



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"



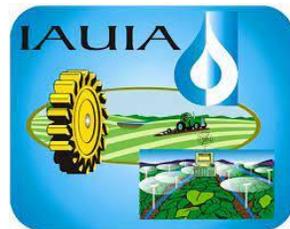
Sexto Congreso Nacional de Riego, Drenaje y Biosistemas

COMEII- 2021 / Hermosillo, Sonora



PÉRDIDA DE ENERGÍA Y REMOCIÓN DE AIRE ATRAPADO POR MEDIOS HIDRÁULICOS EN CONDUCCIONES POR GRAVEDAD CON PENDIENTES DESCENDENTES

Emilio Quintana Molina; Jorge Víctor Prado Hernández; Joaquín Monserrat Viscarri



Universitat de Lleida
Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Agrària

Fecha de presentación del 09 al 11 de junio de 2021





Descripción del fenómeno

Cuando se diseña un sistema entubado de abastecimiento de agua accionado por gravedad (incluso en un sistema de riego presurizado tradicional), se asume que la tubería estará completamente llena de agua, sin embargo, si la instalación se llena de agua por primera vez y no hay remoción completa del aire, la relación entre la carga disponible y el caudal será diferente.

Cuando el caudal que circula en el sistema es bajo, puede suceder que parte de la tubería funcione como un canal y con ello contenga aire en dicha sección, generando pérdidas de carga locales considerables, por lo que es necesario que la tubería se diseñe de tal forma que, el aire que se encuentra en la misma pueda ser evacuado por el propio flujo de agua desde su llenado (medios hidráulicos).



La formación del aire atrapado en las mismas se debe fundamentalmente al diseño y operación inadecuada de los sistemas de tuberías a presión (Corcos, 2003).

En la presente investigación se analizó y midió el efecto que provoca el aire atrapado en conducciones abastecidas por gravedad de diámetros pequeños (12.7, 15.875 y 19.05 mm), se estudió el efecto conjunto de la remoción incipiente de burbujas de aire debido a la turbulencia generada por un salto hidráulico aguas abajo de un cuerpo de aire y la remoción de aire atrapado debido al efecto de un empuje hidrodinámico sobre el mismo, dichos fenómenos fueron representados con modelos matemáticos simples.

Problemática del aire atrapado en conducciones

Problemas destructivos

- Reducción de la sección efectiva de la tubería
- Error en las lecturas de los medidores
- Baja eficiencia de bombas
- Derrames
- Dificultades en la operación de filtrado

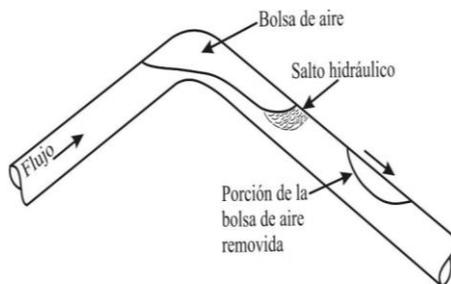


Figura 1. Bolsa de aire que produce reducción de la sección efectiva de la tubería (Martínez, 2016).

Problemas operativos

- Colapso de tuberías por succión
- Rotura de tuberías por sobrepresión
- Retorno de bolsas de aire debido a la fuerza de flotación (blowback)
- Golpe de ariete provocado por la evacuación de aire
- Vibraciones sobre la línea de conducción
- Corrosión
- Cavitación



Figura 2. Colapso por succión.



Figura 3. Rotura por sobrepresión.



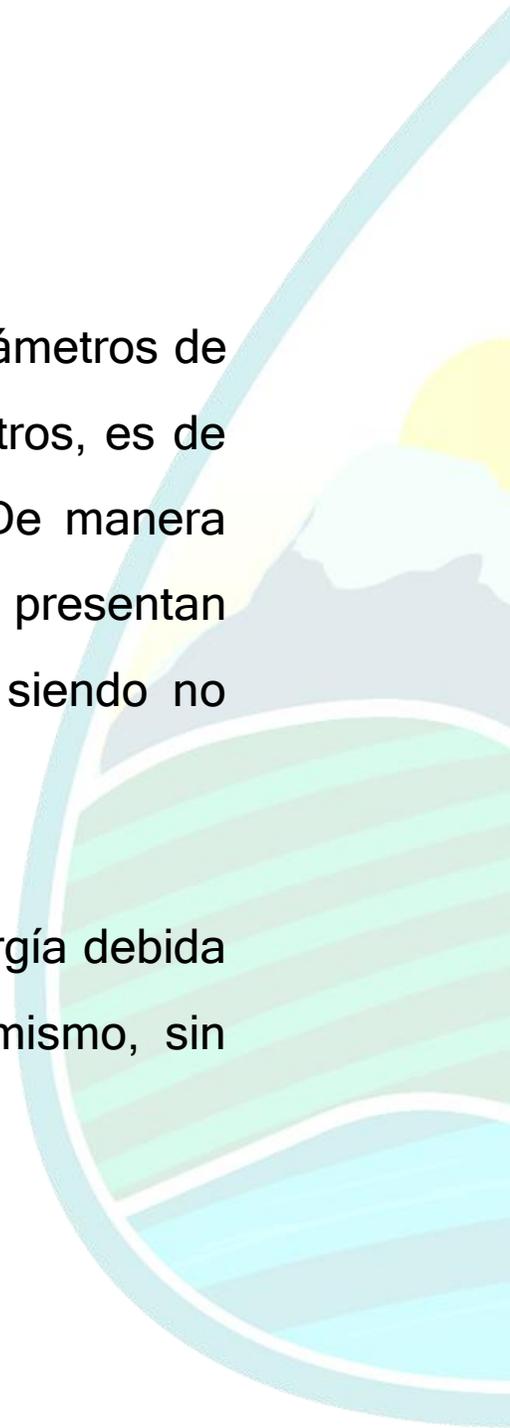
Figura 4. Corrosión.



Justificación

Dada la inexistencia de un modelo matemático genérico que abarque todo tipo de diámetros de conducto, inclinaciones del mismo, volumen de aire a desalojar, entre otros parámetros, es de suma importancia el estudio de la remoción de aire en condiciones específicas. De manera general, los modelos matemáticos reportados en literatura especializada presentan discrepancias entre sí, debido a que fueron estudiados en condiciones distintas, siendo no aplicables en conducciones de diámetros pequeños.

Diversos autores que han estudiado dicho fenómeno, señalan que la pérdida de energía debida al aire atrapado es aproximadamente la longitud de la componente vertical del mismo, sin señalar bajo que condiciones esto es aplicable, en este caso, en diámetros pequeños.



Pérdida de energía generada por aire atrapado y medios de introducción de aire en conductos

Edmunds (1979) y Corcos (2003) señalan que la pérdida de energía generada por el aire atrapado es aproximadamente la longitud de la componente vertical del mismo.

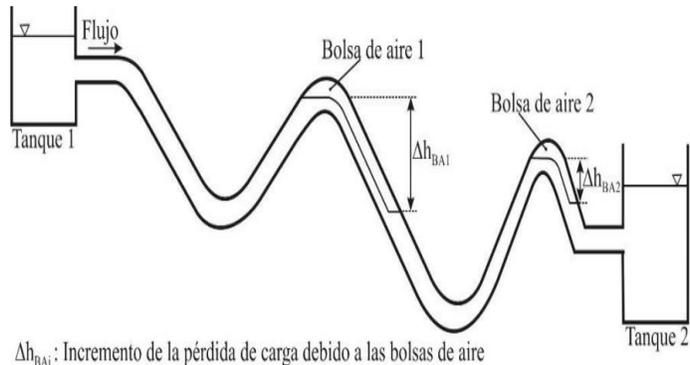


Figura 5. Bolsas de aire en conducciones de agua por gravedad (Martínez, 2016).

Medios de introducción de aire en conductos

- Llenado del sistema ineficiente (objeto de estudio)
- Aire introducido por equipos de bombeo
- Aire introducido por presión de vacío
- Aire disuelto en el agua



Medios para la remoción del aire atrapado en conducciones a presión

Medios Mecánicos

- Venteos
- Hidrantes
- Válvulas convencionales (globo, compuerta, etc.)
- Válvulas de aire (VAEA, VEA, VAC).

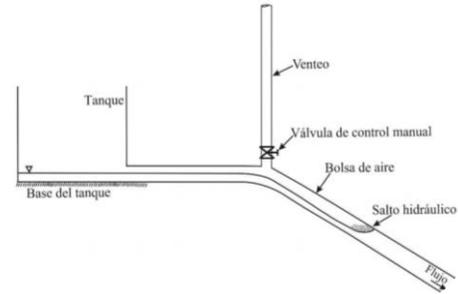


Figura 6. Venteo (Martínez, 2016).



Figura 8. Válvulas convencionales.

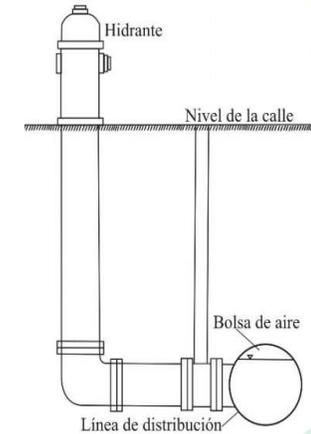


Figura 7. Hidrante (Martínez, 2016).

Medios Hidráulicos

Turbulencia por un Salto hidráulico ahogado	
Empuje hidrodinámico de un volumen de aire	
Esfuerzo cortante en interfase agua - aire	
Flujo pistón	

Figura 9. Remoción hidráulica de aire (Ochoa, 2005).

Remoción por empuje hidrodinámico

- Kalinske & Bliss (1943)

$$\frac{Q^2}{gD^5} = \frac{\text{sen}\theta}{0.71} \quad \theta \rightarrow \text{Suaves} \quad D \rightarrow 0.1 - 0.15\text{m}$$

- Kent (1952)

$$\frac{V}{\sqrt{gD}} = 0.5\sqrt{\text{sen}\theta} + 0.55 \quad \theta \rightarrow 15-60^\circ \quad D \rightarrow 0.1 \quad L/D \geq 1.5$$

- A.R.I. (SF)

$$\frac{V}{\sqrt{gD}} = 0.25\sqrt{\text{sen}\theta} + 0.4 \quad \text{Sin información}$$

- Corcos (2003)

$$(0^\circ) \quad Q = 0.38D^{\frac{5}{2}}g^{\frac{1}{2}} \quad \text{No hay información de diámetros}$$

$$(\text{Tub. inclinadas}) \quad Q = 0.38D^{\frac{5}{2}}g^{\frac{1}{2}}$$

- May et.al. (2018)

$$(25.4\text{mm}) \quad \frac{V}{\sqrt{gD}} = 3.76\sqrt{\tan\theta} + 0.520 \quad \theta \rightarrow 0-30^\circ$$

$$(38.1\text{mm}) \quad \frac{V}{\sqrt{gD}} = 1.72\sqrt{\tan\theta} + 0.588$$

Remoción por turbulencia de un salto hidráulico

- Kalinske & Robertson (1943)

$$\beta = \frac{Q_a}{Q_w} = 0.0066(Fr - 1)^{1.4} \quad \theta \rightarrow 0-30^\circ \quad D \rightarrow 0.1494\text{m}$$

- Kent (1952)

$$\beta = \frac{Q_a}{Q_w} = 0.0212(Fr - 1)^{1.59} \quad \theta \rightarrow 15-60^\circ \quad D \rightarrow 0.1 \text{ m}$$

- Escameia et al. (2005)

$$\beta = \frac{Q_a}{Q_w} = 0.0025(Fr - 1)^{1.8} \quad \theta \geq 16.7^\circ \quad D \rightarrow 0.15 \text{ m}$$

$\frac{V}{\sqrt{gd}} = f(\theta, V_{\text{aire}}) \rightarrow \text{Remoción por empuje hidrodinámico}$
 (Remoción completa de aire atrapado)

$\beta = \frac{Q_a}{Q_w} = f(Fr, \theta) \rightarrow \text{Remoción por turbulencia de un salto hidráulico}$
 (Remoción incipiente de burbujas de aire)

Materiales y Métodos

Módulo experimental

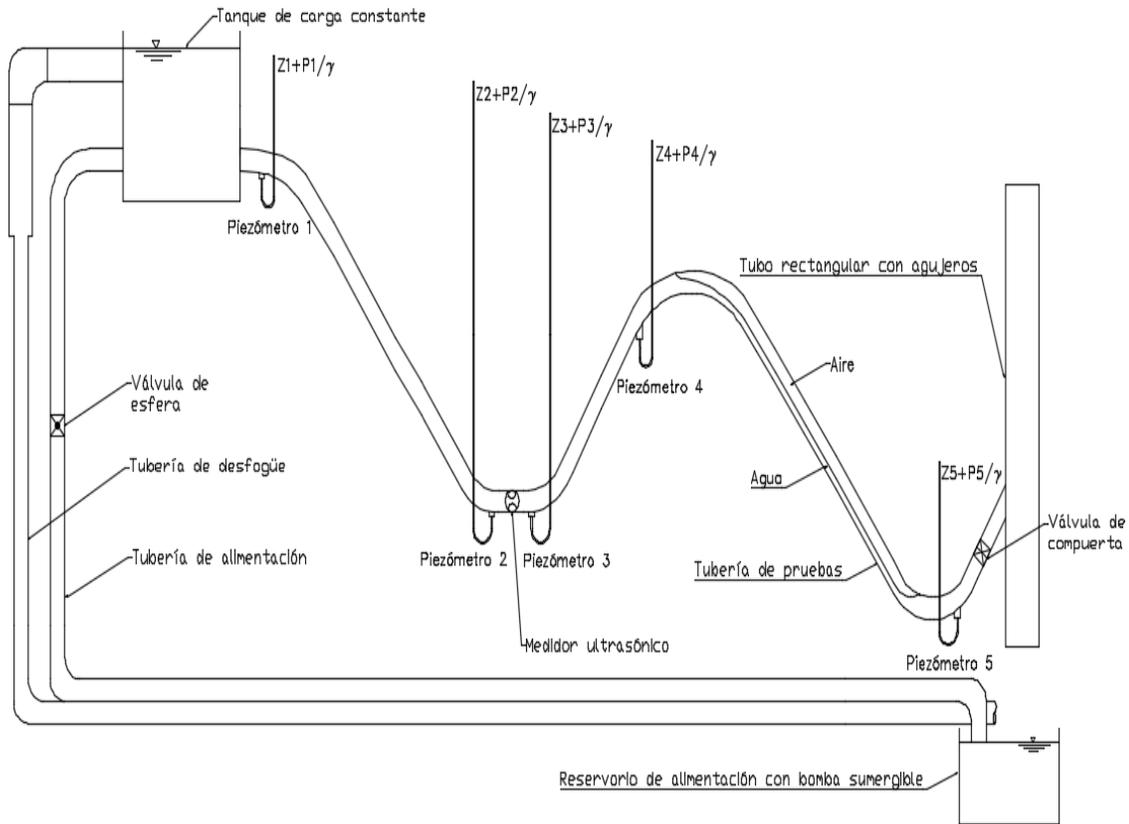


Figura 10. Esquema del módulo experimental (Fuente: Elaboración propia).



Figura 11. Vista general del módulo experimental.

Métodos

Pérdida de energía generada por aire atrapado

Se contrastó la pérdida de energía calculada aplicando la ecuación general de energía entre los extremos del cuerpo de aire atrapado respecto a la pérdida observada equivalente a la longitud vertical del mismo a 15°, 30°, 45° y 60° de inclinación descendente del conducto. Se recopilaron lecturas de los piezómetros para caudales aleatorios y se hicieron ligeras correcciones al valor calculado de la pérdida de energía dada la ubicación de los piezómetros.

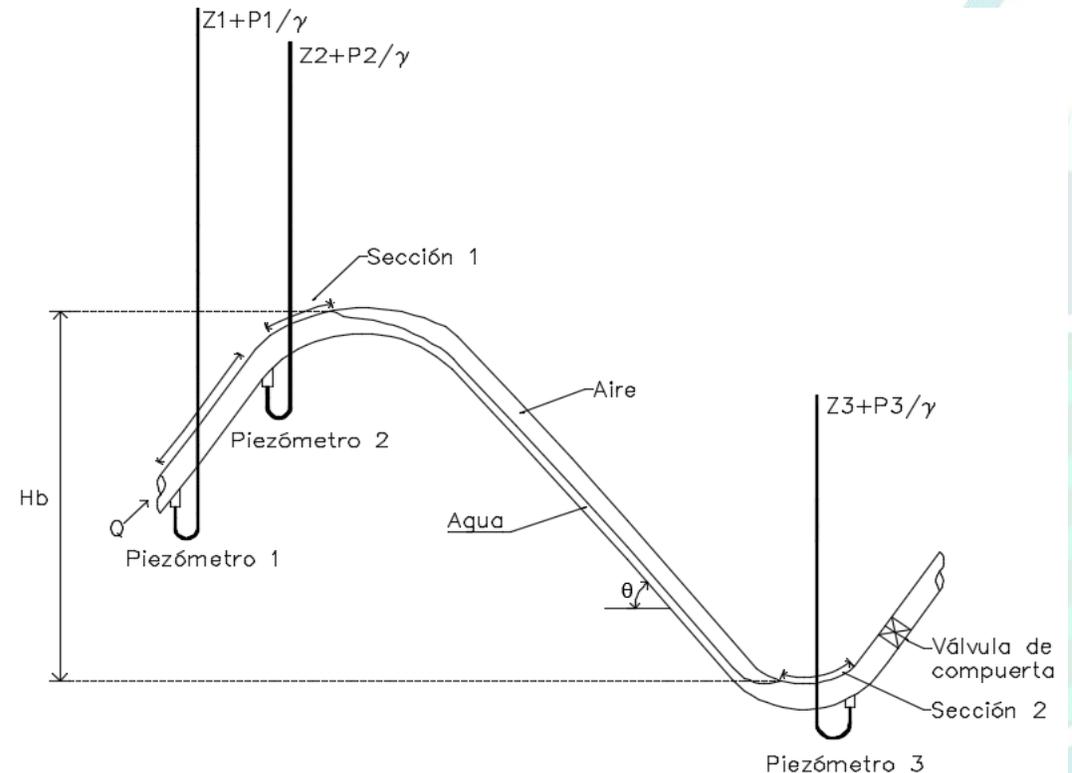


Figura 12. Esquema de pérdida de carga generada por una bolsa de aire atrapada (Fuente: Elaboración propia).

Remoción incipiente de burbujas de aire debido a la turbulencia de un salto hidráulico

Para calcular el caudal de aire removido (Q_a) dados ángulos de inclinación descendente del conducto a 15° , 30° , 45° y 60° , se retomaron las experiencias de Kalinske & Robertson (1943), Kent (1952) y Escarameia *et al.* (2005), mismos que establecen dicho fenómeno depende del caudal de agua (Q_w), la intensidad del salto hidráulico, definido por el número del Froude del conjugado menor del mismo (Fr) y el ángulo de inclinación del conducto (θ), de modo que, se determinó la relación adimensional (β) del caudal de aire respecto al caudal de agua.

$$\beta = \frac{Q_a}{Q_w} = f(Fr, \theta)$$



Figura 13. Salto hidráulico aguas abajo de bolsa de aire en conducto inclinado.

Remoción hidrodinámica de aire atrapado

La remoción hidrodinámica de aire atrapado se abordó a partir las experiencias de Kalinske & Bliss (1943), Kent (1952), Corcos (2003), Escarameia *et al.* (2005), Pothof & Clemens (2010), Pozos *et al.* (2010), May *et al.* (2018), entre otros. Se modeló con la escala de Froude, misma que incluye la velocidad crítica o de remoción de aire, el diámetro de la tubería y la aceleración de la gravedad para 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 30°, 45° y 60° de inclinación descendente, dicha escala comúnmente se relaciona con el ángulo de inclinación descendente del conducto y en algunos casos, con el volumen de aire a remover.

$$\frac{v}{\sqrt{gd}} = f(\theta, V_{aire})$$

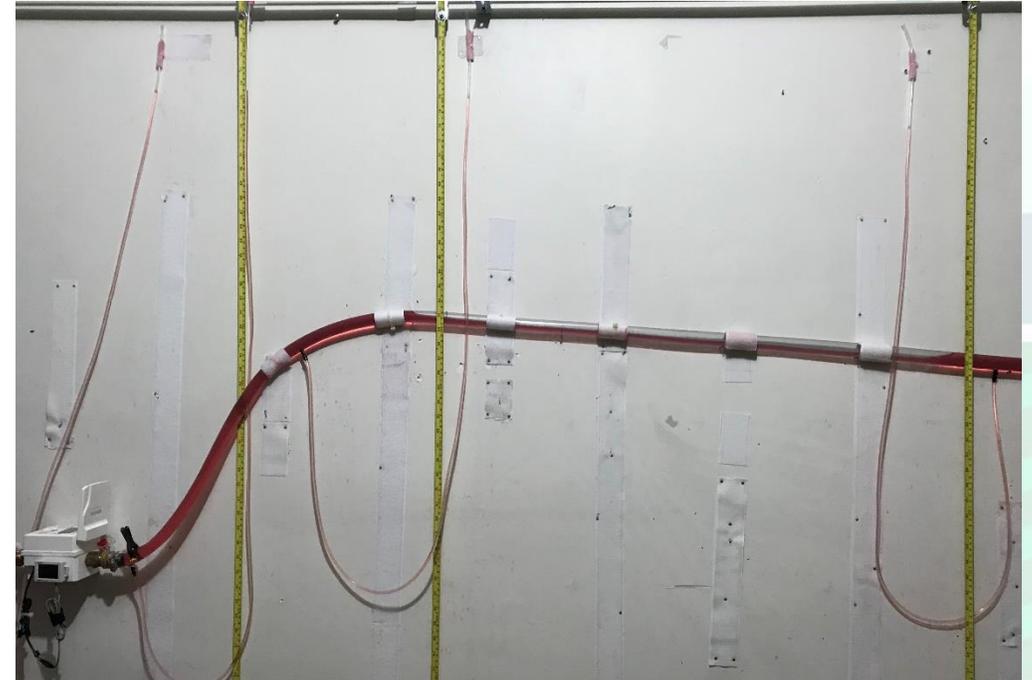


Figura 14. Salto hidráulico aguas abajo de bolsa de aire en conducto inclinado.



Resultados y Discusión

Pérdida de energía generada por aire atrapado

Cuadro 1. Pérdida de energía observada y calculada generada por cuerpos de aire.

Diámetro (mm)	Inclinación (°)	Longitud de la bolsa (m)	Pérdida de energía debida a cuerpo de aire (m)		Diferencia porcentual (%)
			Calculada	Observada	
12.7	15	0.830	0.2057	0.2030	-1.35
	30	1.032	0.4878	0.4950	1.46
	45	0.845	0.4895	0.4860	-0.71
	60	0.910	0.7697	0.7860	2.07
15.875	15	0.930	0.2424	0.2500	3.04
	30	1.070	0.5261	0.5250	-0.21
	45	0.825	0.5446	0.5650	3.62
	60	0.920	0.7235	0.7420	2.50
19.05	15	0.86	0.1870	0.1900	1.73
	30	0.91	0.3820	0.3970	3.72
	45	0.92	0.6120	0.6280	2.63
	60	0.95	0.7620	0.7870	3.18

Remoción incipiente de burbujas de aire debido a la turbulencia de un salto hidráulico

Cuadro 2. Generación y arrastre de burbujas de aire en conducto de 19.05 mm a diferentes inclinaciones descendentes.

Ángulo de inclinación (°)	Caudal de agua de generación y arrastre de burbujas de aire (m ³ /s) Q_{g-a}	Caudal de agua de generación de burbujas de aire sin arrastre de las mismas (m ³ /s) Q_g
15	1.9×10^{-5}	1.3×10^{-5}
30	1.8×10^{-5}	1.2×10^{-5}
45	1.7×10^{-5}	1.0×10^{-5}
60	1.7×10^{-5}	9.0×10^{-6}

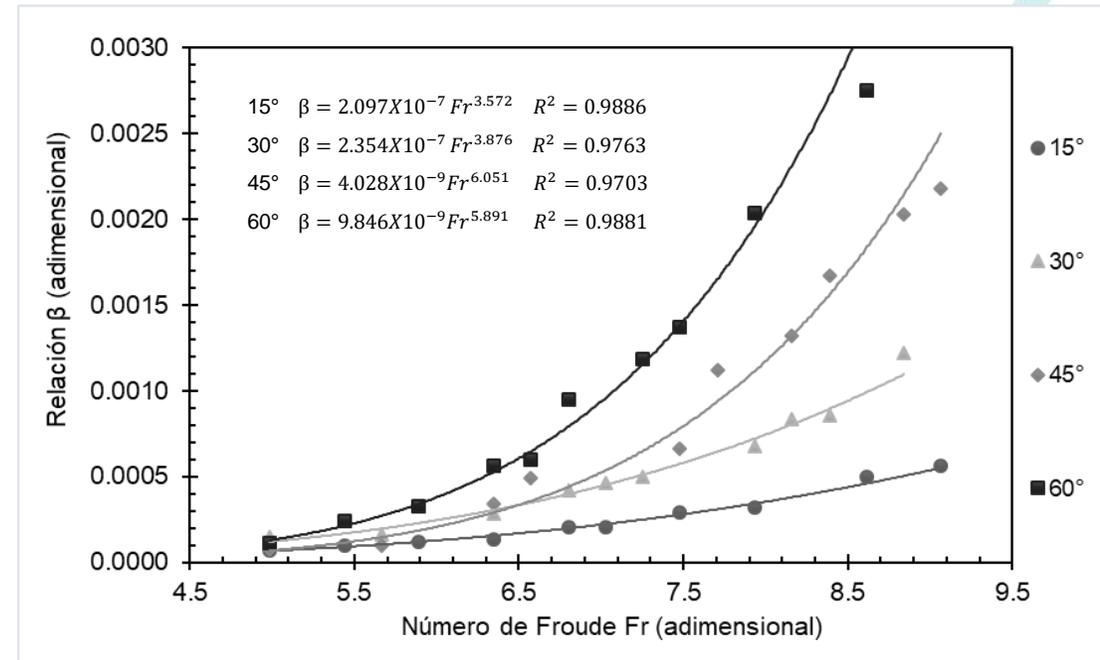


Figura 15. Comparación de relación aire-agua respecto a número de Froude a diferentes ángulos de inclinación descendente en conducto de 19.05 mm.

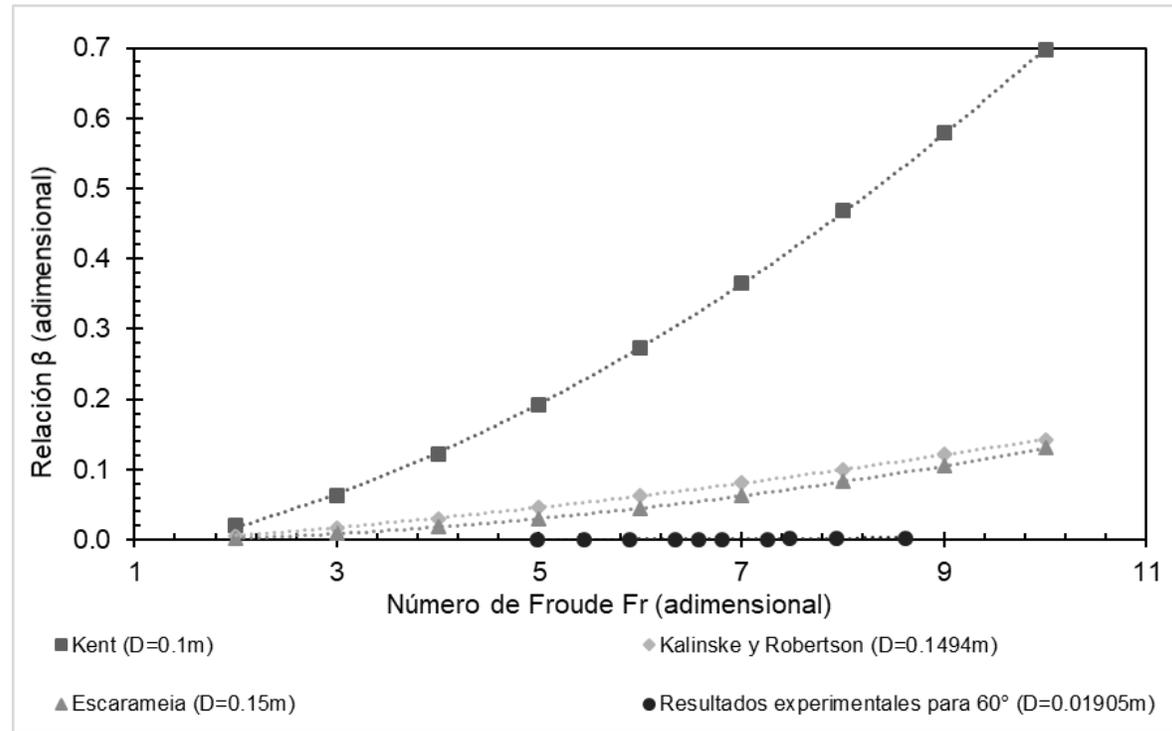


Figura 16. Comparación de modelos de remoción de aire debido al efecto del salto hidráulico obtenidos por diversos autores.





Remoción hidrodinámica de aire atrapado

Cuadro 3. Resultados experimentales de remoción hidrodinámica de aire atrapado en conducciones de 12.7, 15.875 y 19.05 mm de diámetro con inclinaciones descendentes.

Diámetro (mm)	Inclinación θ (°)	$\sqrt{\text{sen}\theta}$ (adim.)	Caudal de remoción promedio (m³/s)	Velocidad de remoción promedio (m/s)	Longitud de bolsa al llenado promedio (m)	v/\sqrt{gd} promedio (adim.)
12.7	0	0.000	0.0000172	0.1358	0.622	0.3847
	5	0.295	0.0000206	0.1626	0.757	0.4607
	10	0.417	0.0000224	0.1768	0.944	0.5010
	15	0.509	0.0000234	0.1847	0.661	0.5233
	20	0.585	0.0000240	0.1895	0.788	0.5368
	30	0.707	0.0000256	0.2021	0.792	0.5725
	45	0.841	0.0000273	0.2155	0.899	0.6106
	60	0.931	0.0000282	0.2226	0.775	0.6307
15.875	0	0.000	0.0000299	0.1511	0.719	0.3828
	5	0.295	0.0000365	0.1844	0.854	0.4673
	10	0.417	0.0000383	0.1935	0.867	0.4903
	15	0.509	0.0000405	0.2046	0.917	0.5185
	20	0.585	0.0000420	0.2127	0.945	0.5390
	30	0.707	0.0000452	0.2284	1.017	0.5787
	45	0.841	0.0000471	0.2380	0.861	0.6030
	60	0.931	0.0000495	0.2501	0.882	0.6337
19.05	0	0.000	0.0000480	0.1684	0.810	0.3896
	5	0.295	0.0000565	0.1982	1.170	0.4585
	10	0.417	0.0000610	0.2140	1.160	0.4951
	15	0.509	0.0000630	0.2210	0.930	0.5113
	20	0.585	0.0000670	0.2333	1.170	0.5397
	30	0.707	0.0000701	0.2459	1.080	0.5689
	45	0.841	0.0000748	0.2624	1.170	0.6071
	60	0.931	0.0000792	0.2779	1.210	0.6428

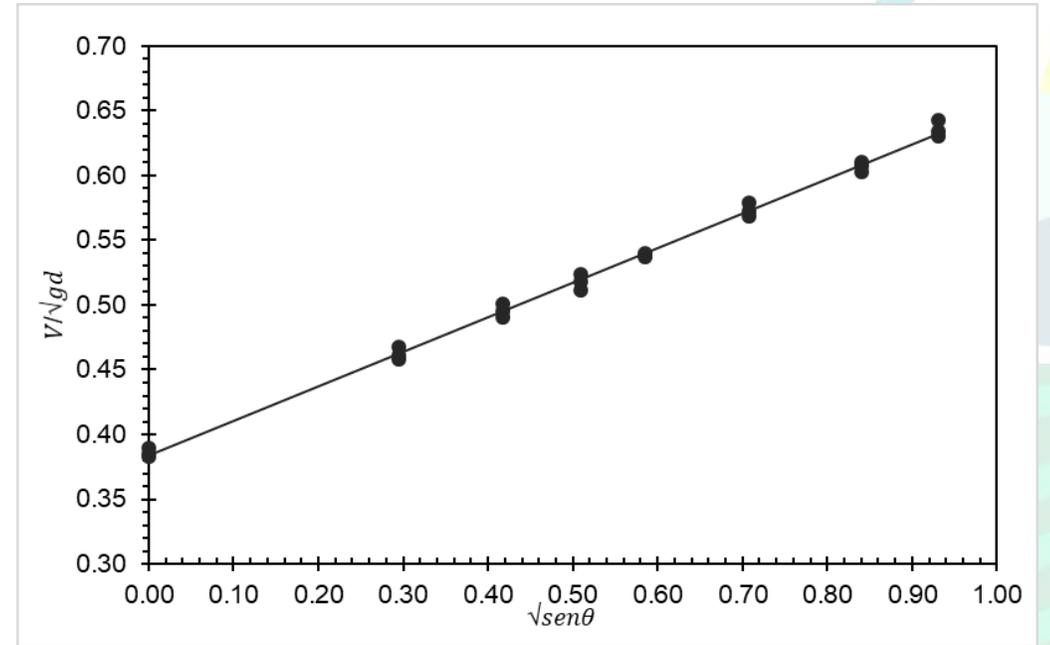


Figura 17. Modelo matemático de remoción hidrodinámica de aire atrapado para conductos de 12.7, 15.875 y 19.05 mm.

$$\frac{v}{\sqrt{gd}} = 0.2671\sqrt{\text{sen}\theta} + 0.3839$$

$$R^2 = 0.9969$$

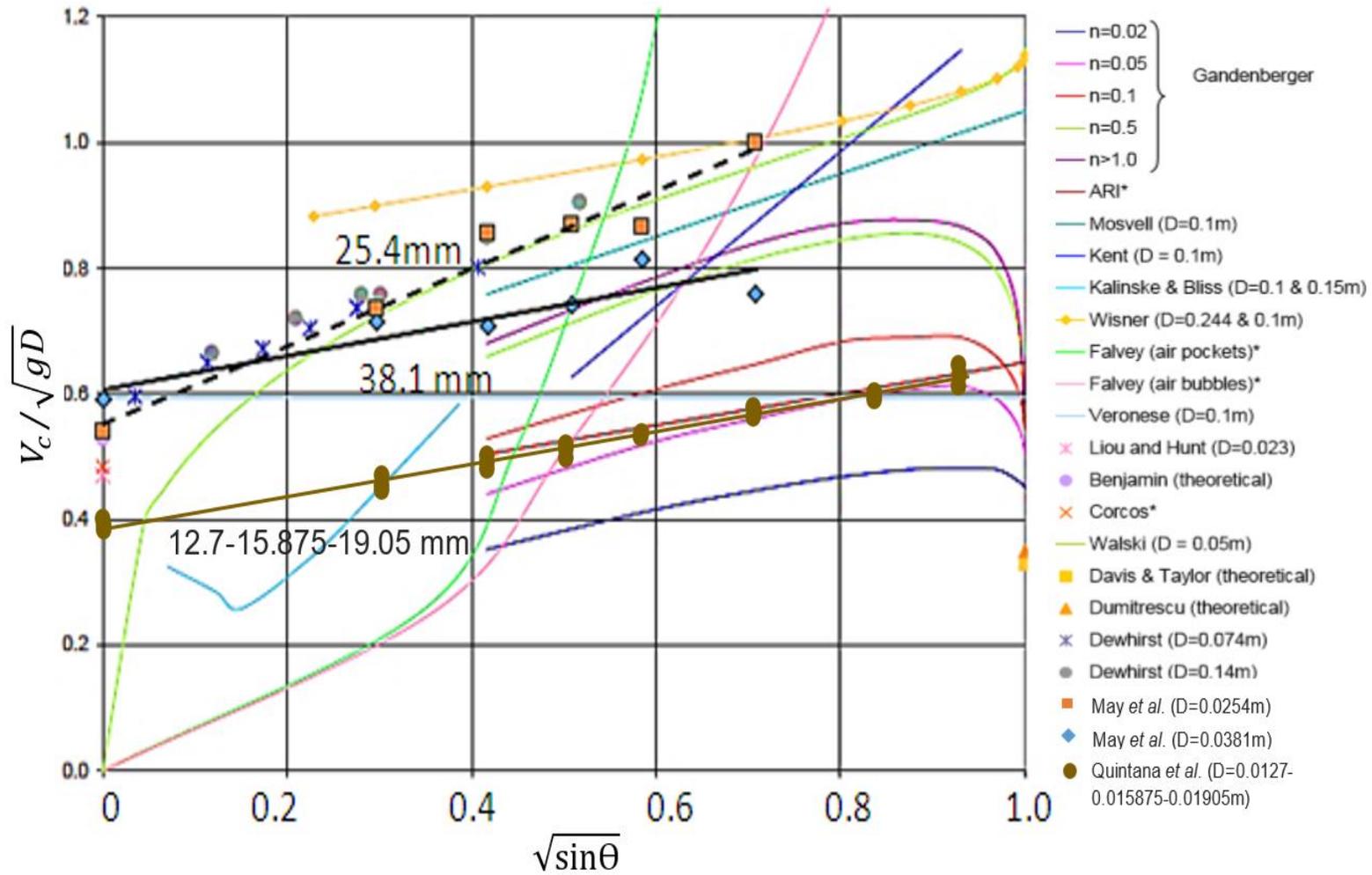


Figura 18. Comparación del modelo obtenido respecto a modelos propuestos por diversos autores (Lauchlan *et al.*, 2005; figura extraída de May *et al.*, 2018).



Conclusiones

- El modelo matemático obtenido resultó simple, dado que presenta una relación lineal, mismo que asocia el parámetro adimensional de remoción de aire en función de la inclinación descendente del conducto en presencia de aire para tres diámetros, 12.7, 15.875 y 19.05 mm.
- De igual manera, el modelo matemático extiende los rangos previamente reportados en literatura, debido a que, el diámetro más pequeño reportado corresponde a 25.4 mm. En el mismo sentido, el modelo propuesto se encuentra en rangos concurrentes con modelos previamente reportados y por debajo de modelos asociados a diámetros mayores que los estudiados en la presente investigación; el modelo es capaz de representar adecuadamente el fenómeno de remoción de aire en ángulos de 0° hasta 60° .
- Se encontró que la remoción incipiente de burbujas de aire debido a la turbulencia del salto hidráulico es muy sensible al ángulo de inclinación del conducto, de modo que, se determinaron modelos para cada ángulo (conducto de 19.05 mm); debido a cuestiones de escala, los modelos definidos se encontraron por debajo de los modelos reportados en literatura. De igual manera, se encontraron caudales de generación y caudales de generación y arrastre de burbujas de aire para cada ángulo de inclinación.
- Se corroboró que, la pérdida de carga ocasionada por un cuerpo de aire es aproximadamente equivalente a la altura del mismo, esto mediante la aplicación de la ecuación general de la energía entre los extremos del cuerpo de aire, presentando diferencias inferiores al 4%.



Bibliografía

- A.R.I. (SF). Recuperado de www.arivalves.com
- Corcos, G. (2003). *Air in water pipes: A manual for designers of spring supplied gravity-driven drinking water rural delivery systems* (Segunda ed.). California, Estados Unidos: Agua para la vida.
- Escarameia, M., Dabrowski, C., Gahan, C., Lauchlan, C. (2005). *Experimental and numerical studies on movement of air in water pipelines* (Report SR661). Oxfordshire, Reino Unido: HR Wallingford.
- Gandenberger, W. (1957). *Design of overland water supply pipelines for economy and operational reliability* (En alemán). Munich, Germany: R. Oldenbourg.
- Kalinske, A. A. & Bliss, P. H. (1943). Removal of air from pipelines by flowing water. *American Society of Civil Engineering*, 13(10), 480-482.
- Kalinske, A. A. & Robertson, J. M. (1943). Closed Conduit Flow. *American Society of Civil Engineering*, 108(1), 1435-1447.
- Kent, J. C. (1952). *The entrainment of air by water flowing in circular conduits with downgrade slopes* (tesis doctoral). University of California, Berkeley, USA.
- Kokal, S. L. & Stanislav, J. F. (1989). An experimental study of two- phase flow in slightly inclined pipes. Flow patterns. *Chemical Engineering Science*, 44(3), 665-679.
- Lauchlan, C. S., Escarameia, M., May, R. W. P., Burrows, R., Gahan, C. (2005). *Air in pipelines; a literature review* (Report 649). Oxfordshire, Reino Unido: HR Wallingford.
- May, D., Allen, J., Nelson, D. (2018). Hydraulic investigation of air in small diameter pipes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 7(3), 51-57.
- Pothof, I. W. M. & Clemens F. H. L. R. (2010). On elongated air pockets in downward sloping pipes. *Journal of Hydraulic Research*, 48(4), 499-503.
- Pozos, O., González, C.A., Giesecke, J., Marx, W., Rodal, E.A. (2010). Air entrapped in gravity pipeline systems. *Journal of Hydraulic Research*, 48(3), 338-347.
- Quintana, E. (2020). *Modelo matemático para la evacuación del aire durante el llenado de tuberías abastecidas por gravedad* (tesis de grado). Universidad Autónoma Chapingo, México.
- Wisner, P.E., Mohsen, F.N., Kouwen, N. (1975). Removal of air from water lines by hydraulic means. *Journal of the Hydraulics Division ASCE*, 101(2), 243-257.



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"



Sexto Congreso Nacional de Riego, Drenaje y Biosistemas

COMEII- 2021 / Hermosillo, Sonora



¡GRACIAS!

Emilio Quintana Molina
Investigador Independiente, México

✉ emilioquintanam@gmail.com

Jorge Víctor Prado Hernández
Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del
Agua, Universidad Autónoma Chapingo, México

✉ jpradoh@chapingo.mx

Joaquín Monserrat Viscarri
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria,
Universidad de Lleida, España

✉ joaquim.monserrat@udl.cat

