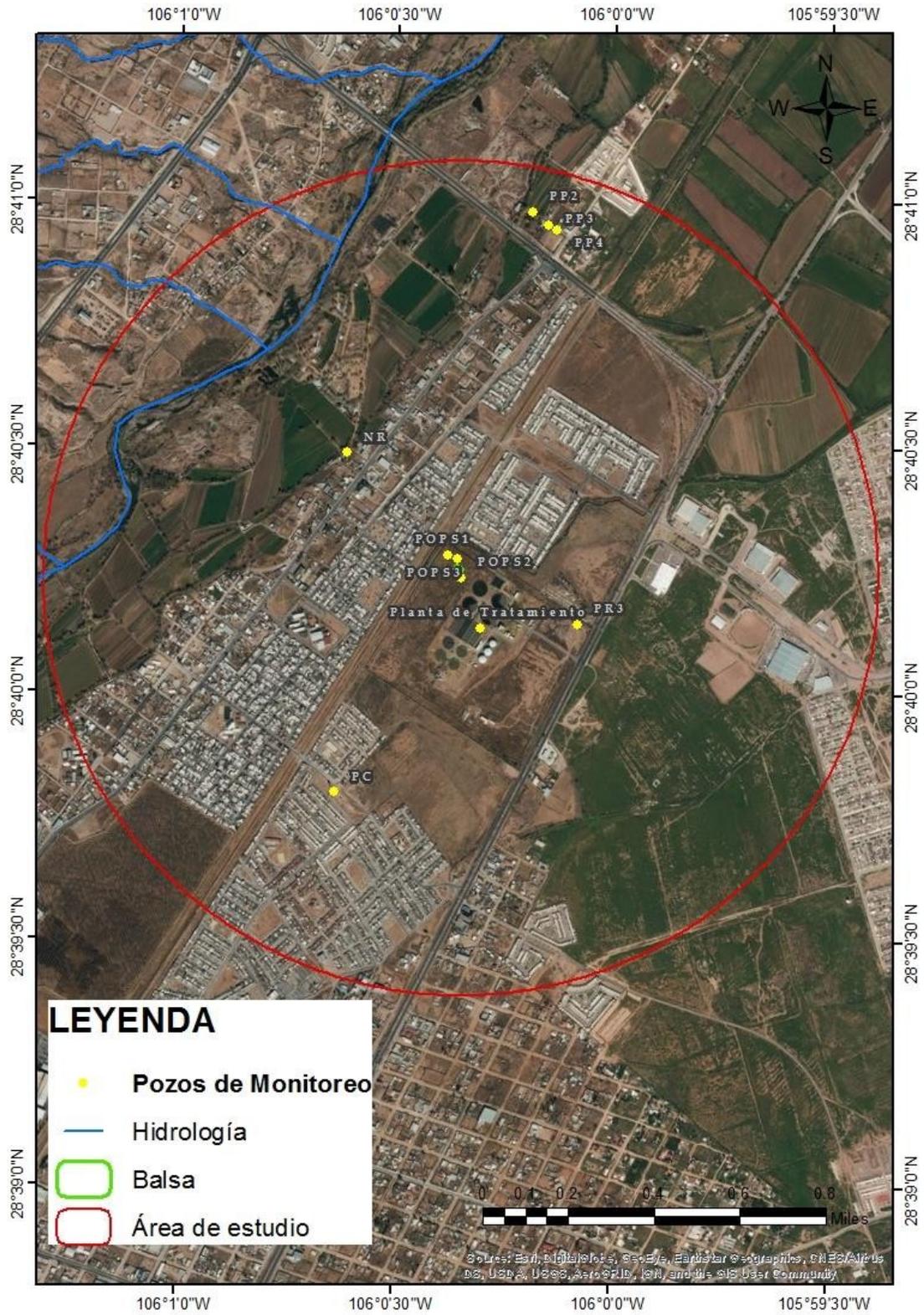


Figura 8.- Área de la zona de estudio. Localización de los pozos de monitoreo.



3.2 Integración de la información

Con la ayuda del software ArcGIS 10.1 se integró toda la información recopilada de hidrología, geología, flujos preferenciales e hidrogeoquímica, para la obtención de una información más completa y fácil de entender, para su posible explicación.

3.3 Red de pozos de monitoreo

La red de monitoreo de pozos, se definió siguiendo lo establecido en la NOM-014-CNA-2003. Dicha norma exige un programa que en forma periódica, antes y durante la recarga se tenga un registro de la calidad del agua utilizada para, dicha recarga (Efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales) y la calidad de la mezcla del agua recargada con la nativa.

Otro factor importante que se llevó a cabo, fue el diseño y construcción de pozos de monitoreo ubicados a distancias equivalentes a $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$, de la distancia total entre la balsa de infiltración y el punto de extracción más cercano.

Se construyeron 3 pozos de monitoreo aledaños a la balsa de infiltración, ubicados con las distancias especificadas con anterioridad. Cada pozo cuenta con su respectiva profundidad, Pozo observación planta Sur 1, cuenta con una profundidad de 70 metros. Pozo de observación planta Sur 2, 40 metros. Pozo de observación planta Sur 3, 40 metros.

El total de pozos utilizados para el programa de monitoreo son nueve. Se encuentran emplazados a dos kilómetros a la redonda de la balsa de infiltración. Se les estableció un nombre para su mejor identificación. (Véase Tabla 2)

Tabla 2.- Identificación de los pozos de observación por clave y coordenadas.

<i>POZO</i>	<i>IDENTIFICACIÓN (Siglas)</i>	<i>COORDENADAS (UTM)</i>
Pozo Observación Planta Sur 1	POPS1	401674.39 m E 3171988.64 m N
Pozo Observación Planta Sur 2	POPS2	401721.88 m E 3171904.87 m N
Pozo Observación Planta Sur 3	POPS3	401711.96 m E 3171975.89 m N
Pozo PEMEX 4	PP4	402085.26 m E 3173207.44 m N
Pozo PEMEX 3	PP3	402052.16 m E 3173228.98 m N.
Pozo PEMEX 2	PP2	401992.37 m E 3173278.65 m N
Noria Robinson	NR	401297.19 m E 3172374.86 m N
Pozo Robinson 3	PR3	402158.43 m E 3171728.02 m N
Pozo California	PC	401248.59 m E 3171100.45 m N

3.4 Programa de monitoreo

Se estableció un programa de monitoreo periódicamente de forma semanal. Este rango de tiempo se estableció así para su mayor observación, se realizó de forma manual



observándose las variaciones de la calidad del agua subterránea. Así lo establece la NOM-014-CONAGUA-2003.

3.5 Proceso de recolección de las muestras

Se ejecutó la recolección de muestras semanalmente, como se mencionó en el programa de monitoreo. Se efectuó a través de la utilización de un muestreador discreto, el cual se introdujo dentro del pozo de observación. Se extrajo la muestra de agua representativa; por último se vació en los equipos de recolección. Dichas muestras se llevaron al laboratorio que se encuentra ubicado en la planta de tratamiento de Aguas Residuales Norte en la ciudad de Chihuahua.

3.6 Determinación y análisis de los parámetros en laboratorio

Se determinaron los parámetros a analizar eligiéndose tres por su importancia, tanto para los distintos procesos bioquímicos que en ellos se lleva a cabo, como para definir la calidad de agua, entre los cuales se encuentra el Nitrógeno Amoniacal (N-NH_4^+), Nitrógeno de Nitratos (N-NO_3^-) y Nitrógeno de Nitritos (N-NO_2^-).

En el laboratorio cada parámetro fue analizado con diferentes métodos, todos estos referenciados a una norma como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3.- Muestra los límites máximos permisibles, método de análisis.

LÍMITES MÁXIMOS				
PARÁMETROS	UNIDADES	PERMISIBLES	MÉTODO	REFERENCIA A NORMA
NOM-127				
Nitrógeno Amoniacal (N-NH₄⁺)	mg/lit N-NH ₃	0.5	Colorimétrico 655 nm (Hach # 10031)	NMX-AA-026-SCFI-2010
Nitrógeno de Nitratos (N-NO₃⁻)	mg/lit N-NO ₃	10	Colorimétrico 500 nm (Hach # 8039)	NMX-AA-079-SCFI-2001
Nitrógeno Nitritos (N-NO₂⁻)	mg/lit N-NO ₂	0.05	Colorimétrico 507 nm (Hach # 8507)	NMX-AA-099-SCFI-2006

3.7 Análisis de resultados

Con la información obtenida de los resultados de laboratorio, se llevó a cabo la comparación de los parámetros elegidos para su interpretación. Esta se realizó con los datos de calidad de agua del efluente de la Planta de Tratamiento Sur y los datos obtenidos de los muestreos en los diferentes pozos de monitoreo. Con dicho resultado se llegó a la obtención de la clasificación de la calidad del agua. Se dio a conocer la correlación de los parámetros que se tuvieron de la mezcla del agua nativa con el agua recargada. Por último se comparó dicho análisis con los límites máximos permisibles que establece la NOM-127-SSA1-1994.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis Descriptivo

En este apartado se presenta el análisis, de los resultados de las interpretaciones y actividades realizadas. Para el análisis de cada uno de los parámetros químicos previamente elegidos, se establecieron líneas de tendencia en los gráficos realizados. Los datos de los parámetros que se analizaron se observó el comportamiento con respecto al tiempo (gráficas) para facilitar su interpretación. El rango de tiempo establecido para los análisis fisicoquímicos fue a partir de Agosto del 2015 a Mayo del 2016.

Tabla 4.- Nomenclatura utilizada para los pozos de observación.

Nomenclatura utilizada.

Pozo Observación Planta Sur 1	POPS1
Pozo Observación Planta Sur 2	POPS2
Pozo Observación Planta Sur 3	POPS3
Pozo PEMEX 4	PP4
Pozo PEMEX 3	PP3
Pozo PEMEX 2	PP2
Noria Robinson	NR
Pozo Robinson 3	PR3
Pozo California	PC
Efluente Planta Sur	EPS

4.2.1 Comportamiento del Nitrógeno Amoniacal NH_4^-

En la Figura 9 se muestra la comparación entre los pozos de observación (nueve pozos) vs EPS. Solo se observan dos líneas de tendencia, esto es debido a que los nueve pozos arrojaron la misma concentración en los análisis químicos durante todo el periodo de tiempo analizado. Este es el contaminante donde se aprecia una disminución importante en comparación con los otros parámetros analizados.

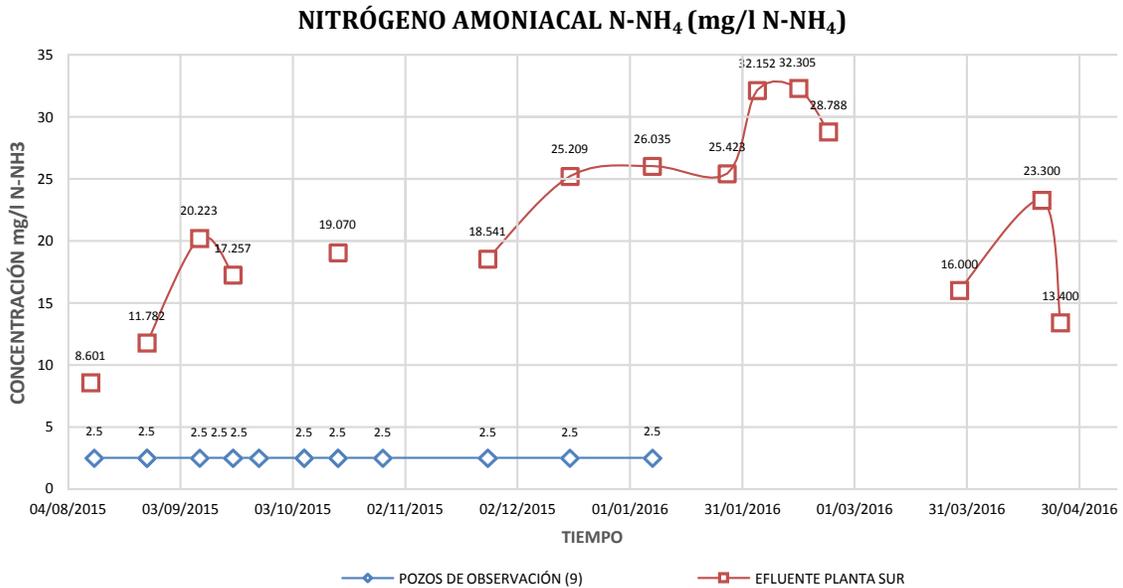


Figura 9.- Concentración de Nitrógeno Amoniacal vs Tiempo. Datos de pozos de observación y Efluente de la planta sur.

La eficiencia de Remoción en el suelo en base al parámetro Nitrógeno Amoniacal (NH_4^-) (%). Se observa en la Tabla 5 el porcentaje de remoción en los pozos de observación en un periodo de tiempo.

Tabla 5.- Porcentaje de remoción del NH_4^+ en los pozos de observación en diferentes fechas.

FECHA	REMOCION %
10/08/2015	71%
25/08/2015	79%
08/09/2015	88%
17/09/2015	86%
15/10/2015	87%
24/11/2015	87%
16/12/2015	90%
07/01/2016	90%
27/01/2016	100%
04/02/2016	100%
15/02/2016	100%
23/02/2016	100%
29/03/2016	100%
20/04/2016	100%
25/04/2016	100%

4.2.2 Comportamiento del Nitrógeno de Nitrato N-NO_3^-

En la Figura 10 se observa un comportamiento de los NO_3^- en los pozos de observación de la planta tratadora sur (POPTS). Los pozos analizados son POPS1, POPS2, POPS3, PR3 y EPS.

Se observa la comparación del EPS vs los pozos de observación. Se muestra claramente que EPS muestra niveles bajos de la concentración en comparación de POPS2 y POPS3. Estos dos últimos sobrepasan el nivel máximo permisible que exige la norma (10 mg/l).

Figura 10

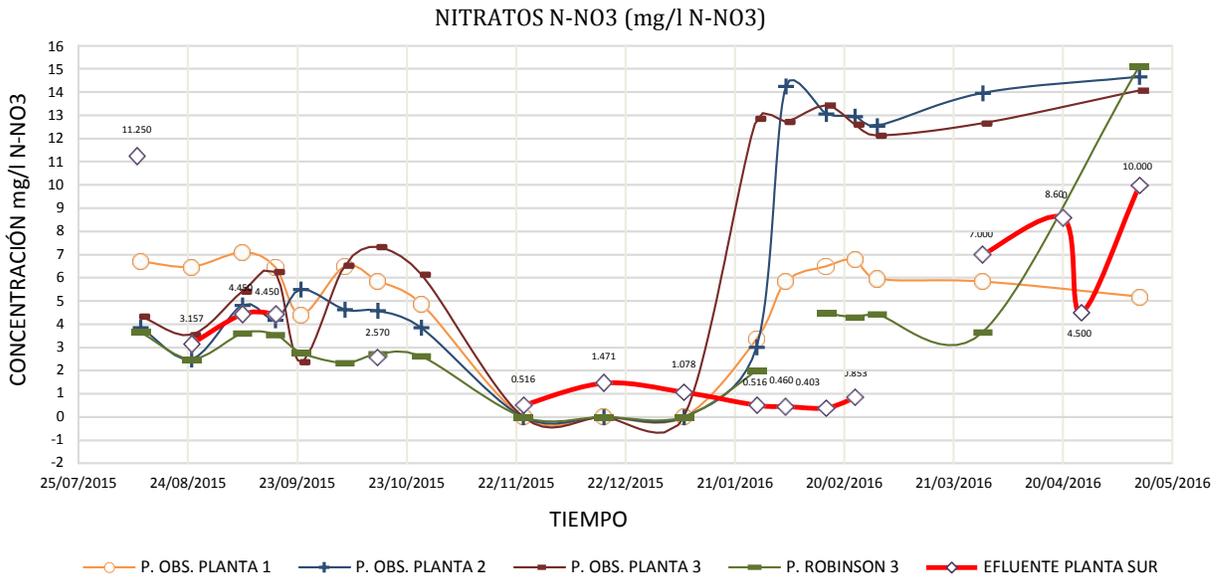


Figura 10.- Concentración de Nitrato vs Tiempo. Datos de pozos de observación POPS1, POPS2, POPS, PR3, EPS.

En la Figura 11 se muestran los datos de la concentración de los pozos PP2, PP3, PP4 y EPS. En los meses de Enero – Febrero 2016 se aprecia un considerable aumento en las concentraciones de los pozos y, el exceso del valor máximo permisible los PP2 y PP4.

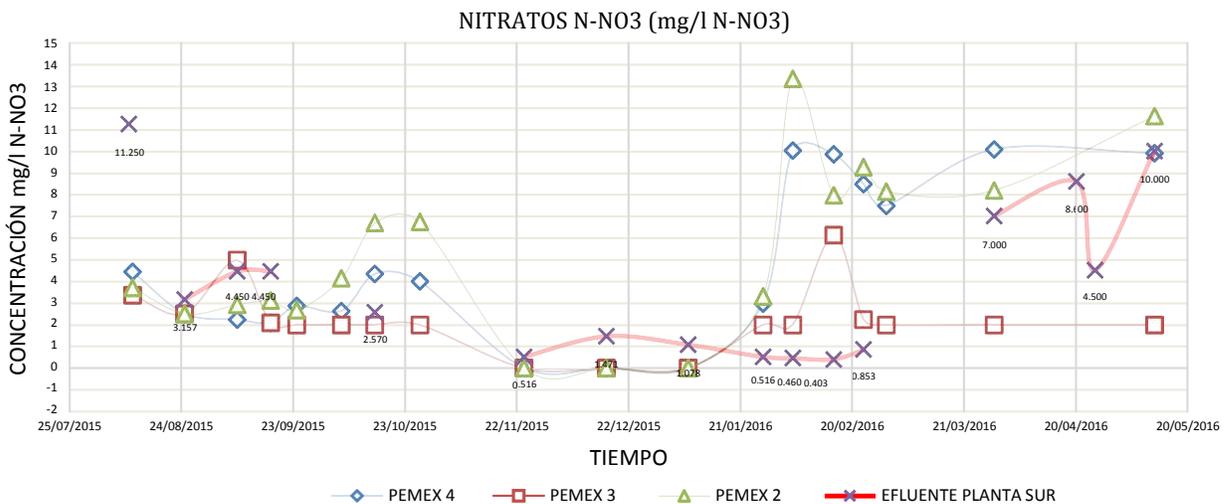


Figura 11.- Concentración de Nitrato vs Tiempo. Datos de pozos de observación PP2, PP3, PP4 y EPS.

Figura 12

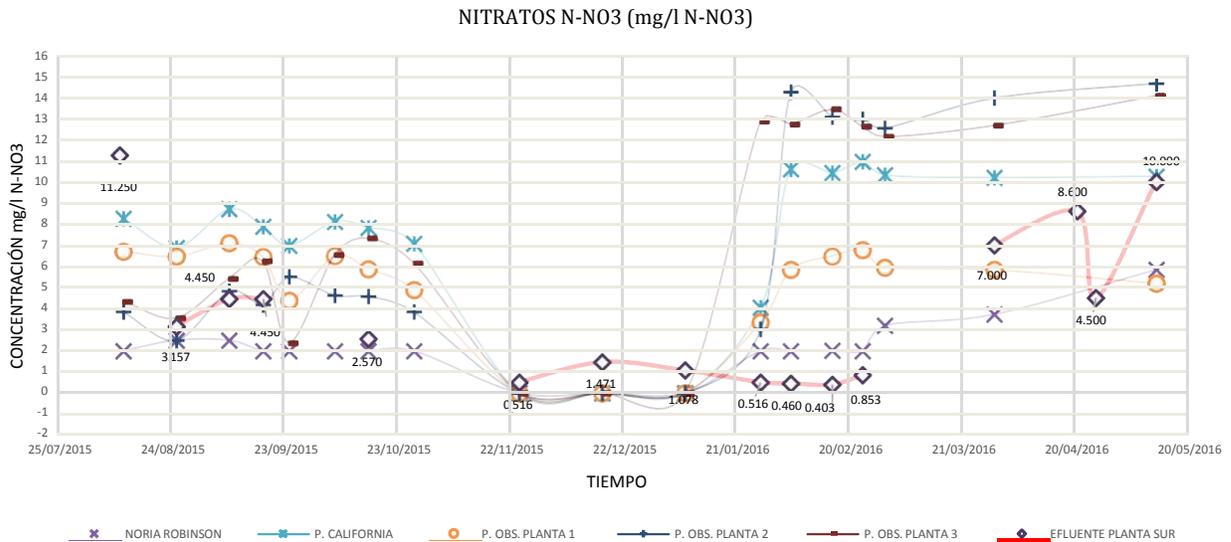


Figura 12.- Concentración de Nitrato vs Tiempo. Datos de pozos de observación NR, PC, POPS1, POPS2, POPS3 y EPS.

La interpretación de los nueve pozos de observación se muestra en la Figura 13, donde se aprecian los valores de sus concentraciones. Todos muestran un patrón muy similar de comportamiento en los meses de Enero y Febrero 2016. Añadiendo que EPS se encuentra muy por debajo de las concentraciones de los demás pozos.

NITRATOS N-NO₃ (mg/l N-NO₃)

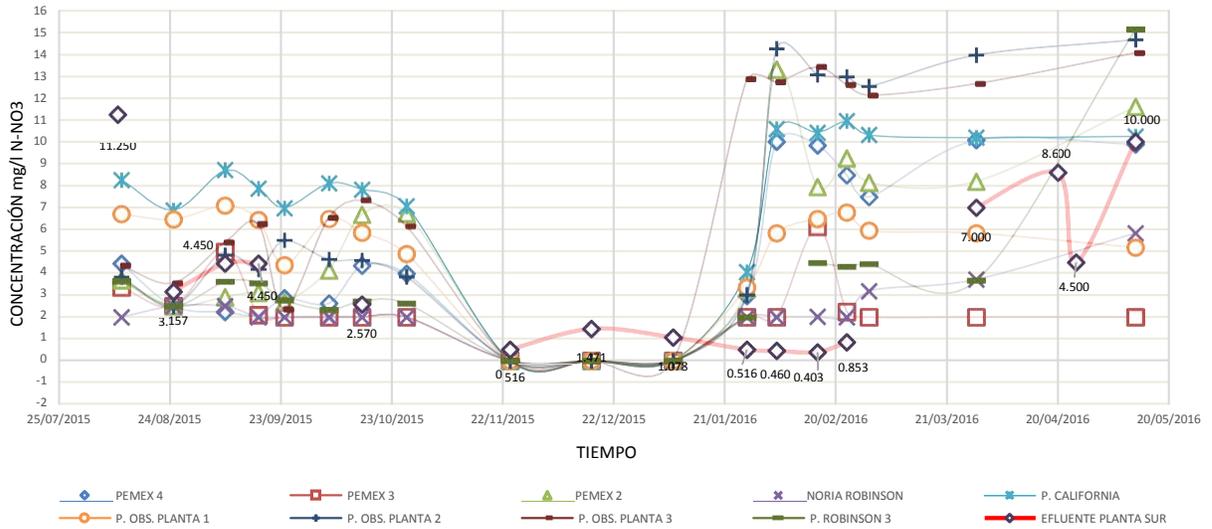


Figura 13.- Concentración Nitrato vs Tiempo. Muestra los nueve pozos de observación.

4.2.3 Comportamiento del Nitrógeno de Nitrito N-NO₂⁻

En la Figura 14 se presenta el análisis de los pozos de observación, solo los que muestran las concentraciones mayores a 0.05 mg/l. Los datos arrojados del EPS tienen un aumento considerable en los meses Marzo-Mayo.

NITRÓGENO DE NITRITOS N-NO₂ (mg/1 N-NO₂)

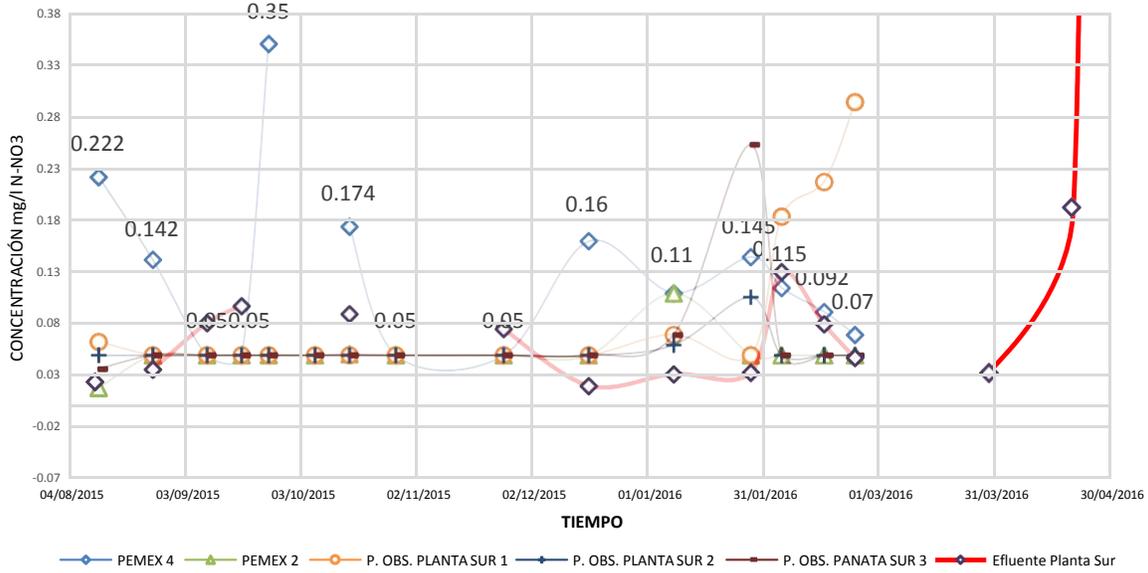


Figura 14.- Concentración de Nitritos vs Tiempo. Pozos de Observación PP4, PP2, POPS1, POPS2, POPS3 y EPS.

En la Figura 15 muestra la disposición de los nueve pozos analizados, teniendo en cuenta que los pozos NR, PR3, PC y PP2 se encuentran por debajo del límite establecido 0.05 mg/1.

NITRÓGENO DE NITRITOS N-NO₂ (mg/1 N-NO₂)

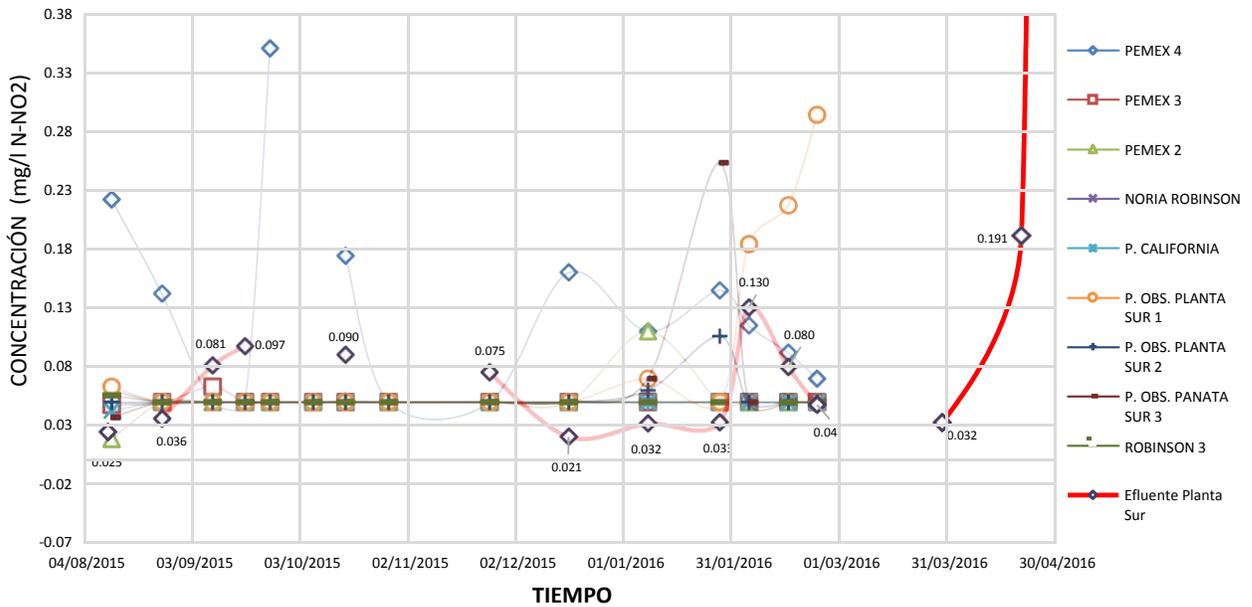


Figura 15.- Comparación Nitritos vs Tiempo. Se muestra los nueve pozos de observación.

4.2.4 Remoción conforme a la profundidad de los pozos de observación.

Se hizo una comparación respecto a la remoción de contaminantes, que se obtiene en función a la profundidad de los pozos POPS1, POBS2 y POPS3, estos tres son los más cercanos a la balsa de infiltración con una profundidad diferente. La comparación se realizó respecto al POPS1, ya que es el que cuenta con mayor profundidad (Véase tabla 6).

Tabla 6.- Muestra los valores de la concentración de los nitratos y nitritos en un periodo de tiempo Agosto 2015 a Mayo 2016.

NITRATOS			
FECHA	POPS1	POPS2	POPS3
11/08/2015	6.695	3.85	4.34
25/08/2015	6.46	2.5	3.55
08/09/2015	7.09	4.83	5.42
17/09/2015	6.44	4.19	6.25
24/09/2015	4.38	5.51	2.37
06/10/2015	6.49	4.63	6.54
15/10/2015	5.86	4.58	7.33
27/10/2015	4.88	3.85	6.15
24/11/2015	*	*	*
16/12/2015	*	*	*
07/01/2016	*	*	*
27/01/2016	3.36	3.02	12.87
04/02/2016	5.83	14.25	12.72
15/02/2016	6.48	13.07	13.43
23/02/2016	6.78	12.96	12.6
29/02/2016	5.95	12.54	12.13
29/03/2016	5.83	13.96	12.66
11/05/2016	5.18	14.66	14.07

NITRITOS			
FECHA	POPS1	POPS2	POPS3
11/08/2015	0.063	0.05	0.037
25/08/2015	0.05	0.05	0.05
08/09/2015	0.05	0.05	0.05
17/09/2015	0.05	0.05	0.05
24/09/2015	0.05	0.05	0.05
06/10/2015	0.05	0.05	0.05
15/10/2015	0.05	0.05	0.05
27/10/2015	0.05	0.05	0.05
24/11/2015	0.05	0.05	0.05
16/12/2015	0.05	0.05	0.05
07/01/2016	0.07	0.06	0.07
27/01/2016	0.05	0.106	0.253
04/02/2016	0.184	0.05	0.05
15/02/2016	0.217	0.05	0.05
23/02/2016	0.294	0.05	0.05

Tabla 7.- Comparación de la remoción vs la profundidad de los pozos. Cambio efectuado de los pozos POPS 1- POPS 3.

Parámetros	Nombre pozo	Profundidad (mts)	Remoción (%)
Nitratos	POPS 1- POPS 3	70 a 40	40%
Nitritos	POPS 1- POPS 3	70 a 40	24%

Tabla 8.- Comparación de la remoción vs la profundidad de los pozos. Cambio efectuado de los pozos POPS 1- POPS 2.

Parámetros	Nombre pozo	Profundidad (mts)	Remoción (%)
Nitratos	POPS 1- POPS 2	70 a 40	41%
Nitritos	POPS 1- POPS 2	70 a 40	21%

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

El efluente utilizado en el proyecto piloto tiene una mejor calidad, en comparación al agua extraída de los pozos de observación, esto es porque el agua nativa ya ha sido impactada por contaminantes, principalmente NH_4^- , NO_3^- y NO_2^- ; debido a que la zona de estudio se encuentra emplazada en un área de fuentes agrarias. La recarga que se está efectuando no ha mostrado ningún impacto negativo a profundidad ya que el agua recargada influye en la dilución de las concentraciones de los contaminantes en el agua nativa mejorando así su calidad.

Los nueve pozos de observación en el periodo Enero-Febrero 2016, muestran un fenómeno donde se ve el aumento en la concentración de Nitratos. No debiera ser así ya que es el mismo suelo y el mismo efluente utilizado para la infiltración. Sólo PP2, PP4, PC, POPS2 y POPS3 sobrepasan el límite máximo permisible. En los pozos PP2, PP4 y PC el aumento en la concentración, se puede adjudicar al fertilizante nitrogenado que se utiliza como abono para el área de cultivo de esa zona; siendo el Nitrato muy soluble, con bajo potencial para la precipitación o adsorción al suelo.

Conociendo la Geología de la zona que se obtuvo por medio de un modelo geoelectrico realizado en el área de estudio, se determinó el porqué del aumento en la concentración de Nitratos en los pozos POPS2 y POPS3, esto se puede deber a que se encuentran emplazados en el estrato de gravas con arenas arcillosas, dicho estrato es posible que se encuentre saturado debido a las arcillas presentes; este tipo de suelo hace más lenta la remoción de los contaminantes que pasan a través del sustrato filtrante, por lo cual la extracción de agua en esa zona se obtendrá de menor calidad que la que se está infiltrando, pero conforme vaya transitando a profundidad de acuerdo al modelo del pozo POPS1 se efectuará más la remoción de los contaminantes.



El pozo POPS1 se encuentra situado en la capa de gravas con arena. La concentración del Nitrato es menor en esta zona, debido a la presencia de las arenas, haciendo más efectiva la remoción de contaminantes.

El proceso microbiológico de Nitrificación, se vio efectuado por medio de la remoción del Nitrógeno Amoniacal en el suelo, dicho proceso aumentó considerablemente la concentración de los nitratos.

Teniendo en cuenta que el pozo POPS1 cuenta con una profundidad de 70 m. en comparación de los pozos POPS2 y POPS3 que tienen solo 40 m., se encontró que se cuenta con un 40 % más de efectividad de remoción de nitratos a una profundidad de 70 m., se debe considerar aumentar la profundidad de 70 a 40 m. en dichos pozos.

La línea base del agua nativa en cuanto al NH_4^+ se encuentra en 2,5 mg/lit de concentración, los NO_3^- se encuentran dentro del rango de 2 a 14 mg/lit, y los NO_3^- 0.03 a 0.2 mg/lit.

La interacción del agua recargada con el agua subterránea nativa no se vio reflejada en los pozos PR3, PC, PP2, PP3, PP4 y NR debido a que la infiltración procedente de la balsa aun no llega a formar parte del agua almacenada en el Acuífero, esto es porque dicho proceso requiere de un largo periodo para que sea efectiva dicha interacción.



5.2 Recomendaciones

Se recomienda profundizar los pozos POPS2 y POPS3 de 40 a 70 m. siguiendo el modelo del pozo POPS1, para evitar el impacto negativo que se da en los lentes arcillosos debido a la saturación del estrato. Esto dará información valiosa para determinar el comportamiento de remoción a mayor profundidad.

Ampliar el estudio del fenómeno observado en los meses de Enero-Febrero 2016, debido a que existe una condicionante que está incidiendo en dicho comportamiento.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, F. (2002). Filtros verdes . Un sistema de depuración ecológico. *Ingeniería Hidráulica Y Ambiental*, XXIII(1), 25–29.
- Bekele, E., Toze, S., Patterson, B., Fegg, W., Shackleton, M., & Higginson, S. (2013). Evaluating two infiltration gallery designs for managed aquifer recharge using secondary treated wastewater. *Journal of Environmental Management*, 117, 115–120. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.12.018>
- Brenes, R., Cadena, A., & Ruiz, R. (2011). Monitoreo de la concentración de nitrato en el Acuífero del Valle de Puebla, 27(3), 313–321.
- CCVM. (2010). 4.- Recargar los Acuíferos. In *Repensar La Cuenca: La Gestión De Ciclos Del Agua En El Valle De México* (Vol. 1, pp. 64–80).
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. (2002). Manual de Diseño de Galerías Filtrantes, 2–84.
- Cerón, L., & Aristizábal, F. (2012). Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 14(1), 285–295.
- CICEANA. (2007). Ciclo del nitrógeno. *Centro de Información Y Comunicación Ambiental de Norte América A.C.*, 56–59. Retrieved from http://www.divulgacion.ccg.unam.mx/webfm_send/109
- Contreras, C., Vargas, N., Orjuela, L., Sarmiento, R., Cardenas, J., Leguizamón, A., & Rodríguez, M. (2004). Guía Para El Monitoreo Y Seguimiento Del Agua. *Instituto de Hidrología, Meteorología Y Estudios Ambientales*, 39. Retrieved from http://documentacion.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=8441&shelfbrowse_itemnumber=8939
- CONAGUA. (2009). NORMA Oficial Mexicana NOM-015-CONAGUA-2007, Infiltración artificial de agua a los acuíferos. Características y especificaciones de las obras y del agua, 8.
- Cortez, F. J. (2012). Recarga artificial de acuíferos mediante pozos de infiltración, 1–72.
- Cuenca, E., Alvarado, A., & Camacho, K. (2012). El tratamiento de aguas residuales somesticas para el desaroolo localsostenible: el caso de latecnica del sistema unitario de tratamiento de agaus, nutrientes y energia (SUTRNE) en San Migue Almaya, Mexico. *Quiviera*, 14, núm. 1(1405–8626), 78–97. Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/401/40123894005.pdf><http://www.redalyc.org/pdf/401/40123894005.pdf>
- de Vries, J.J., and Simmers, I., 2002, Groundwater recharge: An overview of process and challenges: *Hydrogeology Journal*, v. 10, p. 5–17, doi: 10 .1007/s 10040-001-0171 -7.
- Dominguez, J., & Carrillo-Rivera, J. J. (2007). El agua subterránea como elemento de debate en la historia de México. *México En Tres Momentos: 1810-1910-2010*, 1–29.

- Fagundo, J., Carillo, J. J., Antigüedad, I., González, P., Peláez, R., Suárez, M., ... Cáceres, D. (2016). SISTEMA DE FLUJO LOCAL-REGIONAL DE LA SIERRA DEL ROSARIO (CUBA). *Research Gate*, (July 2016).
- Gale, I. (2005). Estrategias para la Gestión de Recarga de Acuíferos (GRA) en zonas semiáridas, 35.
- García, M. Á., & Herrera, S. (2015). Determinación de la cinética de Remoción de Nitrógeno proveniente de aguas residuales dompesticas en suelos superficiales asociados a recarga de acuíferos de la zona de expansión occidental de pereira. *Tesis*, 3–113.
- González-abraham, A., Fagundo-castillo, J. R., Carrillo-rivera, J. J., Rodríguez-estrella, R., Investigaciones, C. De, No, M. B., ... Apdo, R. (2012). Geoquímica de los sistemas de flujo de agua subterránea en rocas sedimentarias y rocas volcanogénicas de Loreto , BCS , México.
- Hernández, K. (2015). *Evaluación fisicoquímica de la calidad del agua de la presa Chihuahua, en Chihuahua, México*. Chihuahua: Tesis , UACH Facultad de Ingeniería.
- Irastortza, J. S. (2009). Recarga de acuíferos mediante agua de lluvia, 1–105.
- Kavuri M, B. M. and A. V. G. M. (2011). “New Methods of Artificial Recharge of Aquifers: A Review” *IPWE 2011, Proceedings of 4th International Perspective on Water Resources & the Environment, January 4-6, 2011, National University of Singapore (NUS), Singapore. Poster on: Artificial Recharge*, 1–9.
- López-Martínez, R. (2009). Presas de gaviones, 14.
- Loya, G. R. (2010). *Efecto del riego con el agua residual tratada, en suelos y pastos de áreas verdes de la ciudad de Chihuahua*. Chihuahua: Tesis, UACH Facultad de Ingeniería.
- Massol Deya, A. a. (1994). Tercera Parte Nutrientes Y Gases : Nitrogeno. *Manual De Ecología Microbiana*, (1994), 1–20. Retrieved from <http://www.uprm.edu/biology/profs/massol/manual/p3-nitrogeno.pdf>
- Mejía, M. C. (2005). Análisis de la calidad del agua para consumo humano y percepción local de las tecnologías apropiadas para su desinfección a escala domiciliaria , en la microcuenca El Limón , San Jerónimo , Honduras .
- Murillo Díaz, J. manuel, De La Orden Gómez, J. A., & Rodriguez Hernandez, L. (2011). La Recarga Artificial Como Técnica De Recuperación De Acuíferos Contaminados . Aplicación a La Plana De Vergel (Alicante). *Instituto Geologico Y Minero de España.*, 3–11. Retrieved from <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd27/murillodiaz.pdf>
- NORMA Oficial Mexicana NOM-014-CONAGUA-2003, Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada. (2009), 22, 17.
- NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. (1994). *Última Reforma Publicada DOF 03-02-1995*,

Pp.1-7. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

- Ortuño Gobern, F., Niñerola Pia, J. M., Armenier Ferrando, J. L., & Molinero Huguet, J. (2009). La barrera hidráulica contra la intrusión marina y la recarga artificial en el acuífero del Llobregat (Barcelona, España). *Boletín Geológico Y Minero*, 120(2), 235–250.
- Sanchez, F. J. (2006). Contaminación de las aguas subterráneas, 1–5. Retrieved from [http://212.128.130.23/eduCommons/ciencias-experimentales/hidrologia/contenidos/12.Contaminacion de aguas subterraneas.pdf](http://212.128.130.23/eduCommons/ciencias-experimentales/hidrologia/contenidos/12.Contaminacion%20de%20aguas%20subterraneas.pdf)
- Saucedo, A. B. (2011). *Evaluación del Impacto del reúso del agua residual tratada en la ciudad de Chihuahua*. Chihuahua: Tesis, UACH Facultad de Ingeniería.
- Semarnat. (1998). NOM-001-SEMARNAT-1996 Límites Máximos Permisibles De Contaminantes En Las Descargas De Aguas Residuales En Aguas Y Bienes Nacionales. *Norma Oficial Mexicana*, 33.
- SEMARNAT. (1997). Nom-003-Semarnat-1997 Que Establece Los Límites Máximos Permisibles de Contaminantes para las Aguas Residuales Tratadas Que Se Reusen en Servicios al Público. *Diario Oficial de La Federación*, 17.
- Winpenny, J., Heinz, I., & Koo-Oshima, S. (2013). *Reutilización del agua en la agricultura : ¿Beneficios para todos?* Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/017/i1629s/i1629s.pdf>
- Zamarrón, L. (2011). *Análisis Hidrogeoquímicos de los Acuíferos Chihuahua-Sacramento y el Sauz-Encinillas*. Chihuahua: Tesis, UACH Facultad de Ingeniería.



Curriculum Vitae

Formación Académica

Egresada en el 2013 de la Carrera en Ingeniería en Geología de la Universidad Autónoma de Chihuahua.

En el año 2013 obtuve un acreditación del Diplomado de Inglés en la Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Filosofía y Letras.

Prácticas Profesionales

2011 Mina Pinos Altos, Agnico Eagle México.

Actividades: Mapeo de tajo e interior mina, digitalización en Mine Sight Software. Muestreo interior mina. Loqueo de chips y núcleos. Monitoreo de los niveles piezómetros y abatimiento en pozos de agua potable.

2012 Mina La Amargosa por medio de la empresa Resources Geoscience de México (RGM)

Actividades: Exploración, muestreo de arroyos, utilización de PIMA para la identificación de arcillas.

2012 en la Junta Municipal de Agua y Saneamiento (JMAS)

Actividades: Levantamiento con GPS en tomas de Agua Potable, registros de medidor, registro de alcantarillado, pozos de agua potable, captura de datos estadísticos de variables hidráulicas de las fuentes de abatimiento.

Cursos Profesionales

Curso Básico de Uso y Manejo de GPS en el año 2016.

Auto CAD 2016-intermedio.

MineSight Software.

PIMA (Equipo de difracción de rayos X).

Manejo de equipo STING R1 Earth Resistivity Meter (SEV).

Manejo de equipo Syscal Junior, Iris Instrument (SEV).

Arc Map 10.1 (ArcGIS).

Diagrammes 5.4

IDRISI Selva 17.0

GMS 7.1 Groundwater Modeling System.

Lomas de San Guillermo No. 6413 Fraccionamiento Lomas Altas C.P. 31207 Chihuahua, Chihuahua.

Esta tesis fue mecanografiada por Gladys Velazco Armendáriz.