

ANÁLISIS DE DEPÓSITOS DE TUBERÍAS CON LÍNEAS DE GRADIENTE HIDRÁULICO MEDIDAS CON HERRAMIENTAS EN LÍNEA DE FLOTACIÓN LIBRE

Matthew Kindree, M.Sc.¹; Anouk van Pol, B.Sc.² y John van Pol, Ph.D.³

¹INGU Solutions Inc., correo electrónico (autor correspondiente): matthew@ingu.com

²INGU Solutions Inc., correo electrónico: anouk@ingu.com

³INGU Solutions Inc., correo electrónico: john@ingu.com

RESUMEN

El presente documento muestra la metodología para calcular la línea de gradiente hidráulico a partir de herramientas de inspección en línea de flotación libre y el posterior análisis de depósitos de la línea de gradiente hidráulico. Las herramientas de inspección en línea de flotabilidad neutra miden la presión a lo largo de la tubería en condiciones de funcionamiento normales. El despliegue de varias herramientas con un breve retardo permite distinguir las características localizadas de los cambios en el funcionamiento de la tubería durante el despliegue. Los cambios operativos identificados durante el despliegue se corrigen antes de calcular la línea de gradiente hidráulico utilizando un perfil de elevación de la tubería. La línea de gradiente hidráulico resultante representa la pérdida de carga debida a la fricción a lo largo de la tubería; las ubicaciones con mayor pérdida de carga indican restricciones en la tubería debidas a la acumulación de depósitos. La pendiente de la línea de gradiente hidráulico, las especificaciones de la tubería y el caudal de inspección se utilizan con la ecuación de Hazen-Williams para calcular los niveles de depósitos en varios segmentos a lo largo de la tubería.

INTRODUCCIÓN

Suministrar agua potable limpia y eliminar las aguas residuales de hogares y empresas es imprescindible para garantizar la seguridad y la salud de las comunidades. Se calcula que Estados Unidos utiliza 39 billones de galones de agua al día, que deben transportarse hacia y desde ubicaciones residenciales, comerciales e industriales a través de una amplia red de tuberías (Servicio Geológico de EE.UU., 2015). Según estimaciones, Estados Unidos cuenta con 3.54 millones de kilómetros de tuberías que transportan agua potable (American Water Works Association, 2019) y más de 2.09 millones de kilómetros de tuberías que transportan aguas residuales (Agencia de Protección del Medio Ambiente de EE.UU., 2010) a 16,000 plantas de tratamiento de aguas residuales de propiedad pública (Agencia de Ciberseguridad y Seguridad de las Infraestructuras, 2023). Canadá tiene más de 470,000 kilómetros de tuberías que transportan agua y aguas residuales (Statistics Canada, 2022). Esta infraestructura hidráulica está envejeciendo, ya que la edad promedio de estas tuberías de agua potable y aguas residuales en los Estados Unidos es de 45 años (Tabuchi, 2017) y uno de cada cinco kilómetros de tuberías de agua en Canadá tiene más de 50 años (Statistics Canada, 2022). Resulta fundamental, por tanto,

supervisar las tuberías de agua y aguas residuales para garantizar que se encuentran en condiciones adecuadas y mantener el rendimiento de los sistemas de agua y aguas residuales.

La acumulación de depósitos en una tubería es especialmente preocupante en el caso de las tuberías que transportan aguas residuales. Los depósitos reducen la capacidad de una tubería, pueden provocar la corrosión y el desgaste de la pared de la tubería y pueden causar que se desborden los sistemas sanitarios. En 2004, la EPA determinó que el 48% de los casos de desbordamiento de sistemas de alcantarillado sanitario con causa conocida en Estados Unidos se debían a una obstrucción parcial o total (Agencia de Protección del Medio Ambiente de EE.UU., 2004). Estos desbordamientos suponen un riesgo para la salud pública y contaminan el medio ambiente.

La acumulación de depósitos en una tubería restringe su diámetro efectivo y provoca mayores pérdidas de presión por fricción. Por ello, los operadores de tuberías monitorean el caudal de las mismas y las mediciones de presión disponibles en busca de indicios de una restricción. Sin embargo, estos métodos de monitoreo no indican la ubicación o el tamaño de la restricción presente. Las herramientas de inspección en línea que miden el perfil de presión en toda la longitud de una tubería ofrecen una visión más detallada del rendimiento de una tubería y facilitan la localización y el dimensionamiento de la restricción. Las ubicaciones con pérdidas de presión por fricción más pronunciadas indican la existencia de restricciones en la tubería debidas a la acumulación de depósitos o bolsas de gas atrapado. El cálculo de la línea de gradiente hidráulico (HGL) facilita este análisis teniendo en cuenta los cambios en la presión hidrostática a lo largo de la tubería.

El presente documento describe la metodología utilizada para calcular la HGL a partir de herramientas de inspección en línea de flotación libre y el posterior análisis de la HGL para proporcionar información sobre el nivel de depósitos dentro de una tubería. En primer lugar, la información técnica detalla las relaciones físicas que rigen el flujo a través de una tubería y la definición de una HGL. Luego se demuestra la metodología de cálculo de una HGL, incluyendo características importantes de la herramienta en línea; métodos para identificar y corregir cambios operativos durante la inspección; y el cálculo de una HGL a partir de la presión medida a lo largo de la tubería. Por último, se explica en detalle el análisis de una HGL para determinar los niveles de depósitos dentro de la tubería.

INFORMACIÓN TÉCNICA

Los flujos de tuberías estacionarios e incompresibles se rigen por la ecuación de Bernoulli:

$$\left(\frac{p}{\rho g} + z + \frac{v^2}{2g}\right)_{\text{aguas arriba}} = \left(\frac{p}{\rho g} + z + \frac{v^2}{2g}\right)_{\text{aguas abajo}} + h_{\text{fricción}},$$

donde p es la presión, ρ es la densidad del fluido, g es la aceleración debida a la gravedad, z es la elevación de la tubería, v es la velocidad del fluido y $h_{\text{fricción}}$ es la pérdida de carga debida a la fricción. Esta ecuación puede simplificarse aún más porque la velocidad del fluido es constante a lo largo de segmentos de una tubería sin entradas, salidas o cambios de diámetro importantes. Definiendo la línea de gradiente hidráulico, HGL , como la altura de presión más la elevación de la tubería ($HGL = p/(\rho g) + z$), la ecuación de Bernoulli se simplifica aún más de la siguiente manera:

$$HGL_{\text{aguas arriba}} = HGL_{\text{aguas abajo}} + h_{\text{fricción}}.$$

Así, los cambios en la HGL están directamente relacionados con la pérdida de carga debida a la fricción, $\Delta HGL = h_{\text{fricción}}$.

La pérdida de carga debida a la fricción depende de la geometría de la tubería, del material de la tubería y del caudal a través de la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$h_{\text{fricción}} = f \frac{8}{\pi^2 g} \frac{\Delta x}{D^5} Q^2,$$

donde Δx es la longitud a lo largo de la tubería, D es el diámetro interior de la tubería, Q es el caudal y f es el factor de fricción de Darcy. El factor de fricción de Darcy depende del estado del flujo (turbulento o laminar) y es una función de la densidad y viscosidad del fluido; del diámetro interior de la tubería y de la rugosidad hidráulica de la superficie interior; y del caudal. Estas magnitudes se relacionan tradicionalmente mediante el diagrama de Moody (Moody, 1944) o una de varias ecuaciones complejas, incluyendo la ecuación de Colebrook (Colebrook, 1939):

$$\frac{1}{f^{\frac{1}{2}}} = -2.0 \log \log \left(\frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re f^{\frac{1}{2}}} \right),$$

donde ϵ es la rugosidad hidráulica de la superficie interior de la tubería que tiene en cuenta los diferentes materiales de las tuberías y $Re = \frac{4\rho Q}{\pi\mu D}$ es el número de Reynolds adimensional del flujo donde μ es la viscosidad dinámica del fluido.

Para el agua a temperatura ambiente, existe la relación Hazen-Williams como alternativa tradicional a la ecuación de Darcy-Weisbach. Se trata de una relación empírica más sencilla entre el caudal, el diámetro interior de la tubería y un coeficiente de rugosidad C , que tiene en cuenta la rugosidad hidráulica de los distintos materiales de las tuberías. La relación Hazen-Williams es (Williams y Hazen, 1905):

$$\Delta HGL = h_{\text{fricción}} = \frac{10.67 Q^{1.852}}{C^{1.852} D^{4.8704}} \Delta x.$$

Una acumulación de depósitos restringe el diámetro efectivo de la tubería y aumenta su rugosidad en comparación con una tubería limpia; ambos factores provocan un aumento de la fricción y una disminución más pronunciada de la HGL. Por ello, el análisis de la pendiente de la HGL a un caudal determinado indica el nivel de depósitos en la tubería. La HGL de una tubería puede calcularse a partir de las mediciones de presión de una herramienta de inspección en línea de flotabilidad neutra.

METODOLOGÍA: HERRAMIENTAS DE INSPECCIÓN EN LÍNEA DE FLOTABILIDAD NEUTRA

Los métodos de inspección tradicionales se limitan a las mediciones de presión en un número reducido de ubicaciones a lo largo de la tubería, lo cual no ofrece suficientes detalles del perfil de presión en toda la longitud de la tubería. Las herramientas de inspección en línea tienen la ventaja de registrar las mediciones de presión a lo largo de toda la tubería. Sin embargo, las herramientas

de inspección en línea con pig (mecanismo de limpieza/inspección por raspado) inteligente dependen de la presión de la tubería para propulsar el pig a través de ella y, por lo tanto, no permiten obtener una medición representativa de la presión en condiciones de funcionamiento normales.

Las herramientas de inspección en línea de flotabilidad neutra son ideales para esta aplicación debido a su naturaleza de flotación libre. La característica de flotabilidad neutra de la herramienta significa que la herramienta tiene la misma gravedad específica que el fluido y, por tanto, se mueve con el flujo como si formara parte de él. Esto permite que las herramientas de flotabilidad neutra pasen por encima de cambios de elevación; a través de válvulas y cambios de diámetro; y pasen por ramales cerrados y restricciones mientras se desplazan con el flujo. La facilidad de despliegue y recuperación de la herramienta permite que la inspección se realice en condiciones de funcionamiento normales para obtener una medición representativa de la presión de la tubería.

Las herramientas de flotabilidad neutra utilizadas para el análisis descrito en el presente documento se llaman Pipers®. Se trata de pequeñas esferas multisensor de menos de 3 pulgadas de diámetro. Su peso puede ajustarse para que corresponda a la densidad del fluido de la tubería, a fin de que su flotabilidad sea neutra. La herramienta incorpora una matriz multisensor que incluye una unidad de medición inercial (acelerómetro triaxial y giroscopio), varios magnetómetros triaxiales, un sensor de presión y temperatura y un sensor acústico pasivo. La matriz multisensor permite controlar varios aspectos del estado de la tubería con una sola inspección. Las técnicas avanzadas de procesamiento de datos (Byington, 2023) combinadas con las mediciones multisensor permiten una localización precisa de las mediciones a lo largo de la tubería sin necesidad de utilizar marcadores en la superficie (Kindree, 2022). El operador de la tubería puede desplegar las herramientas en condiciones de funcionamiento normales sin modificar la tubería.

Por lo tanto, estas herramientas de inspección en línea de flotabilidad neutra permiten medir la presión de la tubería con una alta resolución espacial a lo largo de toda la tubería en condiciones de funcionamiento normales. Las mediciones de presión de una inspección se utilizan para calcular la HGL de la tubería y posteriormente se analizan.

METODOLOGÍA: CAMBIOS OPERATIVOS DURANTE LOS DESPLIEGUES

La herramienta de flotación libre en línea mide una combinación de la altura de presión a lo largo de la tubería y cualquier cambio operativo en la misma durante la inspección. Es posible desplegar varias herramientas en la misma tubería con un pequeño intervalo de tiempo entre lanzamientos para distinguir las características de la tubería de los cambios operativos. Las fluctuaciones de presión medidas por ambas herramientas en la misma ubicación indican las características de la tubería, mientras que las fluctuaciones de presión que no se repiten entre los despliegues indican cambios operativos durante la inspección. Las dos filas superiores de la figura 1 muestran la presión en tiempo medida durante una inspección y las dos filas inferiores muestran la presión en distancia. Los dos ciclos de inspección se lanzaron y recibieron con un intervalo de aproximadamente 3 minutos (los tiempos de lanzamiento se indican con líneas verticales verdes y las de recepción con líneas verticales rojas). Los cambios operativos en la presión de la tubería aparecen resaltados en rosa y son medidos al mismo tiempo por ambas herramientas, que se

encuentran en distintos puntos de la tubería en un momento determinado. Por el contrario, los cambios de elevación de la tubería se muestran en amarillo y se miden cuando las herramientas pasan por una ubicación específica, lo que ocurre en un momento diferente para cada herramienta.

Una vez identificados, los cambios operativos durante la inspección pueden corregirse antes de calcular la HGL mediante una de dos técnicas. En la primera técnica, las mediciones auxiliares de presión de la tubería con suficiente resolución temporal se restan de la presión medida por la herramienta en línea. Las dos filas superiores de la figura 2 muestran la presión medida en tiempo a partir de una inspección en línea y la presión auxiliar SCADA medida de la tubería durante la inspección. Los cambios en el funcionamiento de la tubería son medidos al mismo tiempo por las mediciones de presión SCADA y por la herramienta de inspección en línea. En consecuencia, la presión medida por la herramienta de inspección en línea se corrige para tener en cuenta los cambios operativos durante la inspección restando la presión SCADA. La presión operativa corregida resultante se muestra en la fila inferior de la figura 2 y contiene únicamente la altura de presión que se utiliza para calcular la HGL.

Cuando es posible, ambas herramientas se despliegan con un breve intervalo de tiempo entre lanzamientos, de tal manera que ambas se encuentren en la tubería al mismo tiempo. Así, ambas herramientas en línea miden los mismos cambios operativos al mismo tiempo y se puede utilizar un conjunto de mediciones de presión para corregir los cambios operativos en el segundo conjunto de mediciones de presión. Las dos filas superiores de la figura 3 muestran la presión medida en tiempo de dos ciclos de inspección de una tubería. La fila central de la figura 3 también muestra la presión sin tendencia de la primera inspección, en la que se ha eliminado la tendencia decreciente de la presión medida. Los cambios en el funcionamiento de la tubería son medidos por ambas herramientas de inspección en línea al mismo tiempo. Por lo tanto, la presión sin tendencia de la primera inspección se resta de la presión medida en la segunda inspección para corregir los cambios operativos durante la inspección. La presión operativa corregida resultante se muestra en la fila inferior de la figura 3 y contiene únicamente la carga de presión que se utiliza para calcular la HGL.

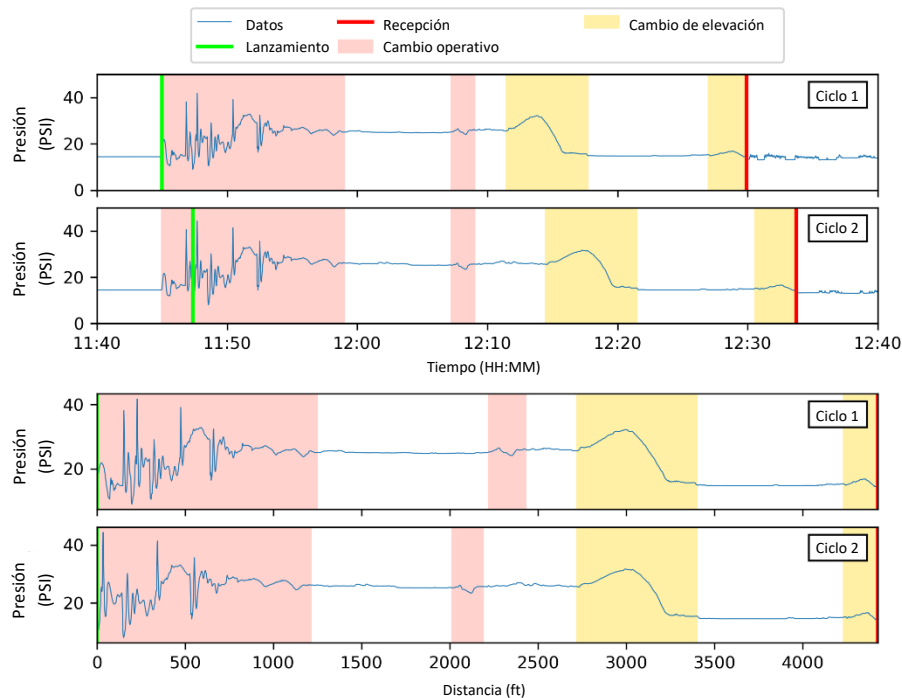


Figura 1: mediciones de presión de dos inspecciones de una tubería con un breve intervalo de tiempo entre los lanzamientos de las herramientas. Las dos filas superiores muestran la presión medida en tiempo y las dos filas inferiores muestran la presión medida en distancia. Los cambios operativos durante la inspección aparecen resaltados en rosa y los cambios de elevación a lo largo de la tubería se muestran en amarillo.

METODOLOGÍA: LA LÍNEA DE GRADIENTE HIDRÁULICO

Una vez que se han corregido los cambios operativos durante el estudio, la HGL puede calcularse sumando la altura de presión a un perfil de elevación de la tubería. Generalmente, los perfiles de elevación se obtienen de los planos conforme a obra o de diseño de la tubería. Sin embargo, si los planos no están disponibles, es posible obtener el perfil de elevación por encima del suelo a través de servicios como Google Earth con sólo un mapa GIS de la tubería y utilizarlo para realizar el cálculo de la HGL (esto supone que la tubería está enterrada a una profundidad constante a lo largo de toda la longitud de la tubería). La figura 4 muestra la presión medida a lo largo de la tubería a partir de una inspección en línea, el perfil de elevación de la tubería y la HGL resultante. Cabe destacar que la presión medida (fila superior de la figura 4) y el perfil de elevación (fila central de la figura 4) tienen una relación inversa (es decir, los aumentos de presión provocados por el descenso de la tubería y los descensos de presión provocados por el ascenso de la tubería).

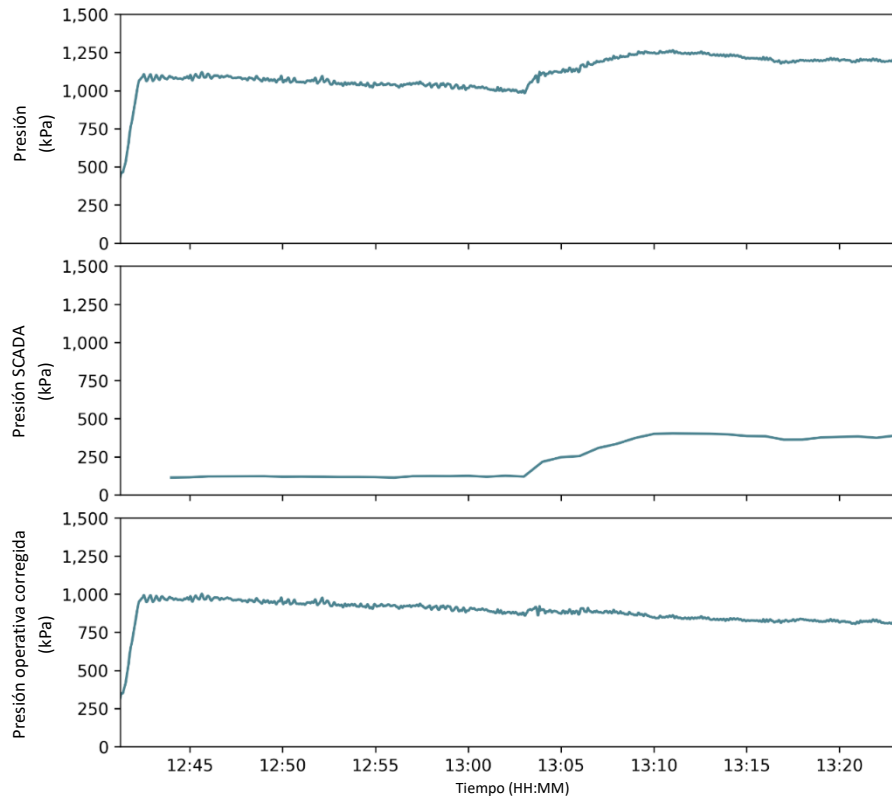


Figura 2: De arriba abajo: presión medida en el tiempo a partir de una inspección en línea, presión SCADA auxiliar medida de la tubería, y la presión medida en la inspección en línea corregida en función de los cambios operativos durante la inspección (es decir, la presión medida menos la presión SCADA).

La HGL resultante permite conocer el rendimiento de la tubería en condiciones normales de funcionamiento. La HGL puede analizarse de varias maneras:

- Puesto que la fricción sólo puede provocar la disminución de la HGL, las ubicaciones en las que ambas herramientas en línea miden un *aumento* de la HGL deben estar causadas por una disminución adicional de la elevación de la tubería no captada de forma precisa por el perfil de elevación. Por el contrario, las ubicaciones en las que ambas herramientas en línea miden una *disminución* de la HGL pueden deberse a un aumento de la fricción (debido a una restricción del flujo) o a un aumento adicional de la elevación de la tubería que el perfil de elevación no capta de manera precisa. Con esta información, se logra una comprensión más precisa de la elevación de la tubería.
- La HGL puede utilizarse como entrada, refinamiento o validación de simulaciones de ingeniería más complejas del sistema de tuberías, con lo que se obtiene un conocimiento más preciso y detallado de la dinámica del sistema de tuberías. La HGL también puede validarse con respecto a cualquier medición auxiliar de la presión de la tubería y proporcionar información sobre lo que las mediciones auxiliares pueden indicar para el resto de la tubería.
- La HGL disminuye en toda la longitud de la tubería debido a la fricción del flujo, y los segmentos más inclinados indican una mayor pérdida de carga por fricción. Así, los segmentos de la HGL con pendientes más pronunciadas pueden indicar una mayor

acumulación de depósitos en relación con el resto de la tubería. La pérdida de carga por fricción está relacionada con el diámetro interior efectivo y la rugosidad hidráulica de la tubería mediante la ecuación de Hazen-Williams (o la ecuación de Darcy-Weisbach). Por lo tanto, las pendientes de la HGL se miden y se utilizan con la ecuación de Hazen-Williams para proporcionar medidas cuantitativas del nivel de depósitos presentes en segmentos a lo largo de la tubería.

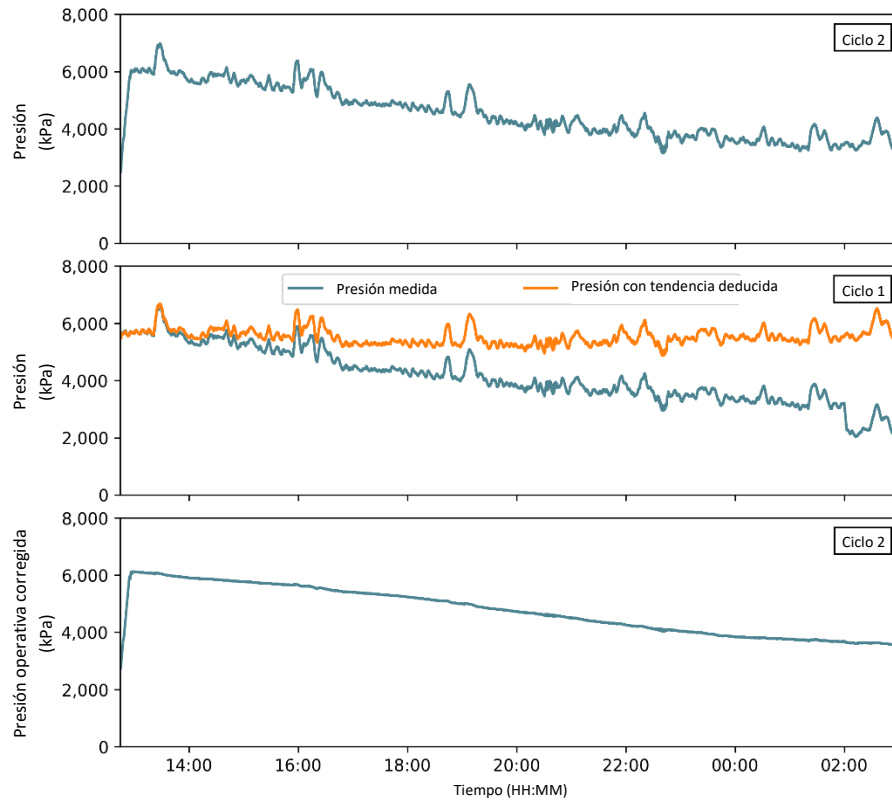


Figura 3: De arriba abajo: la presión medida en la segunda inspección de una tubería, la presión medida y la presión sin tendencia de la primera inspección de una tubería, y la presión medida en la segunda inspección corregida en función de los cambios de funcionamiento durante la inspección (es decir, la presión medida en la segunda inspección menos la presión sin tendencia de la primera inspección).

METODOLOGÍA: ANÁLISIS DE DEPÓSITOS

La HGL se divide en segmentos con pendientes similares y se ajusta una línea a cada segmento con un método de mínimos cuadrados. El método de los mínimos cuadrados reduce el impacto de cualquier pequeña fluctuación restante en la HGL causada por pequeños cambios operativos durante el despliegue o pequeñas discrepancias entre el perfil de elevación proporcionado y la elevación real de la tubería. La figura 5 muestra la HGL de la inspección en línea de una tubería de impulsión DIP de 18 pulgadas representada en la parte inferior de la figura 4 con líneas de mejor ajuste superpuestas. El perfil de elevación sobre el suelo obtenido de Google Earth y el perfil de elevación de la tubería también se incluyen como referencia.

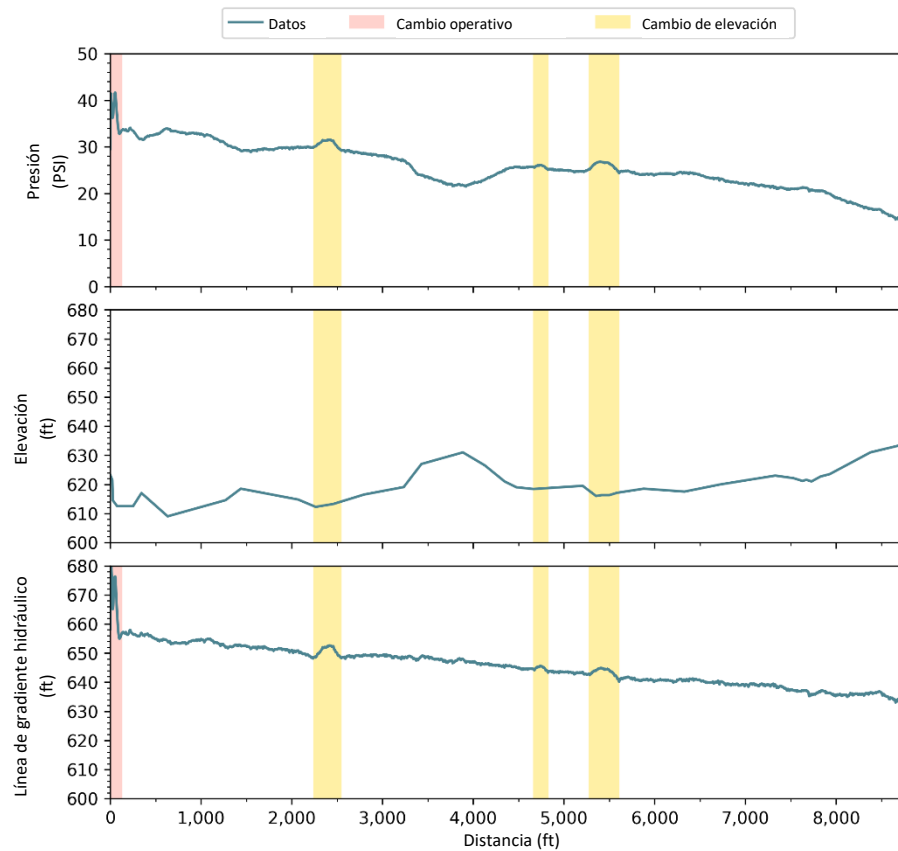


Figura 4: De arriba a abajo: presión medida a lo largo de la tubería, perfil de elevación y línea de gradiente hidráulico (es decir, altura de presión más elevación de la tubería). Los cambios de elevación en la tubería que el perfil de elevación no capta de forma precisa aparecen resaltados en amarillo.

Las pendientes de la HGL, la geometría y el material de la tubería y el caudal de la inspección se utilizan con la ecuación de Hazen-Williams (o la ecuación de Darcy-Weisbach) para proporcionar valores cuantitativos para tres escenarios:

- Las diferencias entre la pendiente de la HGL y la pendiente prevista para una tubería limpia pueden obedecer a discrepancias entre el perfil de elevación y la elevación real de la tubería (es decir, la elevación de la tubería puede tener una pendiente diferente en un segmento de la tubería que la indicada en el perfil de elevación). Se calcula el cambio de elevación adicional máximo en cada segmento de la tubería que provocaría la diferencia observada en la pendiente de la HGL.
- La superficie interior de la tubería puede ser más rugosa debido a la acumulación de depósitos o al envejecimiento de la tubería, lo que provoca una pendiente más pronunciada de la HGL. El coeficiente mínimo de rugosidad que causaría la pendiente más pronunciada de la HGL se calcula utilizando la ecuación de Hazen-Williams. El coeficiente de rugosidad resultante puede compararse con los valores de una tubería envejecida o con los valores de una tubería en buen o mal estado para determinar el estado de la tubería.

- El diámetro efectivo de la tubería puede estar restringido debido a una acumulación de depósitos que provoque una pendiente más pronunciada de la HGL. El diámetro efectivo que causaría la pendiente más pronunciada de la HGL se calcula utilizando la ecuación de Hazen-Williams. El diámetro efectivo resultante se resta del diámetro de una tubería limpia para determinar el nivel de depósitos presentes en cada segmento de la tubería.

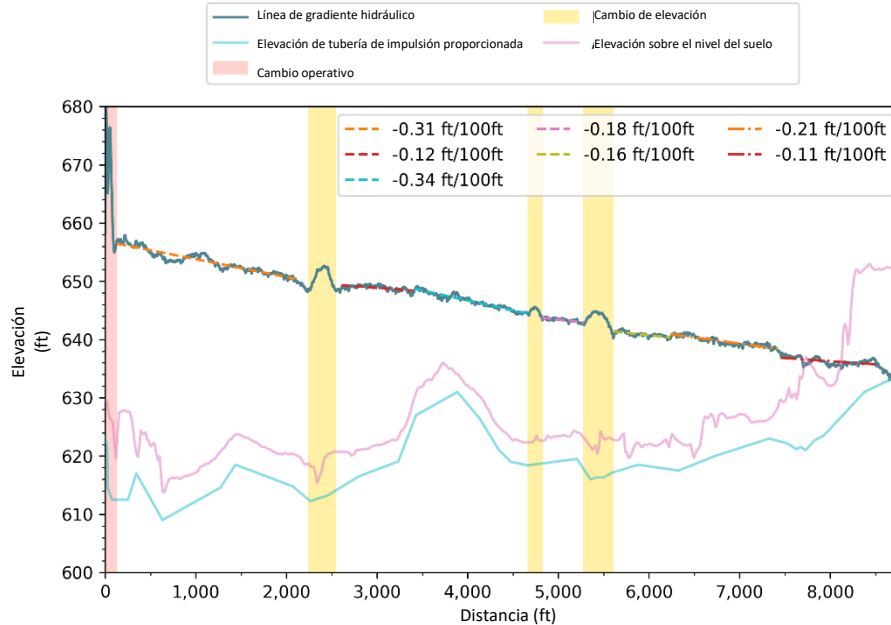


Figura 5: HGL con líneas de mejor ajuste superpuestas, la elevación de la tubería de impulsión proporcionada y la elevación sobre el suelo obtenida de Google Earth. Los cambios de elevación en la tubería que el perfil de elevación no capta de forma precisa aparecen resaltados en amarillo.

En última instancia, los segmentos de la tubería con una pendiente más pronunciada de la HGL probablemente se deban a una combinación de factores, ya que es posible que el perfil de elevación no sea totalmente preciso y que la acumulación de depósitos restrinja el diámetro y aumente la rugosidad hidráulica de la tubería. Los valores máximos de las tres hipótesis se calculan para cada segmento de la tubería. La tabla 1 muestra los resultados de estos cálculos para la HGL mostrada en la figura 5 para una tubería de impulsión DIP de 18 pulgadas.

Tabla 1: pendientes medidas y previstas de la HGL y la restricción de diámetro máximo correspondiente, discrepancia de elevación máxima y coeficiente de rugosidad mínimo para cada segmento de la tubería.

Segmento de la tubería (ft)	Caudal proporcionado (GPM)	Pendiente de HGL medida (ft/100ft)	Pendiente de HGL prevista (ft/100ft)	Restricción de diámetro máx. (in.)	Diferencia de elevación máx (ft)	Coefficiente de rugosidad mín.
130 - 2,100	2.450	-0.31	-0.13	3.0	3.4	89
2,605 - 3,405		-0.12		N/A	-0.1	N/A
3,405 - 4,670		-0.34		3.3	2.6	84
4,820 - 5,285		-0.18		1.1	0.2	119

5,605 - 6,235		-0.16		0.8	0.2	125
6,235 - 7,425		-0.21		1.8	1.0	108
7,450 - 8,530		-0.11		N/A	-0.3	N/A

CONCLUSIÓN

El presente documento ha presentado una metodología para calcular la HGL a partir de herramientas de inspección en línea de flotación libre, junto con el posterior análisis de la HGL para proporcionar información sobre la ubicación y el nivel de depósitos dentro de una tubería. La facilidad de despliegue y recuperación de las herramientas en línea de flotabilidad neutra permite que la inspección se realice en condiciones de funcionamiento normales para obtener una medición representativa de la presión de la tubería. El método de cálculo de la HGL es robusto, de modo que los cambios operativos durante una inspección se identifican y corrigen utilizando diferentes técnicas según la información disponible. La HGL resultante ilustra el rendimiento global de la tubería y puede servir de base para posteriores análisis de ingeniería. El análisis de depósitos de la HGL indica los segmentos de la tubería con una mayor acumulación de depósitos, además de indicar el nivel máximo de restricción de diámetro causado por la acumulación de depósitos. Esta información ayuda a los operadores de tuberías a orientar y planificar los programas de limpieza. Para demostrar el método, se presentaron varios ejemplos de perfiles de presión y HGL de alta resolución.

La facilidad de despliegue permite utilizar este enfoque de forma frecuente para la supervisión continua del estado de las tuberías. La comparación de la HGL de las inspecciones antes y después de un programa de limpieza puede medir la eficacia de la limpieza. Además, la comparación de la HGL de las inspecciones tras largos periodos de funcionamiento normal puede indicar cómo han crecido o disminuido los depósitos en la tubería. Por ello, actualmente se está validando la comparación de la HGL de inspecciones separadas.

REFERENCIAS

- American Water Works Association, "Informe sobre el estado de la industria del agua 2019.", **2019**
- Byington M., van Pol A. y van Pol J., "Identificación de uniones de tuberías mediante redes neuronales", *Revista de tecnología de tuberías* 4, **2023**.
- Colebrook C.F., "Caudal turbulento en tuberías, con especial referencia a la transición entre las leyes de tuberías lisas y rugosas", *R. de Inst. de Ingeniería Civil de Londres*, vol. 11, **1939**.
- Agencia de Ciberseguridad y Seguridad de las Infraestructuras, "Sector de Sistemas de Agua y Saneamiento.", **2023**.
- Kindree M., Campbell S., van Pol A. y van Pol J., "Localización de defectos mediante herramientas de ILI no convencionales de flotación libre sin AGM", *Raspado de tuberías y gestión de integridad*, **2022**.
- Statistics Canada, "Encuesta sobre las principales infraestructuras públicas de Canadá: infraestructuras hidráulicas, 2020", **2022**.
- Tabuchi H., "La guerra de los \$300 mil millones bajo la calle: la lucha por sustituir las tuberías de agua de Estados Unidos", *New York Times*, **2017**.
- Servicio Geológico de EE.UU., "Resumen del consumo estimado de agua en Estados Unidos en 2015.", **2015**.
- Agencia de Protección del Medio Ambiente de EE.UU., Oficina de Investigación y Desarrollo, "Informe al Congreso: Impactos y control de los CSO y SSO", **2004**.

- Agencia de Protección del Medio Ambiente de EE.UU., Oficina de Investigación y Desarrollo, "Estado de la tecnología para la rehabilitación de sistemas de recogida de aguas residuales", **2010**.
- Moody L.F., "Factores de fricción para el flujo en tuberías", Transcripciones de ASME vol. 66, **1944**.
- Williams G. S., Hazen A., "Tablas hidráulicas: muestran la pérdida de carga debido a la fricción del agua que fluye en tuberías, acueductos, alcantarillas, etc. y la descarga sobre presas" (primera ed.), *New York: John Wiley and Sons*, **1905**.