

# Recomendaciones para el diseño de cruces subfluviales para acueducto

## Recommendations for the design of subfluvial crossing for aqueducts

DIEGO ARMANDO PEÑA SÁNCHEZ<sup>1</sup> - XAVIER LALOU<sup>2</sup>

1. Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia.
2. Profesor de la Maestría en Ingeniería Civil.

diego.pena-sa@mail.escuelaing.edu.co - xavier.laloum@escuelaing.edu.co

Recibido: 10/11/2018 Aceptado: 18/11/2018

Disponible en [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista)  
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

### Resumen

En este artículo se muestra el desarrollo de una metodología de diseño para la realización de cruces subfluviales, a partir de la recopilación y análisis de las tecnologías sin zanja, tales como la perforación horizontal dirigida (HDD), el *pipe jacking*, el *ramming* y el *auger boring*. El estudio se orientó en la búsqueda de las condiciones en las cuales son más eficientes los métodos, dividiendo sus limitaciones y exponiendo los resultados obtenidos, que, junto con las condiciones específicas de cada proyecto (ubicación, diámetro de la tubería, longitud del cruce, entre otros), ayudan a elegir el método constructivo más indicado.

**Palabras claves:** acueducto, cruces subfluviales, tecnologías sin zanja, suelos, manual de selección.

### Abstract

This article shows the development of a design methodology to make subfluvial crossings, based on the collection and analysis of trench-less technologies such as horizontal directional drilling (HDD), pipe jacking, ramming, and auger boring. The study was aimed to find the conditions that make every method more efficient, stating their limitations and showing the results, which, along with every project's specific conditions (location, pipe diameter, crossing length, among others), help choose the most adequate construction method.

**Keywords:** aqueduct, subfluvial crossing, trench-less technologies, soils, selection manual.

## INTRODUCCIÓN

Cuando se construye un nuevo acueducto puede ocurrir que el trazado de la red de conducción obligue a cruzar un cuerpo de agua o río, lo cual hace necesaria la construcción de una línea de flujo bajo el cuerpo de agua, con el objeto de alterar lo menos posible el cauce y mantener protegidas las orillas y sus barreras vegetales.

En la actualidad, se ha hecho el seguimiento a algunos de los proyectos publicados en el portal de contratación, y se observó que existe poca información en cuanto al plan de investigación del suelo y a sus resultados, con ensayos que no especificaban ni brindaban datos concluyentes para el tipo de obra que se va a ejecutar; en ninguno de los proyectos consultados se registran recomendaciones tales como cuál sería el mejor método constructivo para utilizar o cuál debe ser la metodología de diseño. Esto sin duda generará problemas en los tiempos de ejecución, así como sobrecostos al proyecto.

Con base en lo anterior se realizó este trabajo de investigación, el cual consistió en desarrollar una metodología que indique los factores de decisión que hay que tomar en cuenta para hacer un cruce subfluvial y cuál es el método más favorable que hay que usar.

## RESULTADOS

En la actualidad, hay una gran variedad de tecnologías sin zanja para la instalación de tubería a lo largo de un nuevo trazado, y todas tienen la ventaja de disminuir al máximo la alteración de las orillas de los ríos. En la figura siguiente se muestran las tecnologías sin zanja para obra nueva (figura 1).

La posible aplicación de estas tecnologías para la instalación de tubería de agua potable para cruces sub-

fluviales está sujeta a algunas condiciones y éstas, a su vez, son únicas para cada proyecto. A continuación se exponen las diferentes condiciones:

- Condiciones del terreno
- Longitud del cruce
- Condiciones finales de la tubería instalada
- Proximidad de otras instalaciones
- Diámetro de la perforación
- Protección de la perforación y la tubería
- Potenciales movimientos del suelo
- Espacio de trabajo necesario
- Tolerancias (alineación e inclinación)
- Limitaciones en tiempo de ejecución
- Profundidad de localización
- Tipo de tubería
- Costos y riesgos

Con el fin de simplificar la selección del método más idóneo se hizo una comparación entre tres factores específicos, los cuales son decisivos para la selección de cada tecnología.

Cuando se está ante la necesidad de realizar un cruce subfluvial, existen algunas condiciones inmodificables que son inherentes al proyecto y cuya definición no depende del ejecutor; en primer lugar, porque se encuentra con la condición del terreno, variable inmodificable puesto que es ineludible, y considerar un remplazo de terreno bajo un río es tanto técnica como económicamente inviable; la segunda condición corresponde a la longitud de la perforación, la cual tampoco es modificable, ya que el ancho del río depende de su morfología; finalmente, nos encontramos con el diámetro del conducto, condición que forma parte del diseño hidráulico y resulta de un cálculo o modelo parametrizado.



**Figura 1.** Tecnologías sin zanja para obra nueva.

Fuente. Elaboración propia.

En este sentido, para simplificar la selección del método más idóneo, se realizó una comparación entre estas tres variables específicas, las cuales son únicas para cada situación e inmodificables para la elaboración del cruce subfluvial; además, pueden llegar a restringir la utilización de cada metodología.

### Condiciones de terreno

La primera variable es la condición del terreno, específicamente la granulometría; basándose en el porcentaje de gravas del suelo como factor limitante de cada metodología, la gran mayoría de los métodos funcionan en arenas poco gravosas y en arcillas blandas y duras, pero el comportamiento en arenas gravosas y rocas no es aceptable en todos los métodos.

El problema principal con las gravas es la falta de cohesión; en este tipo de suelos los elementos se desplazan debido a la falta de cohesión al momento de introducir el varillaje en el suelo, pero al retirarlo éstos llenan el espacio previamente ocupado por el varillaje, ocasionando problemas de estabilidad en el frente de trabajo y dificultando a su vez el proceso de perforación; además, este tipo de suelo limita el uso de los lodos de perforación, pues algunas partículas son muy grandes y no salen por flotación.

### Diámetro de la perforación

El diámetro de la perforación es un parámetro excluyente al tomar la decisión de la metodología que se va a utilizar, en razón de que, al momento de seleccionar un equipo, éste debe ser acorde con el diámetro de tubería por instalar; cada equipo tiene una limitante en capacidad de perforación, de acuerdo con el diámetro que se va a usar. Un mismo equipo puede realizar perforaciones de 500 m en un diámetro pequeño, pero sólo 200 m en el diámetro máximo de su capacidad; adicionalmente, las técnicas varían según el diámetro por utilizar.

### Longitud de la perforación

Se tomó esta variable como referencia porque es el valor menos constante en los diseños de cruces subfluviales. Como se mencionó anteriormente, es intrínseco de cada proyecto y es un factor limitante al momento de escoger una técnica de trabajo. La variabilidad de técnicas en este

sentido no sólo depende del tamaño y de la capacidad del equipo (como en el diámetro), sino que además depende de la capacidad de retiro de escombros y de transmitir la fuerza al frente de la perforación.

### Construcción de tablas de aplicabilidad

Luego de revisar los alcances reales de cada metodología en cuanto a las tres condiciones previamente seleccionadas (condiciones del terreno, longitud de la tubería y diámetro), se continuó con la elaboración de tres tablas que consolidan esta información.

Cada una de estas tablas corresponde a una condición y define la aplicabilidad o no de la metodología en cada condición. Las tablas generadas tienen la siguiente estructura:

**Tabla 1**  
Estructura de las tablas de condiciones

Condición (G%, Diámetro, Longitud)	Metodología	Metodología B	ETC.
Rango (% , $\phi$ , M) Desde - Hasta	Aplicabilidad (Sí, No, Posible)	Aplicabilidad (Sí, No, Posible)	Aplicabilidad (Sí, No, Posible)

Fuente: Elaboración propia.

**Condición (G%, diámetro, longitud):** Identifica la condición a la que corresponde la tabla.

**Metodología:** Nombra cada metodología.

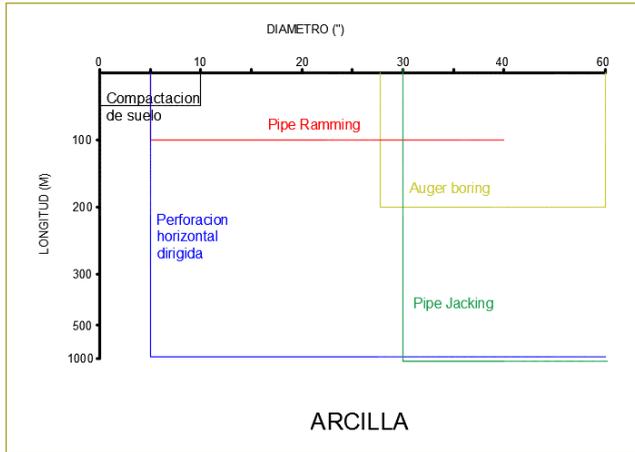
**Rango (% ,  $\phi$  , M) Desde – Hasta:** Rango de valores que condicionan la aplicabilidad, la forma del rango será “desde – hasta”; por ejemplo en la tabla de los diámetros encontraremos el rango 10” – 20”, lo cual quiere decir que la aplicabilidad contempla sólo este rango.

**Aplicabilidad (Sí, No, Posible):** Las siguientes columnas corresponden al resultado de la aplicabilidad de cada metodología y el resultado será “Sí, No, Posible”. Los resultados Sí y No significan la aplicabilidad, el resultado “Posible” corresponderá a situaciones en las que se aplica la metodología, pero con restricciones; estas limitaciones pueden obedecer a aditamentos especiales de los equipos o a salvedades correspondientes a otra condición. Por ejemplo, en algunas metodologías las longitudes más largas no se pueden realizar con el máximo diámetro del equipo.

Con el fin de hacer más fácil la elección de la metodología, se generaron gráficas para consolidar la información; en cada una se puede observar la clasificación de suelos con base en su granulometría: las abscisas muestran los diámetros posibles de trabajo y en las ordenadas se registran las longitudes por cruzar.

Para adecuar las gráficas al objetivo de la investigación, se adaptaron a las condiciones existentes en Colombia; esta adaptación corresponde a condicionamientos reales de los anchos de los ríos en el país y a

los diámetros utilizados para tuberías de acueductos. A renglón seguido se presenta la gráfica para las arcillas (figura 2).



**Figura 2.** Gráfica de aplicabilidad para las arcillas.  
Fuente: Elaboración propia.

Para las situaciones en las que dos o más metodologías tengan aplicabilidad se puede llegar a un resultado revisando algunas de las variables de decisión. La priorización de una u otra de estas variables dependerá de la característica que el evaluador considere más importante, pero se recomienda un orden de elegibilidad según otros criterios de selección; en éstos se prioriza la elección de los métodos de compactación de suelo sobre la perforación horizontal dirigida, toda vez que en el primero es más sencillo el procedimiento de ejecución y requiere una menor área de trabajo, lo que se traduce en mitigación de riesgos durante el desarrollo de las actividades.

También puede quedar priorizado el uso del *pipe ramming* sobre el *auger boring* por el efecto causado durante la instalación de la tubería. Este efecto consiste en que a medida que el tubo es hincado dinámicamente en el suelo, en la punta de la tubería ocurre un efecto de compactación, lo que claramente reorienta el suelo contra la pared de la tubería, creando un “arco” alrededor de las paredes de la tubería. Esto hace que la presión vertical en el tubo se vea disminuida y exista mayor tensión en los lados de la tubería, alcanzando un estado estable. Adicionalmente, el *pipe ramming* es una metodología más eficiente en cortas distancias debido a que no existe riesgo de atascamiento de la herramienta de excavación.

Otra consideración importante es el espacio de trabajo. En muchas ocasiones, para ejecutar las metodologías hay que contar con amplios espacios de trabajos; la gran mayoría de las tecnologías sin zanja tienen como prerrequisito la ejecución de un pozo de ataque, cuyas dimensiones dependen directamente del diámetro de la tubería y de la profundidad requerida de la instalación.

En las tecnologías en las que la potencia de empuje es suministrada desde el pozo de ataque se necesita construir un muro de reacción en la cara opuesta del pozo a la perforación, muro que debe ser lo suficientemente rígido para resistir la fuerza aplicada para hincar la tubería. La construcción de este tipo de muro supone una desventaja frente a las tecnologías que no lo requieren, pues estos obstáculos son incluyentes y no se limitan a tiempo de ejecución y costos.

Las tecnologías de *auger boring* y *pipe ramming* requieren la construcción de un pozo, el cual debe tener un piso en concreto que tendrá la función de servir como soporte a los rieles donde se ubica todo el sistema. El

**Tabla 2**  
Orden de elegibilidad según el efecto en el suelo circundante

Cruces				Elegibilidad
<i>Auger boring</i>	<i>Pipe jacking</i>	PHD	<i>Pipe ramming</i>	PHD
<i>Auger boring</i>	<i>Pipe jacking</i>			<i>Pipe jacking</i>
<i>Auger boring</i>	<i>Pipe ramming</i>			<i>Pipe ramming</i>
Compactación de suelo	<i>Pipe ramming</i>			Compactación de suelo
Compactación de suelo	PHD			Compactación de suelo

Fuente: El autor.

**Tabla 3**  
Orden de elegibilidad según el espacio de trabajo necesario

Características del pozo de ataque	Orden de elegibilidad	Tecnología
No requiere	1	Perforación horizontal dirigida
Pozo pequeño	2	Métodos de compactación de suelo
Pozo excavado con piso en concreto	3	<i>Pipe ramming</i>
Pozo excavado con piso en concreto	4	<i>Auger boring</i>
Pozo excavado con construcción de muro de reacción	5	<i>Pipe jacking</i>

Fuente: Elaboración propia.

montaje de rieles en una losa no se considera tan complejo como la construcción de un muro de reacción.

Para los métodos de compactación de suelo también se requiere la excavación de un pozo de ataque, pero dados los diámetros pequeños que maneja este tipo de tecnología, sumado a que la fuerza de la excavación es ejercida desde la punta, resulta en un pozo de ataque de bajas especificaciones. Prácticamente, el único requerimiento es llegar a la cota de instalación de la tubería.

Por último, para la perforación horizontal dirigida no se necesita la construcción de un pozo de ataque, sin embargo, cabe precisar que a mayor diámetro y profundidad las dimensiones del pozo de ataque se incrementan. Aunado a lo anterior, la posible existencia de nivel freático supone un diseño más exigente de dicho pozo, mientras que en la perforación horizontal dirigida el hecho de que no lo requiera presenta una ventaja importante al momento de realizar un cruce subfluvial.

A continuación se enumera el paso a paso para la aplicación de la metodología:

- **Paso 1.** Definición del diámetro de la tubería: lo establece el diseño hidráulico del proyecto.
- **Paso 2.** Definición de la longitud del cruce subfluvial: la determina el trazado final de la red del acueducto, definido por variables tales como la línea piezométrica, la pendiente del trazado y la dinámica fluvial del cuerpo de agua.
- **Paso 3.** Definición de la totalidad de tipos de suelos que hay que atravesar a lo largo del trazado del cruce subfluvial: proviene de los sondeos realizados y representa una suficiente muestra del recorrido.
- **Paso 4.** Utilizando la gráfica correspondiente de cada uno de los tipos de suelo, se procede a ubicar

la metodología adecuada. Se advierte que el método es adecuado solamente si se puede usar a lo largo del trazado. En caso de dificultades con algún estrato, se puede analizar la opción de profundizar el trayecto que pudiere resultar más favorable.

- **Paso 5.** En caso de presentarse dos o más metodologías aplicables se procede a escoger la más adecuada, teniendo en cuenta las tablas de orden de elegibilidad según el efecto del suelo circundante y espacio necesario (tablas 2 y 3).

**Nota:** Para determinar la profundidad mínima de instalación de la tubería, se toma como referencia de fondo del río buscando un estrato que no esté constituido por sedimentos sueltos y un nivel más profundo a la cota de dragado del río. El chequeo que se debe realizar a partir del nivel de referencia corresponde a la verificación por flotación:

$$U = \frac{\pi}{4} D^2 \delta_w$$

**Ecuación 1.** Cálculo de la presión hidrostática de empuje vertical

Fuente: <http://www.hidrojing.com/wp-content/uploads/2014/04/Flotacion-de-Tuberias.pdf>.

Donde:

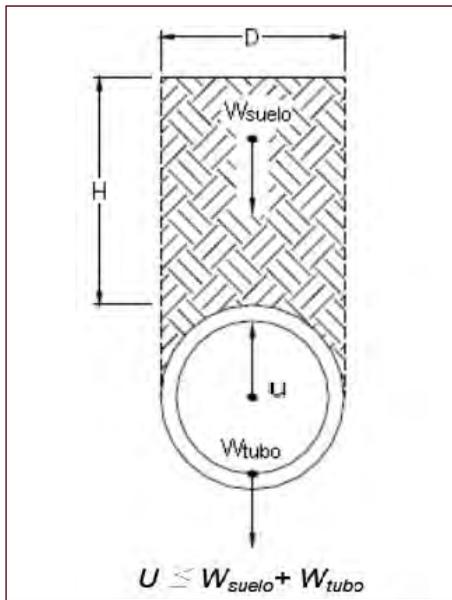
U = empuje vertical por ml de tubo

D= diámetro externo del tubo

dw = peso unitario del agua

La altura mínima de recubrimiento requerido para resistir la flotación se calcula igualando la suma de las fuerzas verticales (figura 3).

Se puede analizar una carga prismática sobre la tubería, pero para efectos de hacer un cálculo conservador no se considera.



**Figura 3.** Fuerzas que afectan la flotación.

Fuente: <http://www.hidrojing.com/wp-content/uploads/2014/04/Flotacion-de-Tuberias.pdf>.

## CONCLUSIONES

En algún momento de la investigación se procuró consolidar ciertos perfiles típicos de suelo para los ríos de Colombia, con el fin de unificar un criterio de selección para cada perfil de suelo típico mediante el establecimiento de una estructura general de trabajo, empezando con un río representativo de Colombia: el río Magdalena. Así, a lo largo de su curso una gran variedad de formaciones geológicas que dificultan determinar estos perfiles y analizarlos en conjunto, por lo que se considera que no es viable determinar perfiles típicos y que cada caso se debe estudiar particularmente.

Dentro del estudio de las tecnologías sin zanja se pueden destacar ventajas que todas tienen en común; si las comparamos con el método tradicional de zanja abierta, todas las estudiadas afectan mínimamente los cauces de los ríos, disminuyen el impacto ecológico y mejoran rendimientos, optimizando tiempos de ejecución y recursos económicos.

Con el propósito de enfocar un problema de cruce subfluvial hacia una técnica específica se desarrollaron una serie de gráficas adaptadas a las condiciones particulares de los ríos; no obstante, en el anexo 1 se presentan las gráficas de aplicabilidad completa, las cuales se pueden consultar para casos distintos de los subfluviales, ya sea autopistas, ciudades, montañas, parques naturales u otros.

Las gráficas se enfocaron en tres restricciones específicas para cruces subfluviales, sin que esto signifique que no se puedan crear restricciones diferentes o que las demás limitantes no sean importantes. Una posible profundización de este trabajo puede consistir en analizar más limitantes o tratar de combinar más variables en otro tipo de gráficas.

Se recomienda fortalecer y desarrollar el conocimiento académico en esas tecnologías, puesto que para algunos proyectos aún no las consideran, con el argumento, hoy en día falso, de que la implementación en el país aún está muy reciente y que el acceso a los equipos solo se obtiene por importación.

Se lograría un avance en la implementación de las tecnologías sin zanja en el país regulando su utilización pues a la fecha no existen normas ni leyes al respecto, por lo que tampoco son postuladas por quienes las requieren.