

# Pozos de inyección profunda: Recarga artificial de acuíferos con aguas pluviales en el AMG.

Luis Ignacio Vanegas Espinosa



Introducción

Metodología

Resultados y discusión

Introducción

Metodología

Resultados y  
discusión

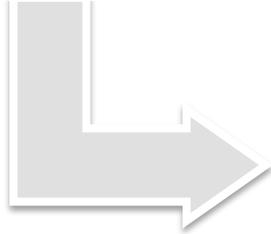


Introducción

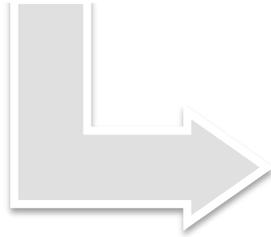
Metodología

Resultados y discusión

Introducción



Metodología



Resultados y  
discusión



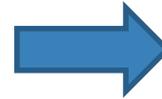
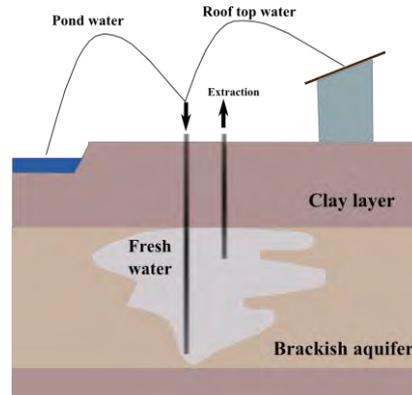


## Antecedentes del proyecto

Agenda 21



Tecnologías innovadoras



- Suministro idóneo  
- Funciones hidrológicas





## Antecedentes del proyecto

- En México no hay buena gestión hídrica.
- 13 millones de mexicanos sin servicio de agua potable
- 12 millones sin drenaje
- Acuíferos: fuente de abastecimiento del 60% de la población
- 15% de los acuíferos están siendo sobreexplotados

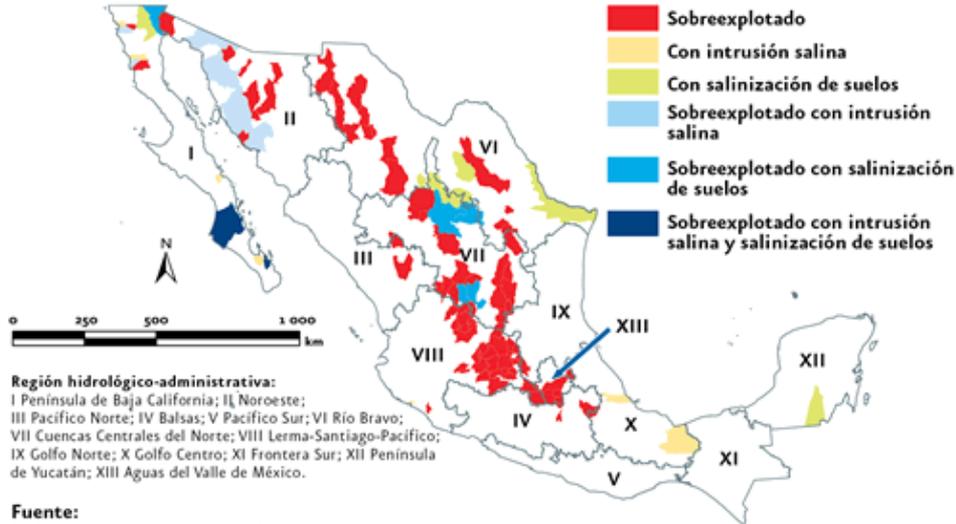




## Antecedentes del proyecto

Mapa 6.6

Situación de los acuíferos por región hidrológico-administrativa, 2007



**Fuente:**

Elaboración propia con datos de:  
 Conagua. *Estadísticas del Agua en México, 2008*. México. 2008.





# Problemáticas



## Proyecto Integral de Saneamiento y Abastecimiento de la Zona Conurbada de Guadalajara

## Proyecto Integral de Saneamiento y Abastecimiento de la Zona Conurbada de Guadalajara

**Acuífero Atemajac**

Condición: ■ **Sobreexplotado**

Volumen en Millones de m<sup>3</sup>

Recarga	139.170
Extracción	159.630
Disponibilidad de Aguas Sub.	<b>-20.46</b>

**Abastecimiento de Agua**

Situación actual:

Lago Chapala	5.5 m <sup>3</sup> x seg.
Pozos Profundos	3.0 m <sup>3</sup> x seg.
Presa Calderón	1.0 m <sup>3</sup> x seg.
<b>Total</b>	<b>9.5 m<sup>3</sup>x seg.</b>
Demanda Z.C.G.	13.06 m <sup>3</sup> x seg.
<b>DEFICIT -3.56m<sup>3</sup>x segundo</b>	





## Problemáticas

### • Inundaciones

• En el 2015 causaron la muerte de nueve personas y pérdidas económicas de aproximadamente mil millones de pesos (Castillo, 2016).

### • Sobreexplotación de acuíferos

### • Déficit de suministro de agua





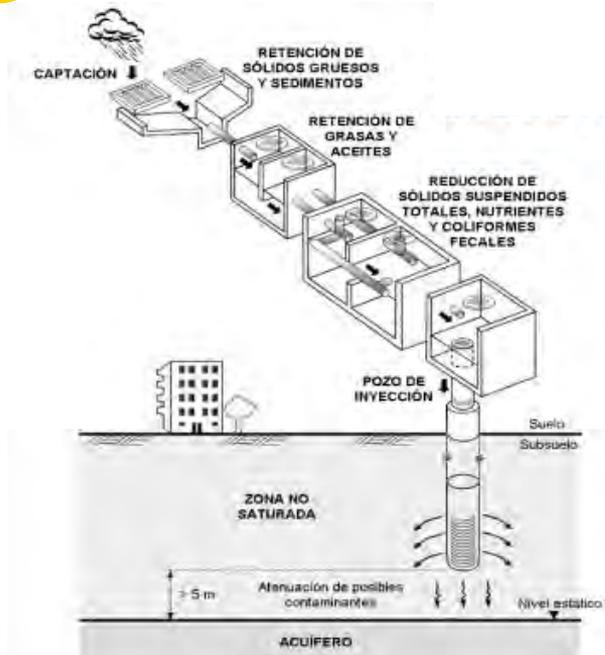
## Objetivo general

Estudiar la viabilidad de la inyección profunda como estrategia para la recuperación de acuíferos y la reducción de inundaciones en el AMG.

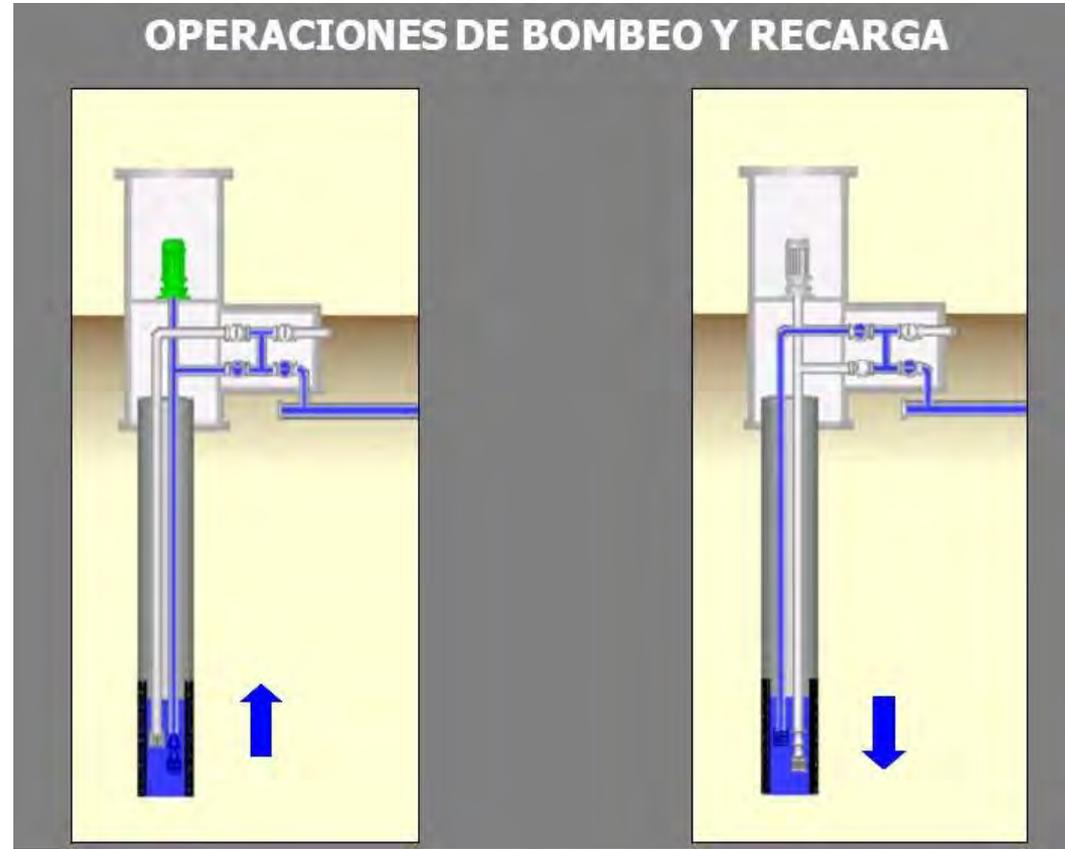




# Propuesta



Fuente: CONAGUA (2014)



Fuente: Escalante (2005)





## Antecedentes del proyecto

- Infiltración por extensión
- Filtración inducida
- Recarga por pozos
- Modificación en cauces
- Recolección de agua de lluvia y escurrentía

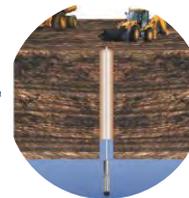
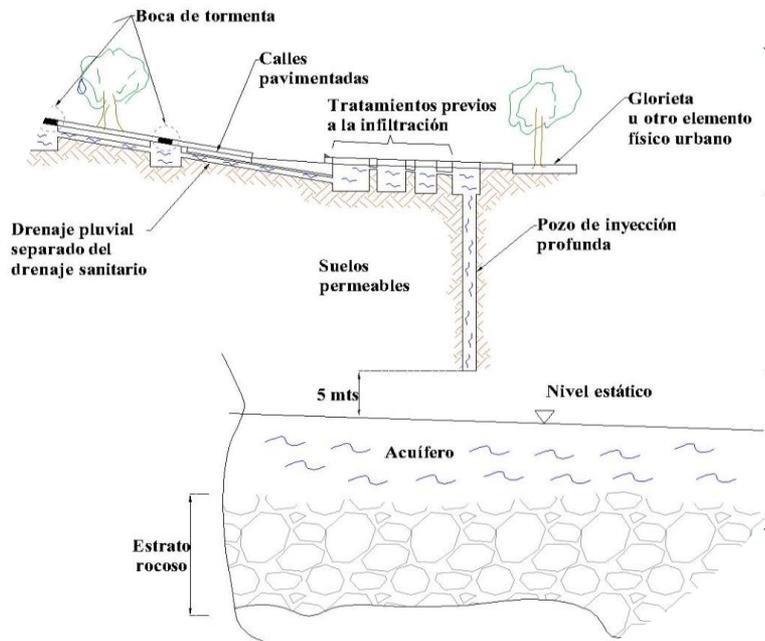


Experiencias de Recarga Artificial de Acuíferos en el mundo





# Oportunidad de abonar a una mayor gestión



Geología



Aprovechamiento De aguas pluviales



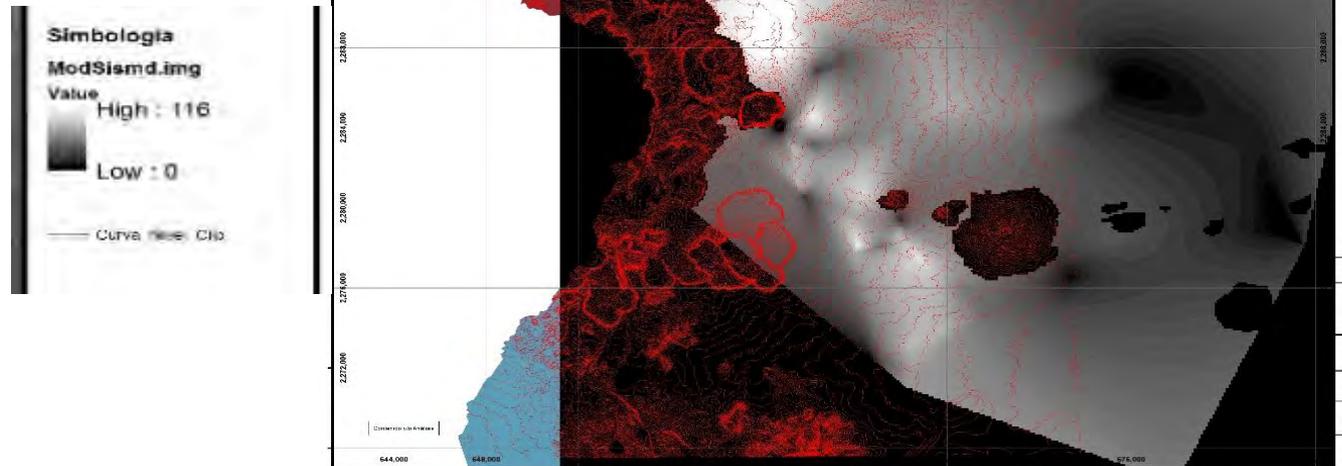
Disminuyendo inundaciones





## Tema de investigación

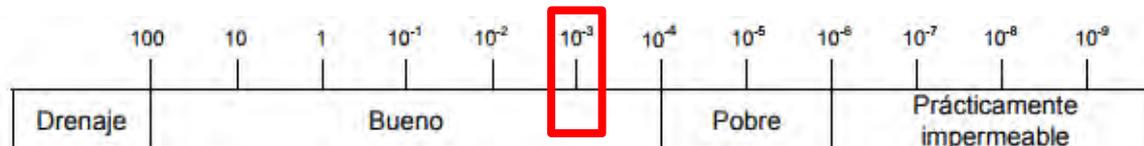
- Al hablar de que la geología de algunas zonas del AMG hago referencia a 3 características principalmente:
- Profundidad del estrato rocoso:





## Tema de investigación

- Al hablar de que la geología de algunas zonas del AMG hago referencia a 3 características principalmente:
2. **Coefficiente de permeabilidad:**  
Saborío (1995)  $4.1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ .  
Zamudio, Vargas & Ochoa (2016)  
**Permeabilidad más alta:**  $2.73 \times 10^{-3} \text{ m/s}$   
**Permeabilidad más baja:**  $3.66 \times 10^{-5} \text{ m/s}$   
**Permeabilidad promedio:**  $1.47 \times 10^{-3} \text{ m/s}$





## Tema de investigación

- Al hablar de que la geología de algunas zonas del AMG hago referencia a 3 características principalmente:
3. Suelo seco con buena permeabilidad





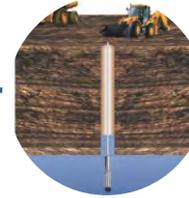
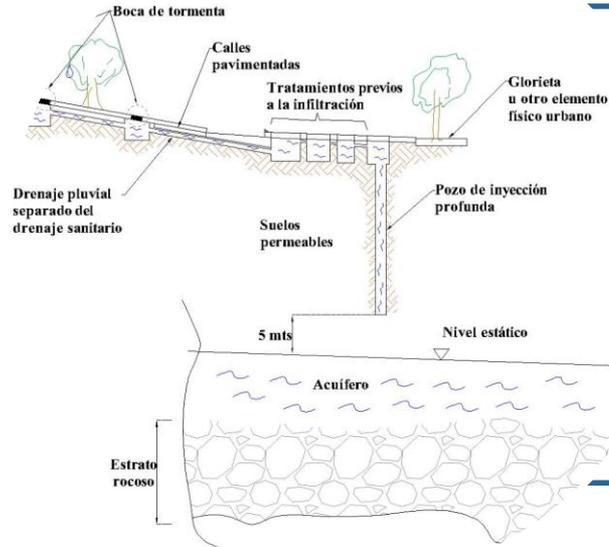
## Tema de investigación

- Aprovechamiento de aguas pluviales
- **942mm** de precipitación anual (Comisión Nacional del Agua, 2000).
- Sin embargo, lejos de aprovecharse, el agua de lluvia genera inundaciones que traen las consecuencias comentadas anteriormente.





# Tema de investigación



Geología



Aprovechamiento De aguas pluviales



Disminuyendo inundaciones





## Objetivo general

Estudiar la viabilidad de la inyección profunda como estrategia para la recuperación de acuíferos y la reducción de inundaciones en el AMG.



## Introducción

## Metodología

## Resultados y discusión

### Introducción

- **Problemáticas:**
  - Inundaciones
  - Sobreexplotación de acuíferos
  - Déficit de suministro de agua

- **Características AMG::**

- Precipitación anual de 942mm
- Geología con potencial para infiltración (profundidad estrato rocoso, permeabilidad y estratos secos)

- **Oportunidades:**

- Aprovechamiento de agua de lluvias
- Recarga artificial de acuíferos
- Otra fuente de abastecimiento de agua

### Metodología

### Resultados y discusión

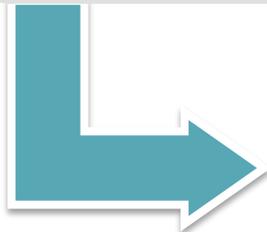


Introducción

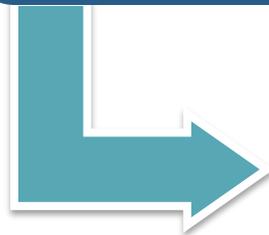
Metodología

Resultados y discusión

Introducción



Metodología



Resultados y  
discusión





## Hipótesis

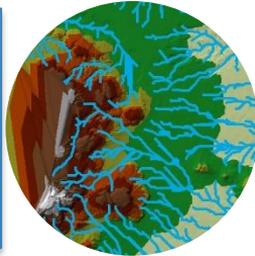
La construcción de pozos de inyección profunda abonará a la recarga de acuíferos, al aprovechamiento de las aguas pluviales y a la disminución de las inundaciones en el AMG



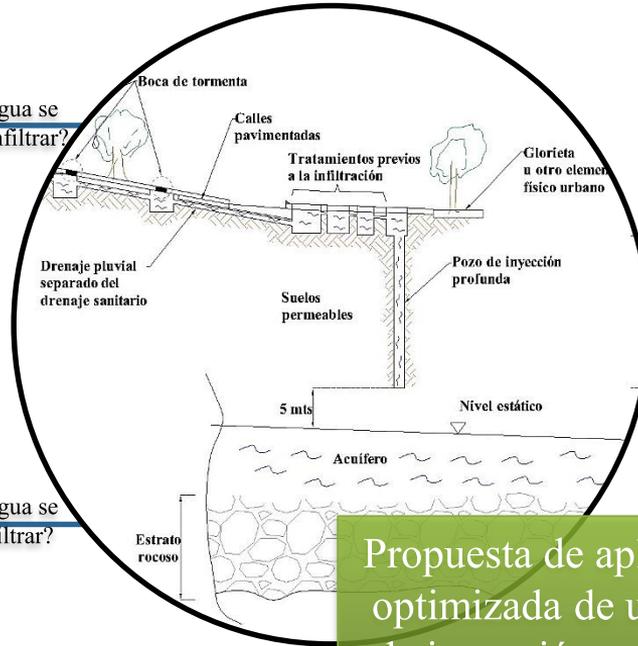


# Modelo operacional

Hidrología superficial



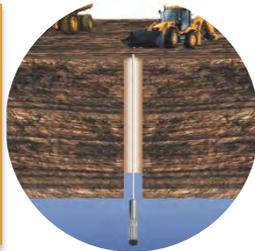
¿Cuánta agua se tiene que infiltrar?



¿Cuánta agua se puede infiltrar?

Propuesta de aplicación optimizada de un pozo de inyección profunda

Geo hidrología





## Unidades de análisis

Unidades de análisis	Observables	Estrategia de recolección de información	Fuente	Método de análisis	Producto
Hidrología superficial	Acuíferos	Investigación documental	IMEPLAN	-Sistema de Información Geográfica -Método Racional	-Escurrimientos -Microcuencas -Volumen de escurrimientos
	Canales		IMEPLAN		
	Pozos de agua para uso urbano		IMEPLAN		
	Cauces		IMEPLAN		
	Cauces desaparecidos		IMEPLAN		
	Pendiente del terreno		IMEPLAN		
	Curvas de nivel a cada 10m		INEGI		
Registro de inundaciones	SIAPA				





## Unidades de análisis

Unidades de análisis	Observables	Estrategia de recolección de información	Fuente	Método de análisis	Producto
Geohidrología	Profundidad del estrato rocoso  Estratigrafía  Coeficiente de permeabilidad	Investigación documental	Zamudio & Gómez (2016)  SPT provistos por profesionales  Zamudio, Vargas & Ochoa (2016)	Hermenéutico	Estrato promedio y características físicas de los diferentes tipos de suelo de dicho estrato





## Unidades de análisis

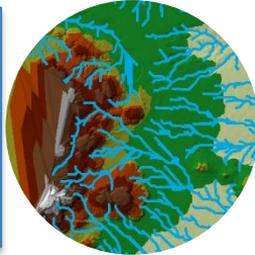
Unidades de análisis	Observables	Estrategia de recolección de información	Fuente	Método de análisis	Producto
Pozo de inyección profunda	Datos geométricos Estrato promedio y características físicas de los diferentes tipos de suelo de dicho estrato	Iterativo		Elemento finito	Capacidad de inyección de un pozo de inyección profunda



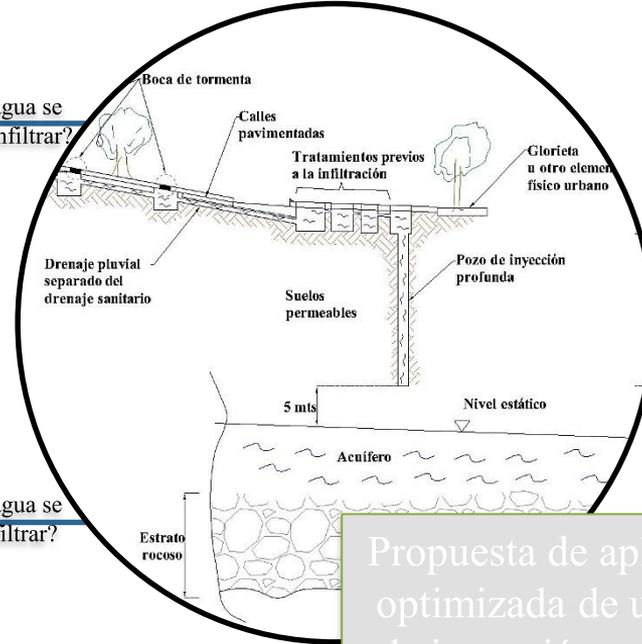


## Diseño de instrumentos y pruebas

Hidrología superficial

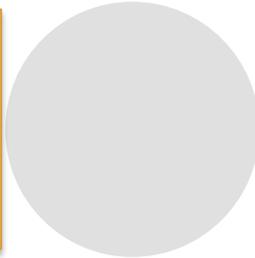


¿Cuánta agua se tiene que infiltrar?



¿Cuánta agua se puede infiltrar?

Geo hidrología



Propuesta de aplicación optimizada de un pozo de inyección profunda

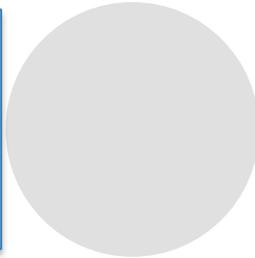




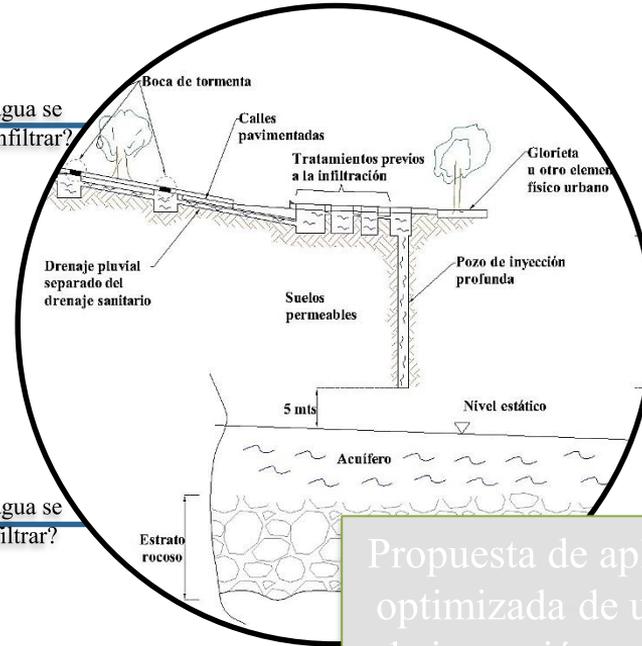


## Diseño de instrumentos y pruebas

Hidrología superficial

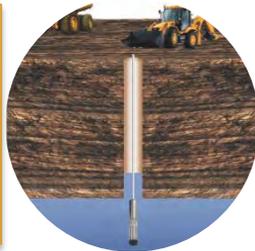


¿Cuánta agua se tiene que infiltrar?



¿Cuánta agua se puede infiltrar?

Geo hidrología



Propuesta de aplicación optimizada de un pozo de inyección profunda



## Diseño de instrumentos y pruebas

◉ Estrato promedio y características físicas de los diferentes tipos de suelo (ver tabla adjunta)

Tipo de suelo (SUCS)	Simbología
SM	
SP	

Laboratorio:	Exploraciones Geotecnia de Occidente, S.A. de C.V.	EIC S.A. de C.V.	Seismocontrol, S.A. de C.V.	Sandstorm GAM	Sandstorm GAM	Centro de Investigación Para el Desarrollo Industrial
Ubicación:	Av. Acueducto	Plaza del Sol	Trasloma	Puerta de Hierro	Av. Las Rosas	Torres La Calma
Profundidad (m)	Tipo de suelo (SUCS)	Tipo de suelo (SUCS)	Tipo de suelo (SUCS)	Tipo de suelo (SUCS)	Tipo de suelo (SUCS)	Tipo de suelo (SUCS)
0 a 6						
6 a 12						
12 a 18						
18 a 24						
24 a 30						





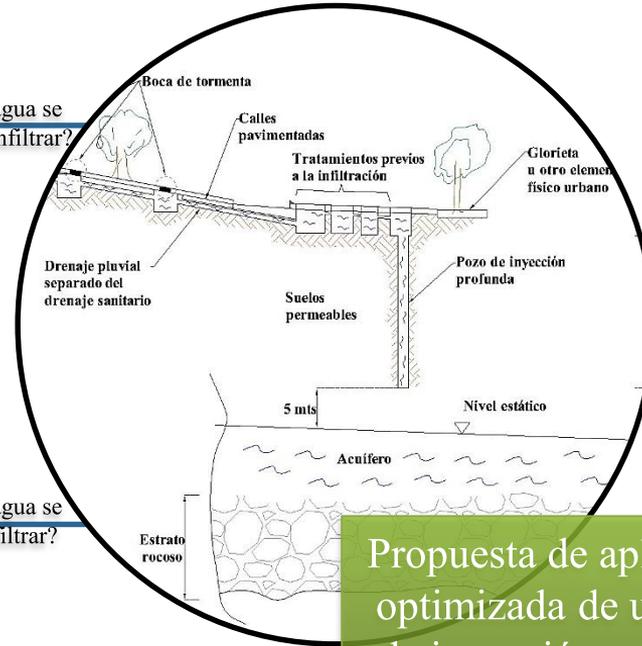
## Diseño de instrumentos y pruebas

Hidrología superficial

¿Cuánta agua se tiene que infiltrar?

Geo hidrología

¿Cuánta agua se puede infiltrar?



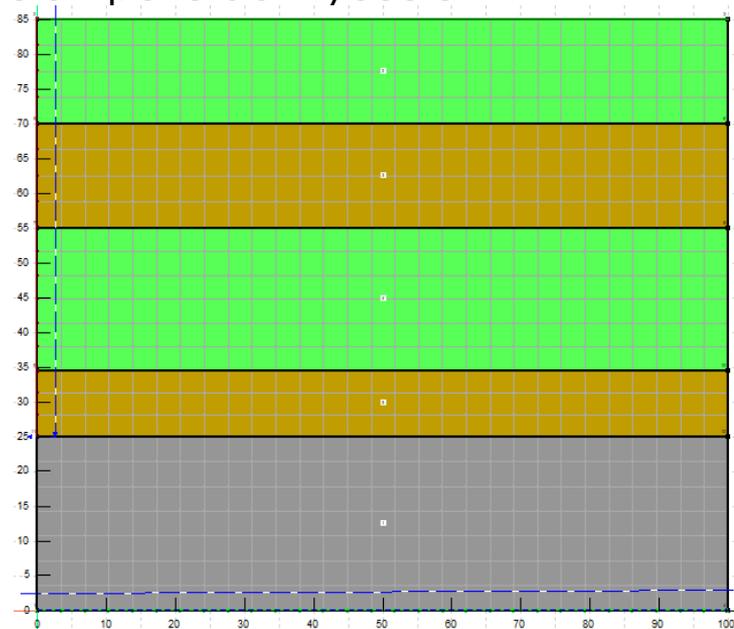
Propuesta de aplicación optimizada de un pozo de inyección profunda





## Diseño de instrumentos y pruebas

- Capacidad de infiltración de un pozo de inyección profunda



Introducción

Metodología

Resultados y discusión

Introducción

Metodología

Resultados y  
discusión

• **Unidades de análisis:**

- Hidrología superficial
- Geohidrología
- Pozo de inyección profunda

• **Productos:**

- Esguimientos, microcuencas y volumen de esguimientos
- Estrato promedio y características físicas de los tipos de suelo
- Capacidad de inyección de un pozo de inyección profunda de ciertas dimensiones

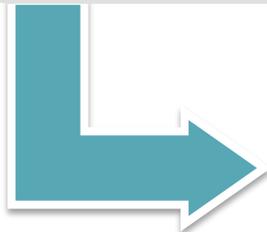


Introducción

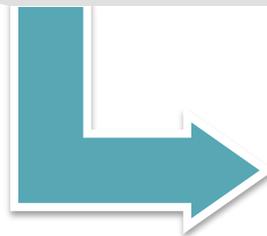
Metodología

Resultados y discusión

Introducción



Metodología

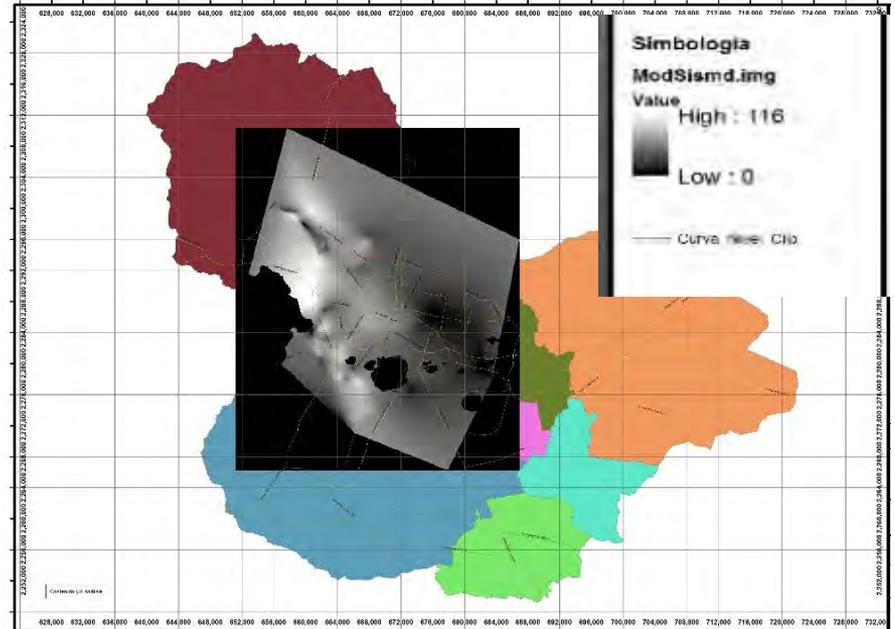


Resultados y  
discusión



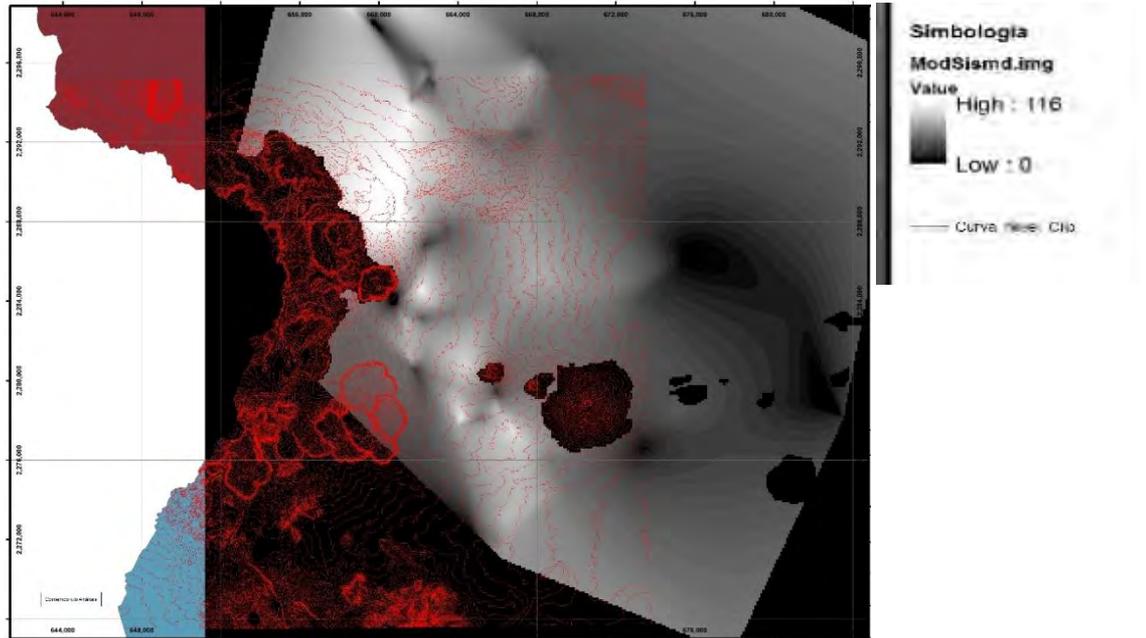


## Determinación de escurrimientos y microcuencas



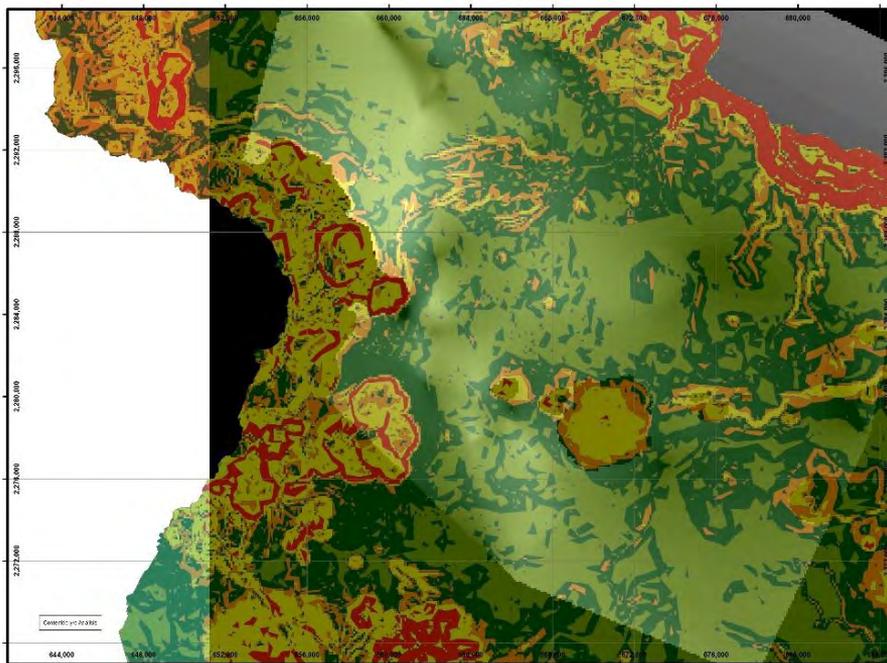


## Determinación de escurrimientos y microcuencas





## Determinación de escurrimientos y microcuencas



GRADOS

0° a 1°

1° a 3°

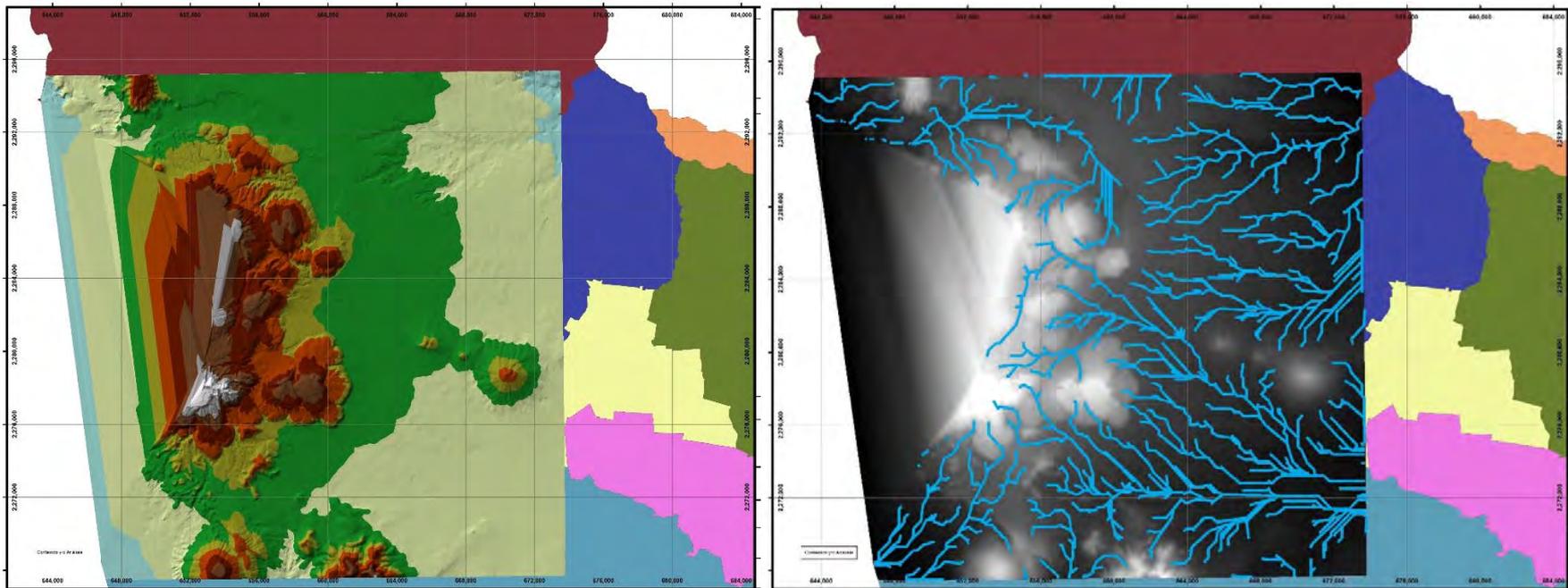
3° a 5°

5° a 15°

<math>< 15^\circ</math>



## Determinación de escurrimientos y microcuencas









## Determinación de escurrimientos y microcuencas





## Determinación de escurrimientos y microcuencas

- Determinación de caudal máximo con el método racional

$$Q_p = 0.278 C_i A$$

$$C_{ponderado} = \frac{\Sigma(C_i * A_i)}{\Sigma A_i}$$

Tipo de superficie	Área (km <sup>2</sup> )	C <sub>i</sub>	C <sub>i</sub> x A <sub>i</sub> (km <sup>2</sup> )
Casa habitación	10.289	0.70	7.2023
Parques	1.28	0.25	0.32
<b>Totales</b>	<b>11.569</b>	-	<b>7.5223</b>

$$C_{ponderado} = \frac{7.5223 \text{ km}^2}{11.569 \text{ km}^2} = 0.65$$





## Determinación de escurrimientos y microcuencas

- Determinación de caudal máximo con el método racional

$$Q_p = 0.278CiA$$

$t_{cs}$  es igual a **57.48 min**

**periodo de retorno de 5 años**

**$i=56.238 \text{ mm/h}$**

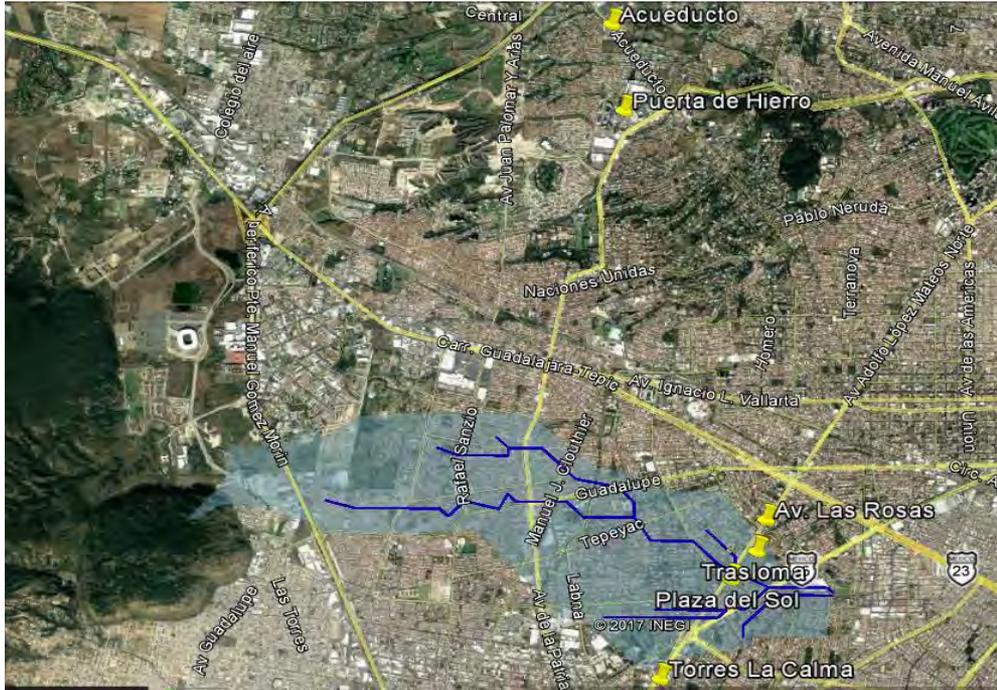
$$t_{cs} = 0.0003245 \left( \frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{.77}$$

$$t_{cs} = 0.0003245 \left( \frac{6,790m}{\sqrt{.0447 \text{ m/m}}} \right)^{.77} = 0.958 \text{ h}$$

$$Q_p = 0.278 * 0.65 * 56.238 \text{ m m/h} * 11.569 \text{ km}^2 \\ = 117.57 \text{ m}^3/\text{s}$$



## Estratigrafía de la microcuenca del Chicalote





Profundidad (m)	Tipo de suelo (SUCS)
0 a 6	
6 a 12	
12 a 18	
18 a 24	
24 a 30	
30 a 36	
36 a 42	
42 a 48	
48 a 54	
54 a 60	

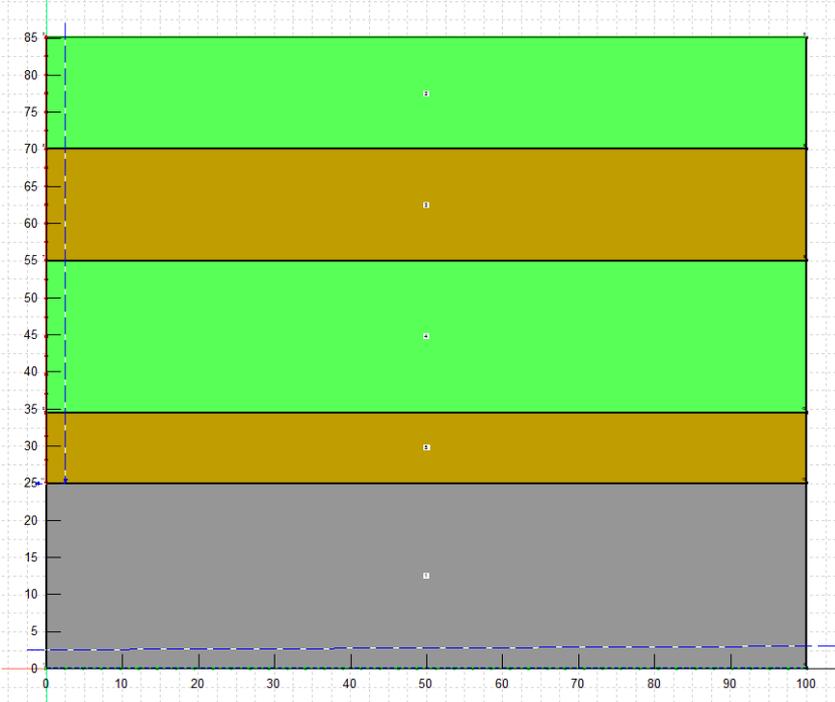
Tipo de suelo (SUCS)	Simbología
SM	
SP	

Estrato	Valor de permeabilidad, K (m/s)
SP	$2.7 \times 10^{-3}$
SM	$8.0 \times 10^{-4}$
Basalto	$1.16 \times 10^{-8}$





## Resultados del modelado de infiltración



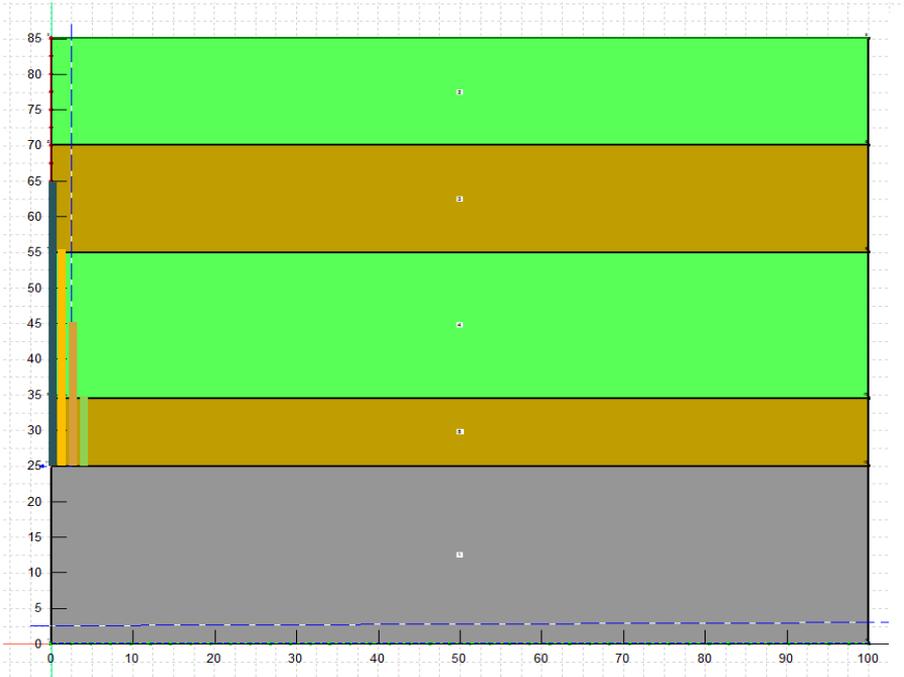
### Materials

- Basalto
- SP
- SM

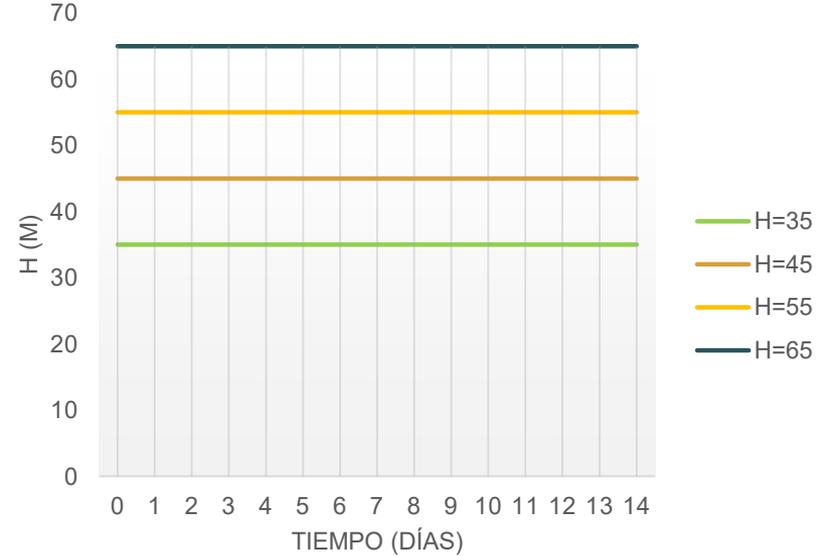


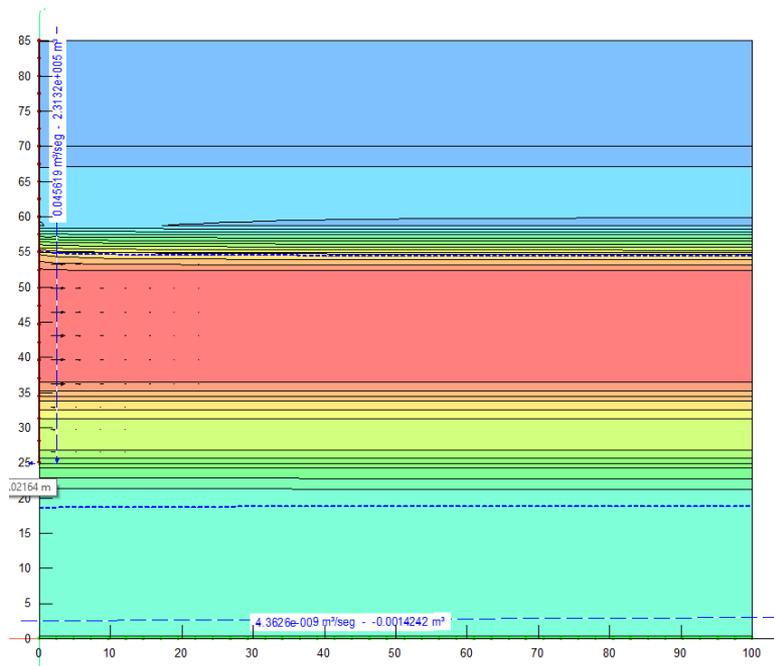


## Resultados del modelado de infiltración



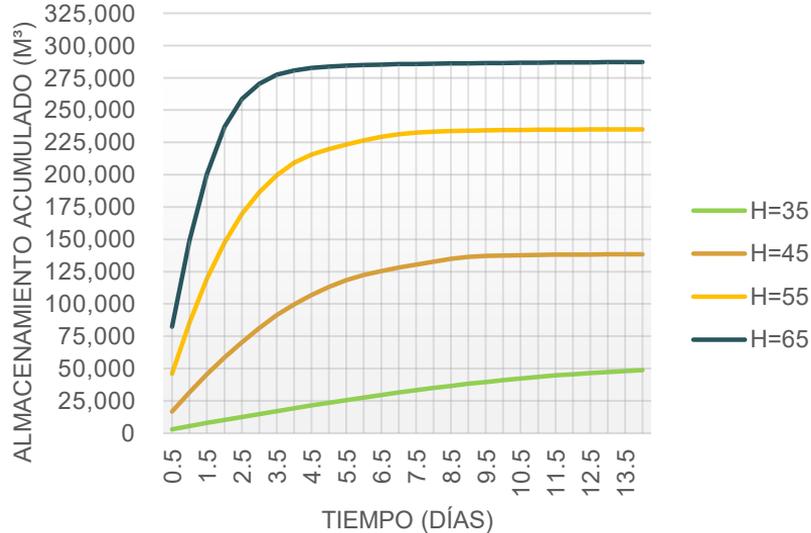
Condiciones de frontera



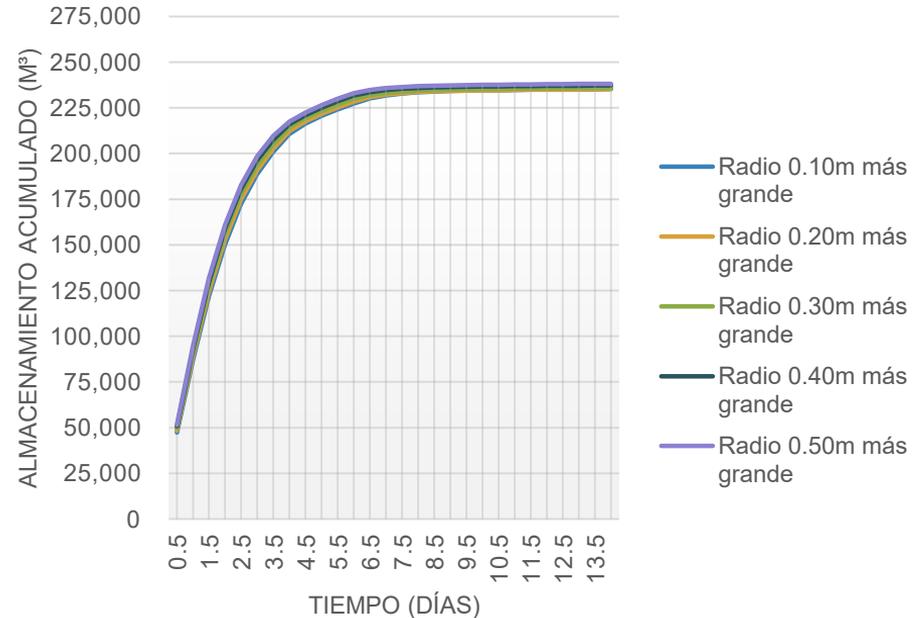


## Resultados del modelado de infiltración

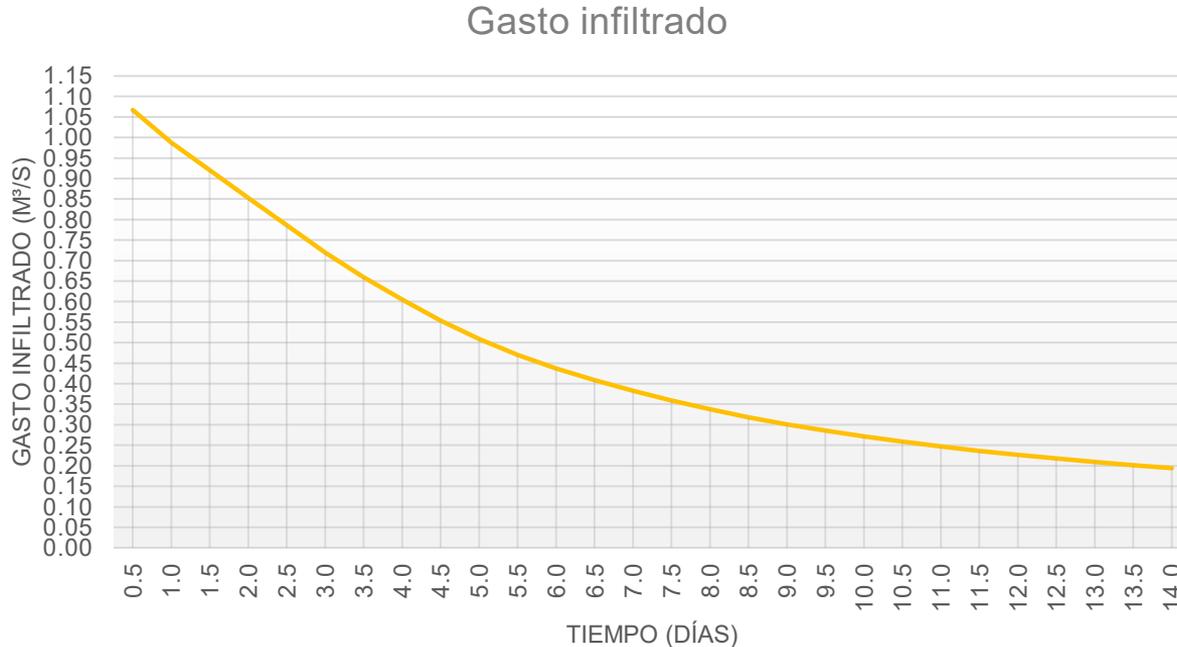
### Volumen acumulado



### Modificación en el radio del pozo



## Resultados del modelado de infiltración



El valor máximo de gasto de infiltración es de **1.067 m<sup>3</sup>/s** y ocurre al inicio del proceso de infiltración. El valor mínimo de gasto de infiltración es de **.1944 m<sup>3</sup>/s** a los 14 días de infiltración continua

## ● Discusión de resultados

**La microcuenca del Chicalote: profundidad de la roca, poca pendiente, inundaciones, nivel estático** que denota un fuerte **abatimiento de las aguas subterráneas**.

**Periodo de retorno de 5 años e intensidad de lluvia de 56.238mm/h:** caudal máximo de escurrimiento de **117.57 m<sup>3</sup>/s**.

**Cada pozo de inyección profunda puede infiltrar el 0.9% del mayor escurrimiento que puede ocurrir cada 5 años.**



## Discusión de resultados

Es importante resaltar que en el proceso de inyección profunda **el diámetro del pozo no representa** una mayor modificación ni al gasto de infiltración ni al volumen total infiltrable. Siendo así **la profundidad y ubicación del pozo** la variable más importante para hacer más eficiente cada pozo de inyección profunda.

Los sistemas de inyección profunda en la microcuenca del Chicalote son un elemento que **permite la infiltración y abonar a la reducción de la sobreexplotación del acuífero, aprovechando** una fuente de agua muy importante como lo son las **pluviales** y, construyendo un sistema formado por aproximadamente 50 pozos, es posible **reducir las máximas inundaciones** a presentarse en 5 años a la mitad de su expresión actual.

El costo de cada pozo realizado en la estratigrafía tipo es de **\$1'056,000** ya incluido el equipo de monitoreo.



## Discusión de resultados

Para poder lograr esto es necesario **realizar una prueba piloto** que permita **el monitoreo del comportamiento del agua subterránea** y del proceso de recarga en profundidad, permitiendo **calibrar modelos numéricos** para su futura aplicación en distintos puntos de la ciudad.

Es de suma importancia atender el **sistema de pretratamiento** para evitar infiltrar contaminantes a las aguas subterráneas.

Este trabajo comprueba que un sistema de recarga artificial a través de pozos de inyección profunda es una tecnología que permitirá **una mejor gestión del agua subterránea** y se espera que de paso a un nuevo paradigma en el que el agua pluvial sea aprovechada para resolver los problemas que se han abordado aquí

