

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**EFFECTOS DEL CONTROL DE pH EN EL TRANSPORTE DE NANO
PARTICULAS DE FIERRO CERO VALENTE EN UN ACUÍFERO**

CRISTÓBAL COX O.¹

RESUMEN

La inyección de nano partículas de fierro cero valente (nZVI) es un prometedor método de remediación in-situ, que puede remediar directamente la fuente de contaminación.

Poco es sabido al respecto pero existe alguna evidencia que a mayor pH menor es la aglomeración y la sedimentación de las partículas de nZVI en el medio poroso, por lo tanto aumenta la distancia de transporte durante una inyección. Como esta es la mayor limitación de las inyecciones de nZVI, el objetivo principal de este trabajo fue investigar los beneficios y limitaciones del control de pH en el transporte de nZVI.

Se hicieron experimentos en donde suspensiones de nZVI fueron inyectadas en tuberías de acrílico rellenas de arena y saturadas con agua para ver cuál es el comportamiento del transporte de las partículas. Para analizar el efecto del incremento del pH fueron empleadas dos bases fuertes: Hidróxido de calcio, en suspensión y solución, e hidróxido de sodio en solución. Las bases fueron inyectadas antes, junto con y después de la suspensión de nZVI.

Un mejor transporte fue obtenido cuando los hidróxidos de calcio y sodio fueron inyectados antes y después de las suspensiones de nZVI, aun cuando sólo la inyección previa de la suspensión de hidróxido de calcio mejoró significativamente el transporte del nZVI. Fue claro que al inyectar los hidróxidos de calcio y sodio en conjunto con el nZVI el transporte disminuyó. Este efecto fue causado porque la suspensión de nZVI usada ya tenía suficientemente altos valores de pH y el aumento de la fuerza iónica dada por las bases causa que las partículas de nZVI inhiban su fuerza de repulsión entre ellas y hacia los granos de arenas, sedimentando o adhiriéndose al medio poroso.

¹Jefe Unidad de Monitoreo, GP Consultores Ltda. – ccox@gpconsultores.cl

1. INTRODUCCIÓN

Un método in-situ que puede remediar directamente la fuente de contaminación es la inyección de nano partículas de hierro cero valente (partículas de nZVI por su sigla en inglés), el cual puede transformar los contaminantes en especies benignas.

En su forma granular el hierro cero valente ha sido aplicado con éxito en barreras permeables, reduciendo hidrocarburos y especies inorgánicas (como el arsénico) (Keane, 2009). El uso de partículas de nZVI representa una nueva generación de técnicas de remediación, que debido a su pequeño tamaño puede permanecer en suspensión y ser inyectadas directamente a la fuente de contaminación (Zhang, 2003) no quedando limitadas a contaminación somera. Además, debido a su gran área específica, su reacción es de 25 a 30 veces más rápida que al utilizar su forma granular (Li et al. 2006).

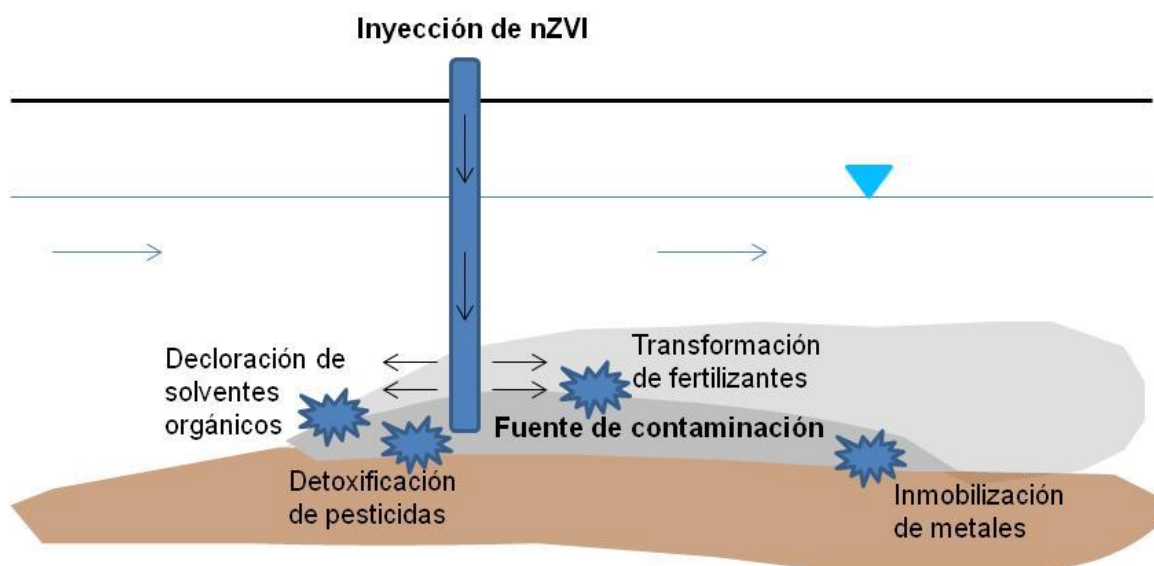


Figura 1. Inyección de nZVI en la fuente de contaminación y posibles reacciones.

Hay casos en que se ha aplicado esta técnica con resultados prometedores. Pero este tipo de remediación no está completamente aceptada debido a la limitada movilidad de las partículas de nZVI (tienden a agregarse y adherirse a las partículas de suelo), y a su reducida duración (debido a la oxidación aeróbica y anaeróbica). Es por esto que ciertas modificaciones están siendo estudiadas. Por ejemplo, se ha visto que con un pH más alto el nZVI es más estable. Esto haría que el método fuera menos costoso al tener que aplicarse menos cantidad de nZVI.

Se ha visto también que el aumento de pH afecta el transporte de las partículas de nZVI. Poco es sabido al respecto pero existe alguna evidencia que a mayor pH menor es la aglomeración y la sedimentación de las partículas de nZVI, por lo tanto aumenta la distancia de transporte. Como esta es la mayor limitación de las inyecciones de nZVI, el **objetivo principal** de este trabajo fue investigar los beneficios y limitaciones del control de pH en el transporte de nZVI.

Las investigaciones se llevaron a cabo en el laboratorio VEGAS de la Universidad de Stuttgart, Alemania, mediante inyecciones de partículas de nZVI en tuberías de acrílico rellenas con arena y saturadas de agua.

2. ANTECEDENTES TEÓRICOS

A continuación se repasará la teoría necesaria para entender los procesos de transporte que ocurren durante una inyección de nano partículas de hierro cero valente en un medio poroso.

La Teoría de la Filtración Aplicada a Partículas de nZVI

La remoción de partículas de la fase líquida explicada por la teoría de la filtración cuenta de dos procesos: transporte y adherencia. Sin embargo, la aglomeración de las partículas de nZVI debido a las atracciones magnéticas hace difícil aplicar la teoría clásica de filtración. De hecho, De Boer (2012) mostró que una suspensión de nZVI está compuesta por una mezcla de nano coloides (nm) y micro aglomerados (mm).

Los nano coloides primero se filtran por los procesos de transporte de intercepción y difusión, acercándose a los colectores del medio poroso y teniendo la posibilidad de adherirse o no a los granos, proceso electroquímico que se detallará en el siguiente subtítulo.

Los micro aglomerados están compuestos por partículas de nZVI que previamente ya pasaron por un proceso de adherencia entre ellas. Luego los procesos de transporte en este caso vienen dados por cernido y sedimentación.

La Adherencia entre Partículas de nZVI y con el Medio Poroso

Una vez que existe contacto entre las partículas de nZVI y los granos colectores, la adherencia puede ocurrir dependiendo de las fuerzas que se producen. Las fuerzas de adherencia son la suma de las fuerzas de atracción de Van der Waals (dipolos temporales) y la repulsión de Coulomb (doble capa eléctrica) (O'Melia y Stumm, 1967), siendo esta última la más importante cuando la partícula y el colector están muy cercanos. El medio poroso y los coloides tienen una carga superficial negativa, tendiendo a repelerse entre ellos, pero ya sea la heterogeneidad de la carga o la superficie rugosa de los granos colectores, sirven para eliminar localmente esta repulsión. Los coagulantes también la eliminan. Otros factores que influyen la interacción entre el medio poroso y los coloides son la fuerza iónica del agua subterránea y la presencia de surfactantes (de Boer, 2012).

La fuerza de repulsión de la doble capa eléctrica es función del potencial zeta al cuadrado, el cual a su vez depende del pH del medio. Si el pH es alto, los iones OH^- dan al sistema una carga negativa. Si el pH es bajo, los iones H^+ dan al sistema una carga positiva. Hay un valor de pH en el cual las cargas quedan balanceadas y el potencial zeta se acerca a cero, este es el punto isoeléctrico, que es cuando el sistema es menos estable y las partículas se tienden a aglomerar.

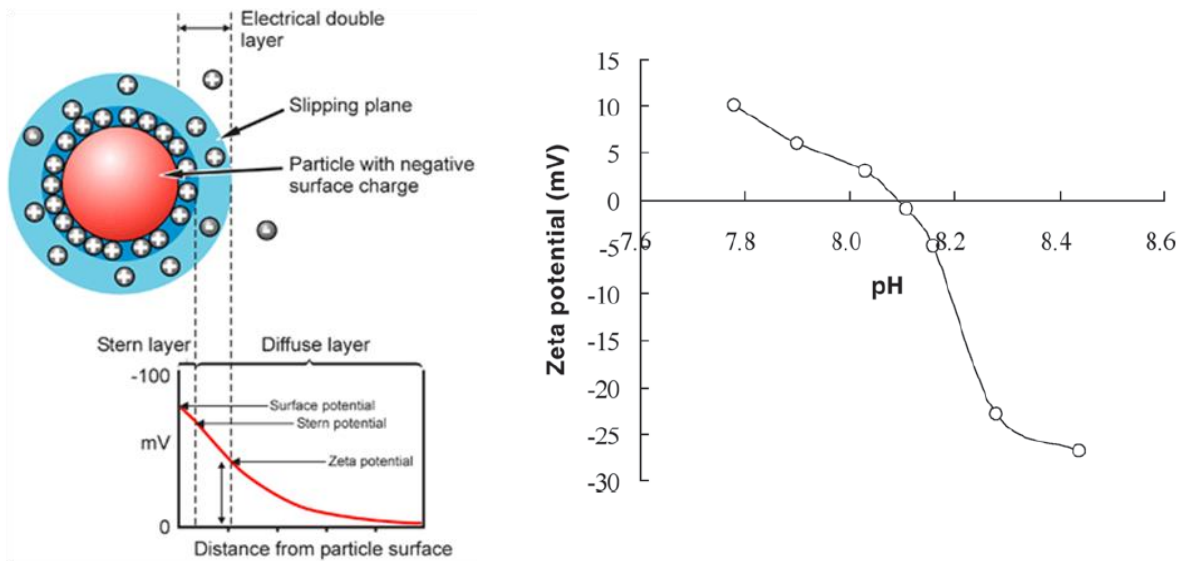


Figura 2. Representación del potencial zeta (Fuente: web Malvern instruments, 2012) y ejemplo de la relación entre el potencial zeta y el pH para una partícula de nZVI (Fuente: Keane, 2009).

Incremento de pH con Hidróxidos de Calcio y de Sodio

Una posibilidad de incrementar el pH es usando hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), el cual ha sido utilizado anteriormente para neutralizar drenaje ácido de minas, pero nunca ha tratado de inyectarse a un acuífero ya que debido a su baja solubilidad forma una suspensión que podría colmatar los poros, reduciendo la conductividad hidráulica. Una ventaja de esto es que esta nueva técnica podría aumentar el pH por más tiempo al formar un reservorio. Un problema es que este compuesto sirve como coagulante para las partículas.

Otra forma de subir el pH es usando hidróxido de sodio ($\text{Na}(\text{OH})$) o soda cáustica, el cual debido a su alta solubilidad sí ha sido inyectado anteriormente para neutralización (Werner et al., 2008).

Una desventaja de adicionar este tipo de sales es que la fuerza iónica aumenta, modificando las fuerzas de repulsión de doble capa. Mientras mayor es la fuerza iónica, más comprimida está la doble capa, lo que hace que la energía potencial baje y los coloides puedan aglomerar. Este efecto es mayor para el caso del ión bivalente calcio (Ca^{+2}) que para el caso del sodio (Na^+) (Saleh et al., 2008).

Resumen e hipótesis de trabajo

Como resumen, la adición de hidróxido de calcio o hidróxido de sodio puede provocar una serie de efectos, mejorando (+) o disminuyendo (-) el transporte de las partículas de hierro cero valente durante una inyección (ver **Figura 3**):

(-) El incremento de la fuerza iónica hace que la repulsión entre partículas y entre partículas y colectores sea más débil, aumentando la posibilidad de aglomeración y sedimentación o adherencia. Este efecto debería ser más importante para el caso del hidróxido de calcio.

- (+) Los valores de pH suficientemente altos dados por estos compuestos estabilizan las partículas en una suspensión debido a la alta carga negativa presente.
- (-) La capacidad flocculante del hidróxido de calcio probablemente hará que las partículas se aglomeren.
- (+) Otro efecto de las partículas de hidróxido de calcio es que pueden depositarse en zonas de baja velocidad del medio poroso, mejorando una posterior inyección de nZVI (menor tortuosidad).

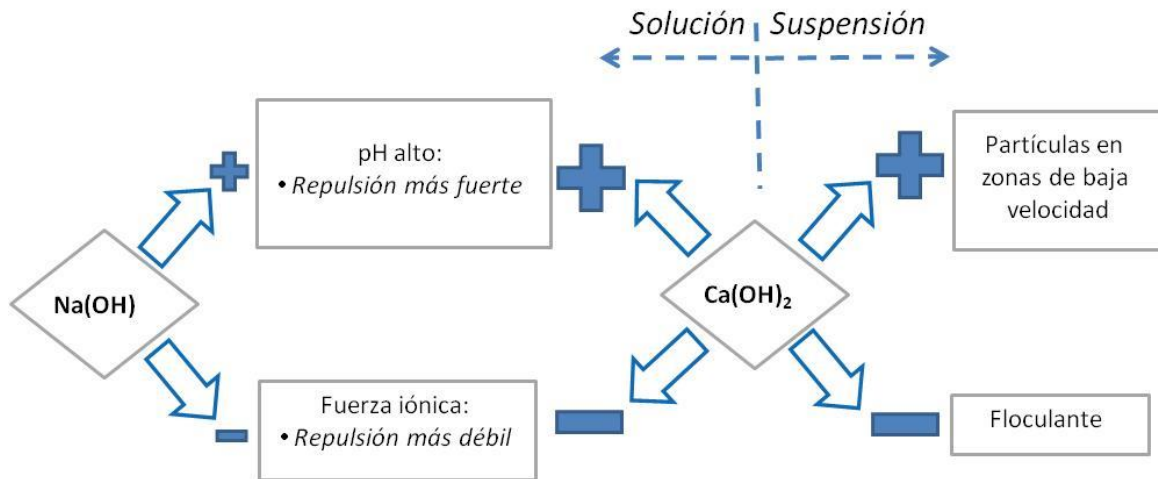


Figura 3. Efectos positivos y negativos de los hidróxidos de calcio y sodio en el transporte de partículas de nZVI.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Estrategia de Terreno para el Control de pH en Inyecciones de nZVI

En terreno son posibles muchas configuraciones de una inyección de nZVI usando una técnica de control de pH, todas las cuales serán probadas experimentalmente a través de una simplificación en una dimensión.

La suspensión de Ca(OH)_2 puede ser inyectada en la misma posición que las partículas de nZVI (Configuración A). En este caso existen tres posibilidades, que el hidróxido de calcio sea inyectado al mismo tiempo (A1), antes (A2) o después (A3) que el nZVI. Un buen resultado sería que el hidróxido llegara tan lejos como el fierro.

Otra opción es inyectar el Ca(OH)_2 en otro pozo aguas arriba de la inyección de las partículas de nZVI (Configuración B). En este caso el flujo base llevaría la pluma disuelta de hidróxido de calcio hacia el sector en donde se inyectaría el nZVI. La inyección de fierro se podría llevar a cabo antes o después que la del hidróxido.

Al usar una solución de hidróxido de sodio, inyectarla aguas arriba del nZVI sería lo mismo que inyectarla en el mismo lugar. Entonces quedan dos posibilidades: Inyectar la solución de Na(OH) junto con la suspensión de nZVI (Configuración C1) o inyectarla antes y después (Configuración C2).

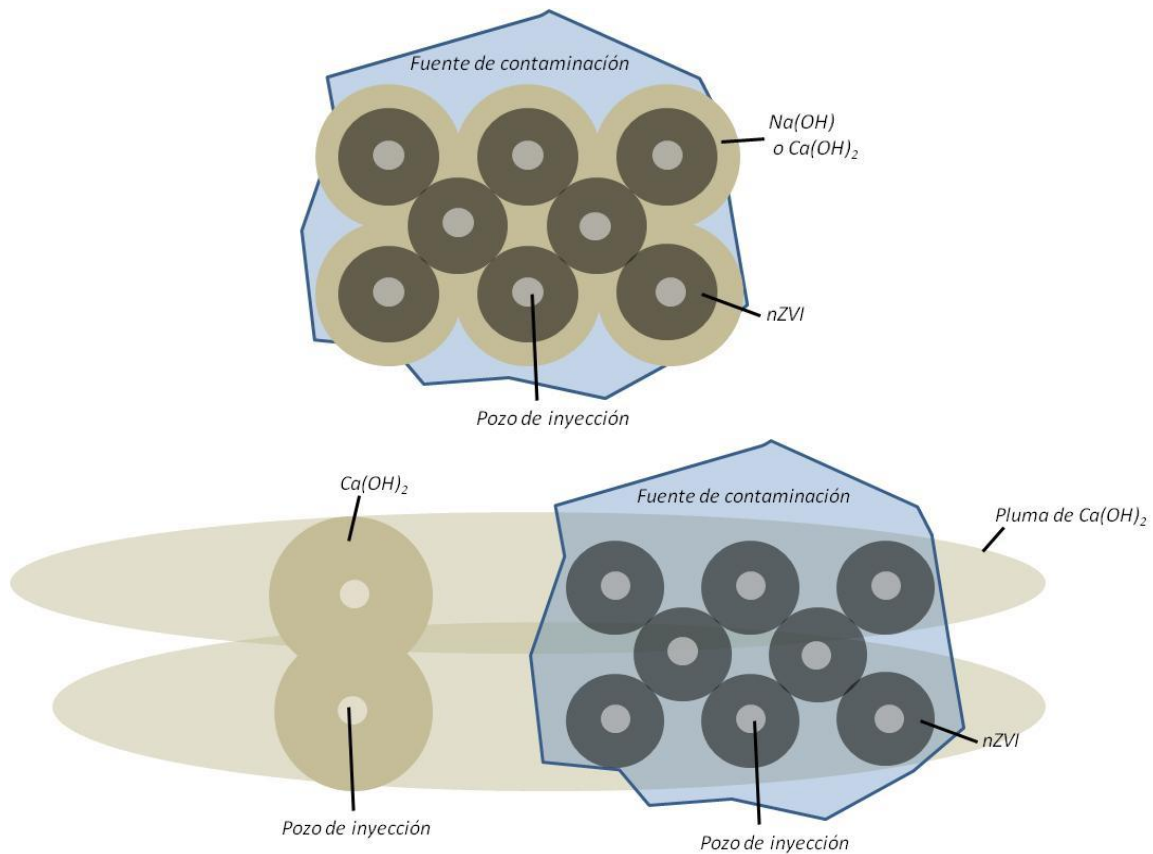


Figura 4. Posibles configuraciones de inyección de nZVI con un técnica de control de pH.

Debido a que el pH de la suspensión de nZVI ya es bastante alto (cercano a 11), se hizo una prueba para saber qué pasaría si la suspensión baja su pH (Configuración D). Para esto se usó una solución de HCl 0,005M mezclada con las partículas de nZVI (pH de 8,2 a 8,4).

Adicionalmente, como caso base se hizo una inyección de una suspensión de partículas de nZVI sin ningún aditivo.

Configuración Experimental en Laboratorio

Una configuración experimental fue construida en el laboratorio VEGAS para medir el transporte de partículas de nZVI en medios porosos usando experimentos de columna de una dimensión (**Figura 5**).

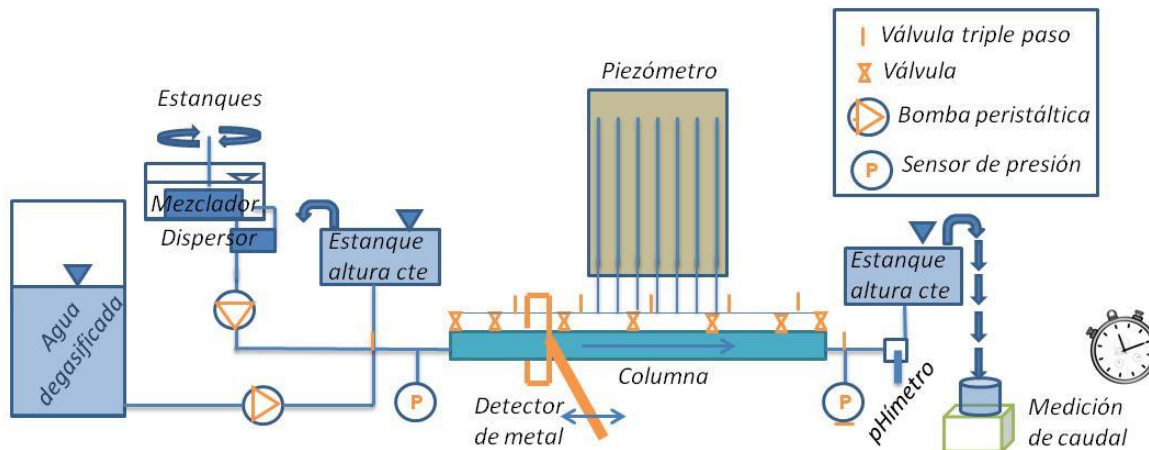


Figura 5. Configuración experimental en laboratorio.

Las tuberías de acrílico transparente de largo 1,91m y diámetro 3,6cm fueron rellenas con arena $d_{50} = 0,47\text{mm}$, quedando con una porosidad $n = 0,35$ y una conductividad hidráulica $K = 1,3 \times 10^{-3} \text{m/s}$. Dos situaciones de flujo pudieron ser simuladas en ellas:

- Etapa de inyección: Durante la inyección, la suspensión de nZVI contenida en un estanque de mezcla y dispersión, fue bombeada hacia la columna mientras un estanque de altura piezométrica constante fue conectado en su efluente. El tipo de partícula de nZVI fue la Nanofer25S (estabilizada con surfactantes) con una concentración en agua destilada de 10g/L, que fue demostrada como la óptima para el transporte (De Boer, 2007). Las suspensiones fueron mantenidas homogéneas en el estanque a través de una mezcla energética y los aglomerados se trataron de romper a través de una previa dispersión. Se inyectó un volumen de poros de la columna (i.e. 685cm^3) a una tasa alta de 50mL/min, lo que significó una velocidad en el medio poroso (v/n) de $2,3 \times 10^{-3} \text{m/s}$. La suspensión de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y las soluciones de $\text{Na}(\text{OH})$ fueron preparadas con agua destilada en el mismo estanque del nZVI o en uno adicional dependiendo la configuración que se haya probado. Las concentraciones y pHs resultantes se detallan más adelante. Para el caso de la Configuración B se preparó una solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ realizando una filtración previa. La solución que permitió bajar el pH se mezcló directamente con el nZVI en el estanque previo a la inyección.
- Etapa de escurrimiento de agua: Antes y después de la inyección, otro estanque de altura piezométrica constante fue conectado en el afluente a la columna, manteniendo un gradiente de escurrimiento de 0,193 a 0,196. El agua utilizada fue potable degasificada, teniendo un pH 8,1. El caudal fue aforado en una pesa a la salida junto con una medición en línea del pH, mientras, se llevaron a cabo pruebas hidráulicas con un piezómetro (determinación de K) y muestreos para medir pH a través de puertos conectados a lo largo de la columna. Adicionalmente, en esta etapa se realizaron las mediciones de la distribución del hierro con ayuda de un detector de metal que recorre la columna a todo su largo. Para calibrar el detector se debe tener la concentración exacta de la suspensión de nZVI utilizada. Esto se hizo muestreando en el estanque de mezcla y haciendo un análisis de hierro total en un fotómetro (amplitud 510nm).



Figura 6. Funcionamiento del detector de metal en una columna, posterior a la inyección de nZVI.

4. RESULTADOS

Los experimentos que se llevaron a cabo trataron de cambiar los menos factores posibles, sólo los deseados. De esta forma se pueden comparar los resultados directamente. Sin embargo, existieron variables que resultaron difíciles de controlar, siendo la más importante de ellas la concentración de partículas de nZVI en la suspensión de inyección, la que siempre trató de acercarse a 10g/L. Esto no fue siempre posible debido principalmente a la poca homogeneidad de la suspensión original, que tenía que ser enérgicamente mezclada para obtener una muestra representativa.

A continuación se presentan los resultados principales de los experimentos que son la distribución de concentraciones a lo largo de la columna posterior a la inyección. Se detalla también para cada experimento, las condiciones que van cambiando.

Inyecciones Usando Hidróxido de Calcio

Las concentraciones de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ utilizadas dependen de la saturación de este compuesto, que es aproximadamente 1,7g/L. Sobre este valor la parte no disuelta se transforma en una suspensión. En estos caso se utilizó cuatro veces la saturación (6,8g/L), que demostró ser una de las concentraciones que más favorecía el transporte de este compuesto en el medio poroso (Cox, 2012).

Las condiciones de las inyecciones que cambian en cada uno de los experimentos se especifican en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Condiciones en inyecciones de nZVI usando hidróxido de calcio.

| Número y nombre de configuración | Caso base nZVI | A1.1 1PV suspensión Ca(OH)_2 y nZVI | A1.2 1PV solución Ca(OH)_2 y nZVI | A2 1PV suspensión Ca(OH)_2 antes | A3 1PV suspensión Ca(OH)_2 después | B 2PV solución Ca(OH)_2 antes y después |
|----------------------------------|----------------|--|--|---|---|--|
| Fierro Total [g/L] | 9,2 | 10,4 | 9,7 | 7,8 | 9,2 | 10,7 |
| Ca(OH)_2 [g/L] | 0 | 6,8 | 1,7 | 6,8 | 6,8 | 1,7 |
| pH | 11,1-11,4 | 12,9 | 12,7-12,9 | 12,7 después 11,1-11,4 | 11,1-11,4 después 13,37 | 12,6 después 11,1-11,4 después 12,7 |

En el caso de una inyección previa de una suspensión de Ca(OH)_2 (experimento A2), las partículas colmataron parcialmente los poros de la arena, cambiando la conductividad hidráulica y la porosidad del medio. Esto hizo cambiar también las condiciones de la inyección de nZVI que se hizo posteriormente.

Los resultados de los experimentos se resumen en la **Figura 7**.

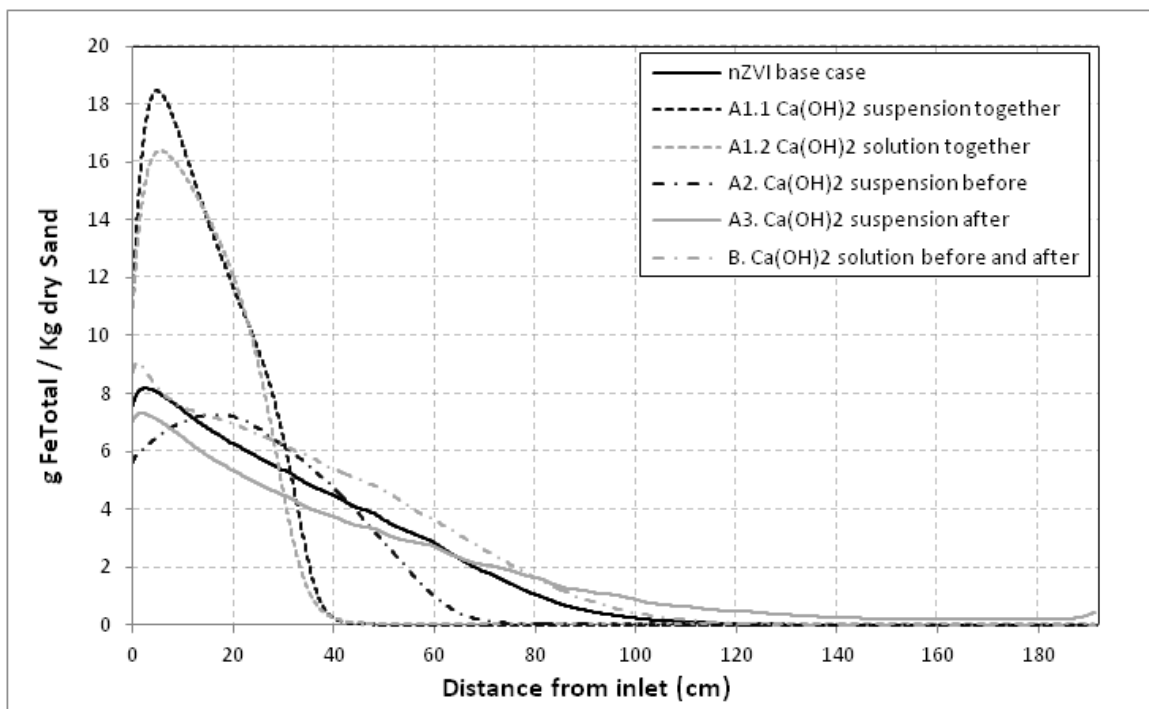


Figura 7. Distribución de concentraciones de hierro total a lo largo de la columna en inyecciones conjuntas con Ca(OH)_2 .

Observando los resultados, es claro que cuando se inyectó la suspensión de nZVI junto con Ca(OH)_2 el transporte disminuyó. Esto puede deberse al efecto floculante del hidróxido de calcio o bien a la alta fuerza iónica del ión bivalente Ca^{+2} que comprime la barrera repulsiva de la doble capa haciendo que las partículas de nZVI se aglomeren y depositen o se adhieran directamente a los granos de arena. Casi no existió diferencia cuando el

hidróxido de calcio se inyectó en solución por lo que se puede concluir que es más importante el efecto de la compresión de la doble capa eléctrica que la floculación.

En el caso de la inyección de la suspensión de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ antes de la suspensión de nZVI, la concentración máxima de hierro total fue desplazada hacia la derecha. Esto porque se depositaron partículas de hidróxido de calcio en las áreas de menores velocidades y de esta forma aumentó la velocidad en el medio poroso al inyectar el nZVI. Eso si, las partículas de hierro no llegaron tan lejos como en el caso base, debido seguramente a la presencia del $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Al inyectar la suspensión de hidróxido de calcio posterior a la suspensión de nZVI hubo una remobilización de hierro, llegando éste hasta la salida de la columna. Este efecto se produjo también cuando se probó con una inyección de agua destilada por lo que es más bien un fenómeno físico de arrastre de partículas.

Cuando se usó una solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para inyectarla antes y después de la suspensión de nZVI el transporte mejoró levemente. Sin embargo esta variación no es realmente significativa y puede deberse a la diferencia entre las concentraciones de hierro inyectado.

Inyecciones Usando Hidróxido de Sodio

Para las dos inyecciones que usaron una solución de $\text{Na}(\text{OH})$ las condiciones se presentan en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Condiciones en inyecciones de nZVI usando hidróxido de sodio.

| Número y nombre de configuración | Caso base nZVI | C1 1PV solución $\text{Na}(\text{OH})$ con nZVI | C2 2PV solución $\text{Na}(\text{OH})$ antes y después |
|----------------------------------|----------------|--|---|
| Fierro Total [g/L] | 9,2 | 7,0 | 8,1 |
| $\text{Na}(\text{OH})$ [g/L] | 0 | 1,1 | 1,1 |
| pH | 11,1-11,4 | 12,6 | 12,7 después 11,1-11,2 después 12,8 |

El hidróxido de sodio es mucho más soluble que el de calcio, llegando a concentraciones de hasta 1,1g/L en saturación. Los resultados de los experimentos se resumen en la **Figura 8**.

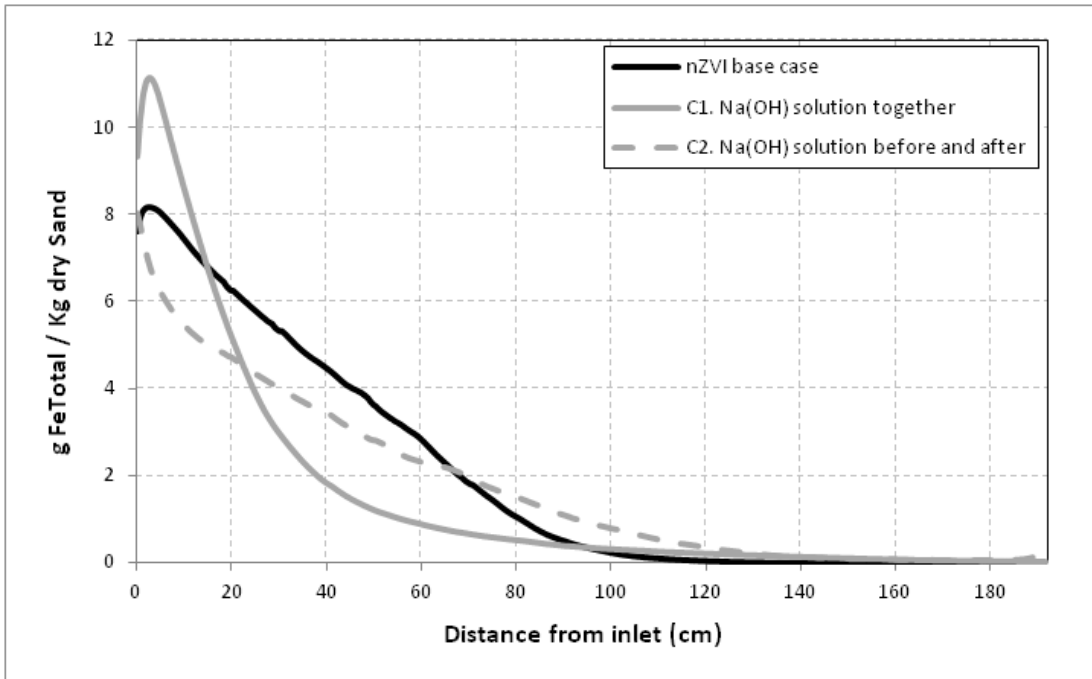


Figura 8. Distribución de concentraciones de hierro total a lo largo de la columna en inyecciones conjuntas con Na(OH).

El transporte de nZVI disminuyó cuando fue inyectado en conjunto con la solución de Na(OH), seguramente influenciado por la fuerza iónica del sodio.

Al contrario, el transporte fue mejorado cuando la solución de hidróxido de sodio fue inyectada antes y después del hierro, llegando éste hasta la salida de la columna. El efecto se produce principalmente por las condiciones de carga eléctrica dadas por la preinyección, ya que posterior a la inyección de nZVI casi no hay remobilización.

Inyección Usando HCl

Para el caso de la inyección que utilizó ácido clorhídrico para disminuir el pH, las condiciones se detallan en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Condiciones en inyecciones de nZVI usando ácido clorhídrico.

| Número y nombre de configuración | Caso base nZVI | D 1PV solución HCl con nZVI |
|----------------------------------|----------------|-----------------------------|
| Fierro Total [g/L] | 9,2 | 9,2 |
| HCl [M/L] | 0 | 0,005 |
| pH | 11,1-11,4 | 8,2-8,4 |

Los resultados de este experimento se resumen en la **Figura 9**.

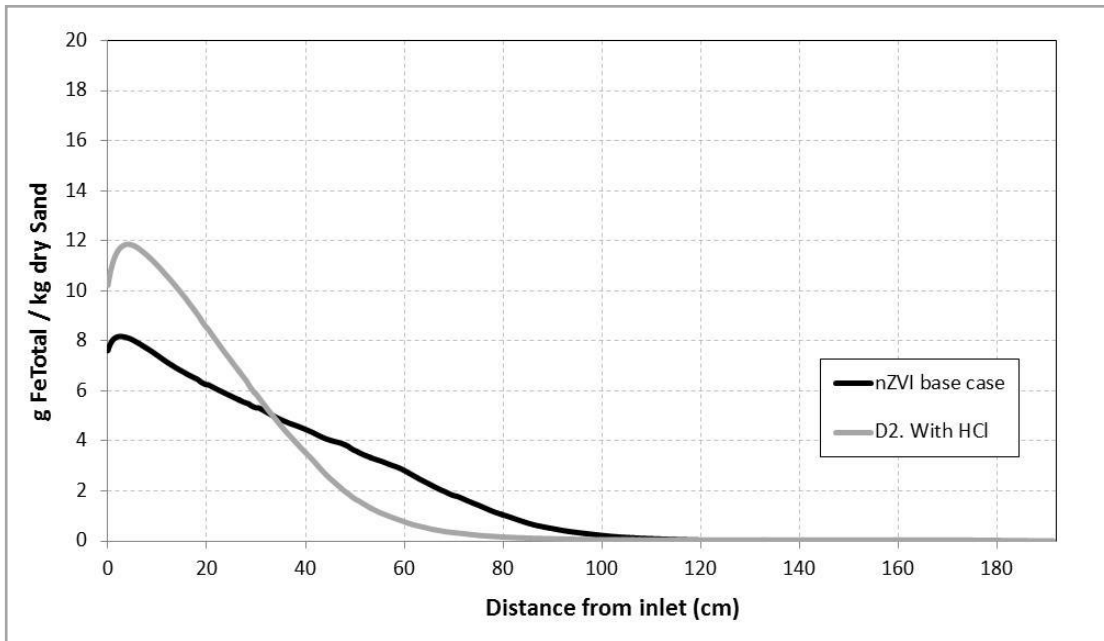


Figura 9. Distribución de concentraciones de fierro total a lo largo de la columna en la inyección conjunta con HCl.

En la figura anterior se ve que la inyección de la suspensión de nZVI con un pH reducido produce una disminución notoria en su transporte. Lo anterior debido a que se estima que el potencial zeta se encuentra cerca de 0 con un pH de 8,3 lo que provoca que las fuerzas de repulsión de la doble capa eléctrica disminuyan.

5. ANÁLISIS Y CONCLUSIONES

En general, el aumento de pH no mejora significativamente el transporte de nZVI, o al menos el aumento de la fuerza iónica produce un mayor efecto. Esto se debe seguramente a que el pH de las suspensiones de nZVI ya es lo suficientemente alto antes de añadir ningún compuesto para aumentarlo. Por lo tanto, un mayor incremento del potencial zeta no juega un rol importante en mejorar el transporte porque las partículas de nZVI ya se encuentran estabilizadas.

Para elegir la mejor inyección de nZVI es necesario analizar la distribución de fierro total en la columna después de realizada, pensando que una inyección provechosa es cuando se pierde la menor cantidad de nZVI. Es decir, si se requiere una masa mínima (C_{minimal}) para tratar cierto contaminante, todo lo que está por sobre esta cantidad no es provechoso, y si se quiere llegar hasta cierta distancia desde el pozo de observación (r_{aimed}), el fierro que alcanza mayor distancia es perdido. En este sentido, mientras más uniforme sea la concentración mejor es el resultado.

Atendiendo las anteriores consideraciones, el transporte mejora cuando la suspensión de hidróxido de calcio y la solución de hidróxido de sodio se inyecta antes y después de la inyección de nZVI. La distribución de fierro total mejora cuando la suspensión de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ es inyectada antes, debido a que las partículas se depositan en área de bajas velocidades

(ver **Figura 10**), en tanto que la inyección previa de Na(OH) mejora las condiciones de carga eléctrica en el medio poroso.

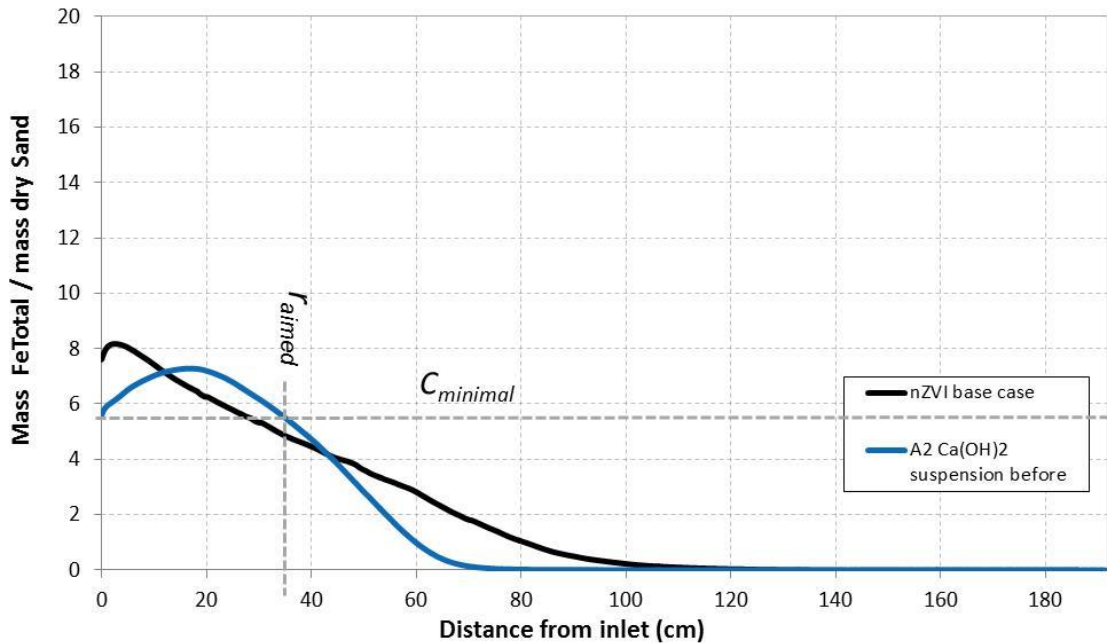


Figura 10. Presentación del concepto que permite encontrar la mejor inyección.

Finalmente, con la ejecución de estos experimentos se demostró también que es posible inyectar una suspensión de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en el medio poroso, quedando éste como un reservorio que aumenta el pH durante un tiempo más prolongado. El efecto que produce en el pH depende de las condiciones del medio poroso y de la hidroquímica.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la disponibilidad de las instalaciones del laboratorio VEGAS de la Universidad Stuttgart y a todo el equipo de apoyo. Al proyecto NAPASAN financiado por el Ministerio Alemán de Educación e Investigación. Se agradece especialmente el apoyo académico de Dr.-Ing. Norbert Klaas, M.Sc. Dipl.-Geogr. André Matheis y Jürgen Braun, Ph.D.

REFERENCIAS

De Boer, C. 2007. Characteristics and mobility of zero-valent nano-iron in porous media a laboratory assessment study. Master's thesis Utrecht University.

De Boer, C. 2012. Transport of Nano Sized Zero Valent Iron Colloids during Injection into the Subsurface. PhD dissertation, University of Stuttgart.

Cox, C. 2012. Mobility and pH control of burnt lime in porous media for a nZVI remediation. Independent study, University of Stuttgart, 2012.

Keane, E. 2009. Fate, transport, and toxicity of nanoscale Zero-Valent Iron (nZVI) used during superfund remediation. Informe de la Duke University para la U.S. Environmental Protection Agency.

Li, X.-q., D.W. Elliott, W.-x. Zhang. 2006. Zero-Valent Iron Nanoparticles for Abatement of Environmental Pollutants: Materials and Engineering Aspects. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 31, 111–122.

O'Melia, C. R., W. Stumm. 1967. Theory of water filtration. *Journal of the American Water Works Association*, 59(11), 1397-1412.

Saleh et al. 2008. Ionic strength and composition affect the mobility of surface-modified Fe₀ nanoparticles in water-saturated sand columns. *Environmental Science & Technology*, 42, 3349–3355.

Werner, E., J. Donovan y E. Barker. Alkaline injection of concentrated sodium hydroxide solution into an acidic surface mine spoil aquifer. *Mine Water Environment*, 27, 109-121.

Zhang, W. 2003. Nanoscale iron particles for environmental remediation: An overview. *Journal of Nanoparticle Research*, 5, 323-332.