



ESTUDIO NUMÉRICO DE LA FORMACIÓN DE GOTAS EN JUNTURAS T

Mansilla, Ramiro Andrés ^{1,2*}; Escobar Quiroz, Juan Felipe ³; Freire Caporale, Daniel ⁴; Gomba, Juan Manuel ^{1,2}; Perazzo, Carlos Alberto ^{3,5}

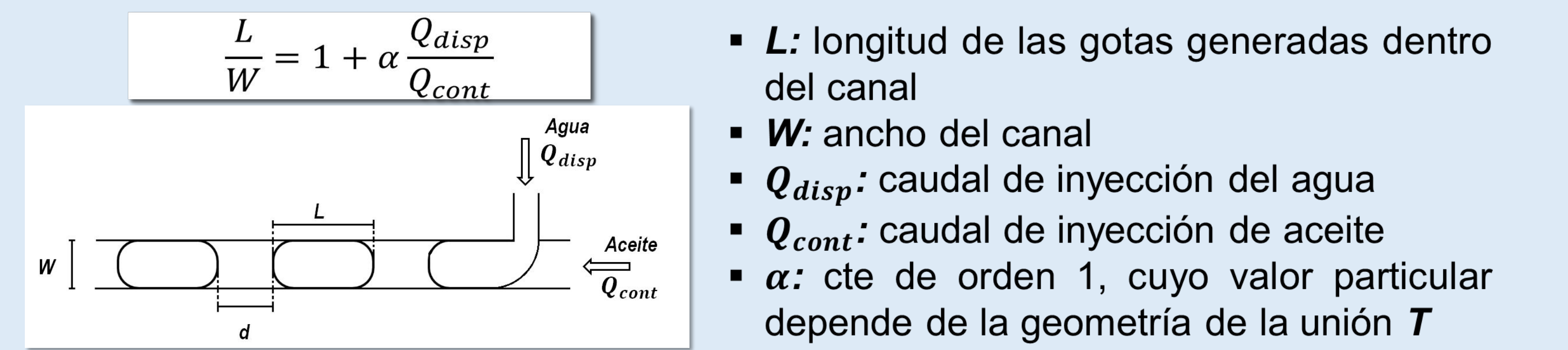
¹ Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA), FCEX, Instituto de Física Arroyo Seco IFAS, Pinto 399, 7000 Tandil, Buenos Aires, Argentina
² CIFICEN (UNCPBA-CICPBA-CONICET), Pinto 399, 7000 Tandil, Buenos Aires, Argentina
³ IMETTyB, CONICET-Universidad Favaloro, Solís 453, C1078AAI, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina
⁴ Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Iguá 4225, 11500, Montevideo, Uruguay
⁵ Facultad de Ingeniería y Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Favaloro, Sarmiento 1853, C1198AAG, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

*E-mail: ramansilla@ifas.exa.unicen.edu.ar

Analizamos numéricamente el flujo y generación de gotas dentro de junturas T. Dos fluidos distintos e inmiscibles se inyectan por canales perpendiculares de la juntura T. Bajo ciertas condiciones, la interfase que separa los líquidos se desestabiliza en la región donde ambos fluidos confluyen. Uno de los fluidos, denominado “fase discreta”, se rompe en gotas de similar tamaño y equidistantes, mientras que el otro se comporta como la “fase continua” que transporta dichas gotas. Caracterizamos la longitud típica L de las gotas y la distancia d que las separa en función de la razón de caudales de inyección. Realizamos una exploración paramétrica sobre las magnitudes físicas relevantes (el ángulo de contacto y la tensión superficial) y, finalmente, comparamos estos resultados numéricos con datos experimentales.

Generación de gotas

La microfluídica estudia el flujo de pequeñas cantidades de líquidos en microcanales, con aplicaciones en química, biología y medicina. Existe un creciente interés en la formación controlada de gotas y burbujas, donde la unión **T** es una de las geometrías sencillas más empleadas. Se ha determinado una ley de escala simple que relaciona la longitud L de las gotas como [1,2]



Simulaciones numéricas

Para simular la generación de gotas por inyección de agua en una corriente continua de aceite en un microcanal de geometría de unión T, modelamos el flujo resolviendo de forma acoplada las ecuaciones de **Navier-Stokes** para flujos incompresibles y de **Level Set** con las C.I. y C.C. correspondientes. Las ecs. resueltas para flujos incompresibles son:

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mathbf{K}] + \mathbf{F}_\sigma \quad \mathbf{K} = \mu(\nabla\mathbf{u} + \nabla\mathbf{u}^T) \quad \rho\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

C.I.: $\mathbf{u}|_{t=0} = 0, \mathbf{p}|_{t=0} = 0$ C.C.: Inlet1 = Q_{cont} Outlet = $P_0 = 0$
Inlet2 = Q_{disp} No Slip

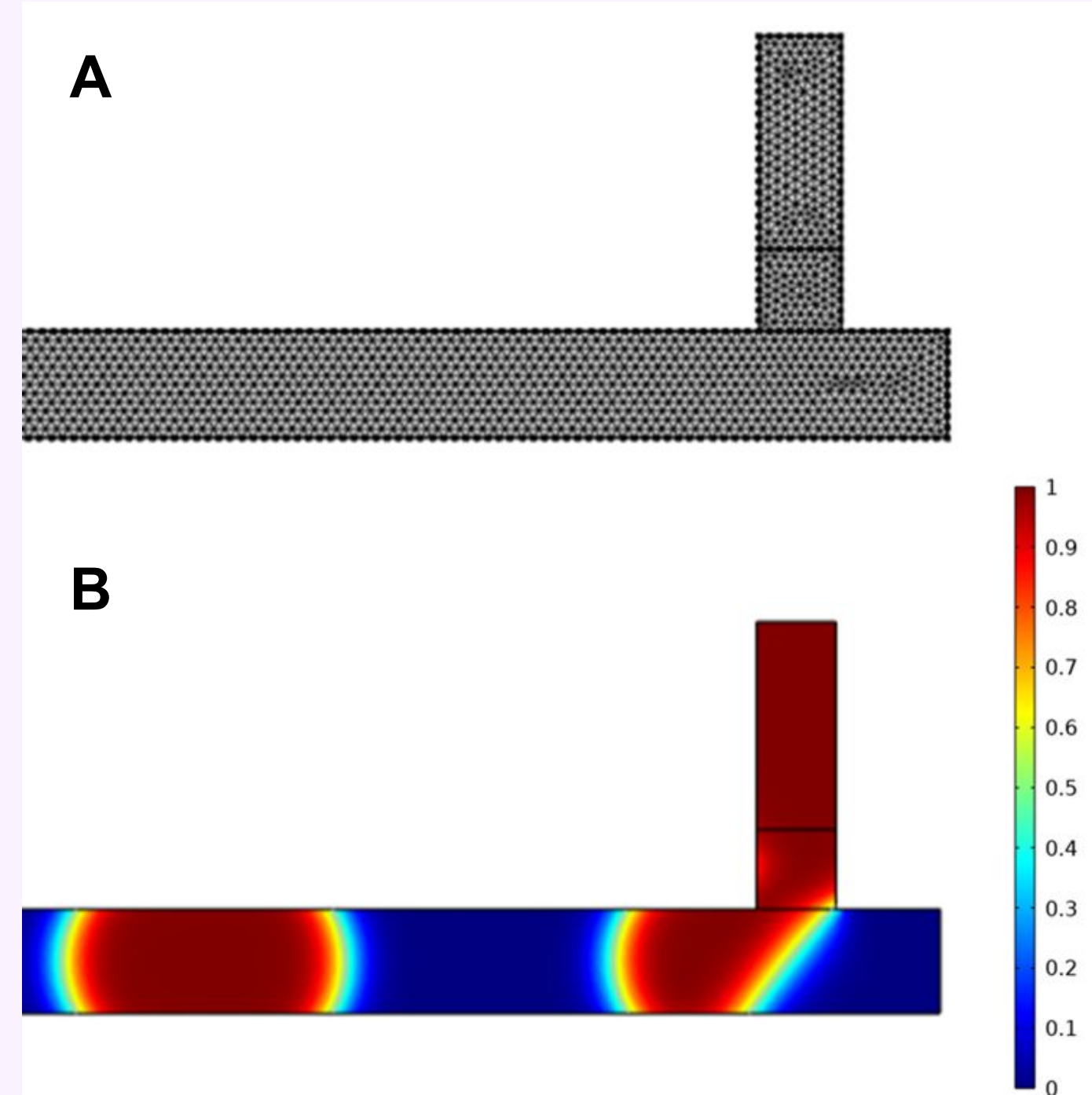
y la ecuación **Level Set** es:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \phi = \gamma \nabla \cdot \left(\varepsilon_{ls} \nabla \phi - \phi(1 - \phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right)$$

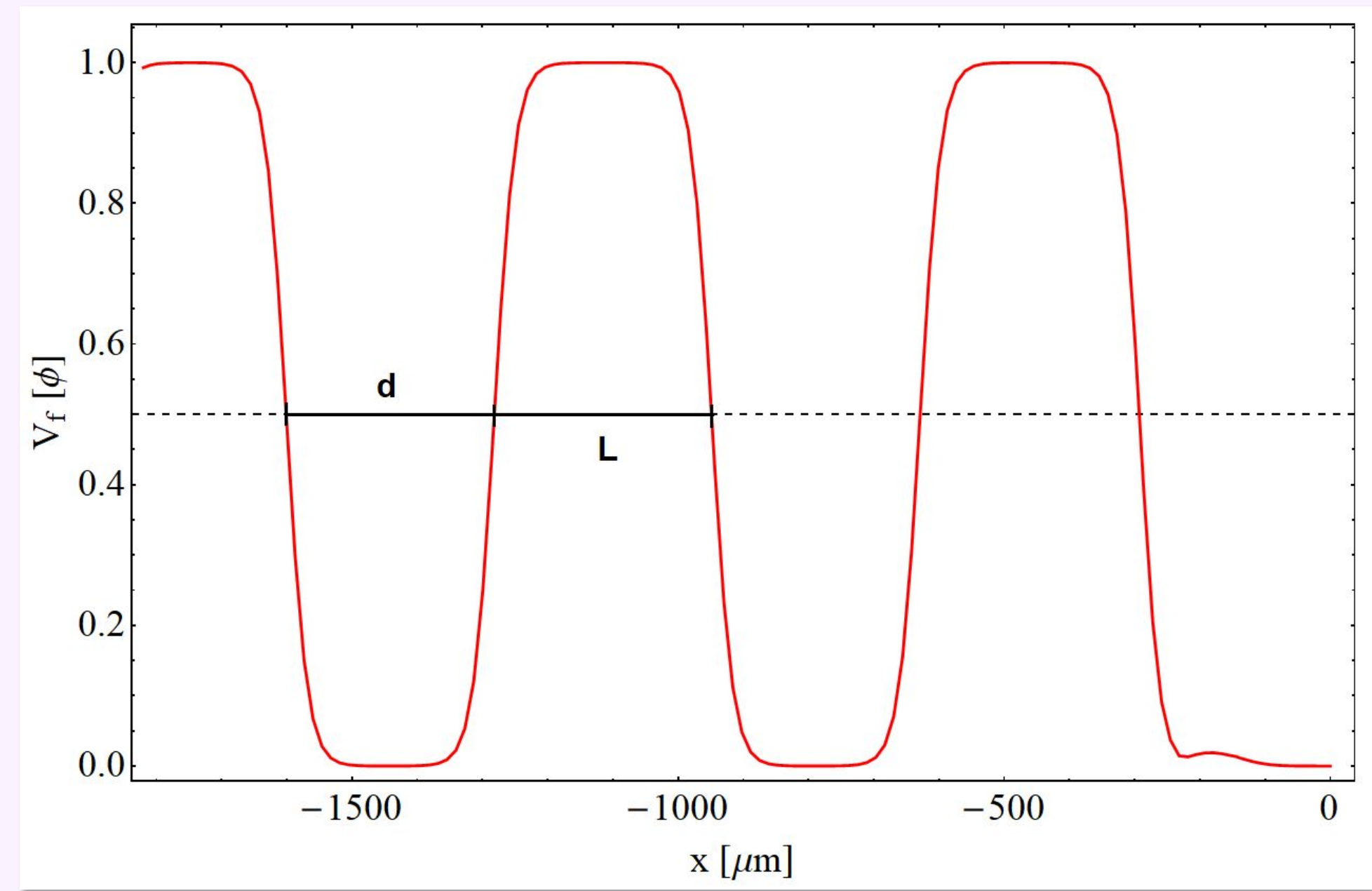
Donde $\phi \in [0,1]$ (C.I.: $\phi = 1$ agua, $\phi = 0$ aceite, C.C.: Inlet 1 = Aceite ($\phi = 0$), Inlet 2 = Agua ($\phi = 1$) y la interfaz $\phi \approx 0.5$. El término de la izquierda representa el transporte convectivo de la interfaz y el de la derecha evita que la interfaz se difumine manteniéndola con un grosor controlado y una forma suave.

Metodología

- Llevamos a cabo la exploración paramétrica del problema para valores del ángulo de contacto $\theta = 121^\circ, 135^\circ$ y 148° y de la tensión interfacial aceite / agua $\sigma = 31.5, 35$ y $38.5 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ para distintos caudales.
- Evaluamos el efecto de estas variables sobre d y L .
- Comparamos los resultados numéricos para $\theta = 135^\circ$ y $\sigma = 35 \text{ mN/m}$ con los experimentales

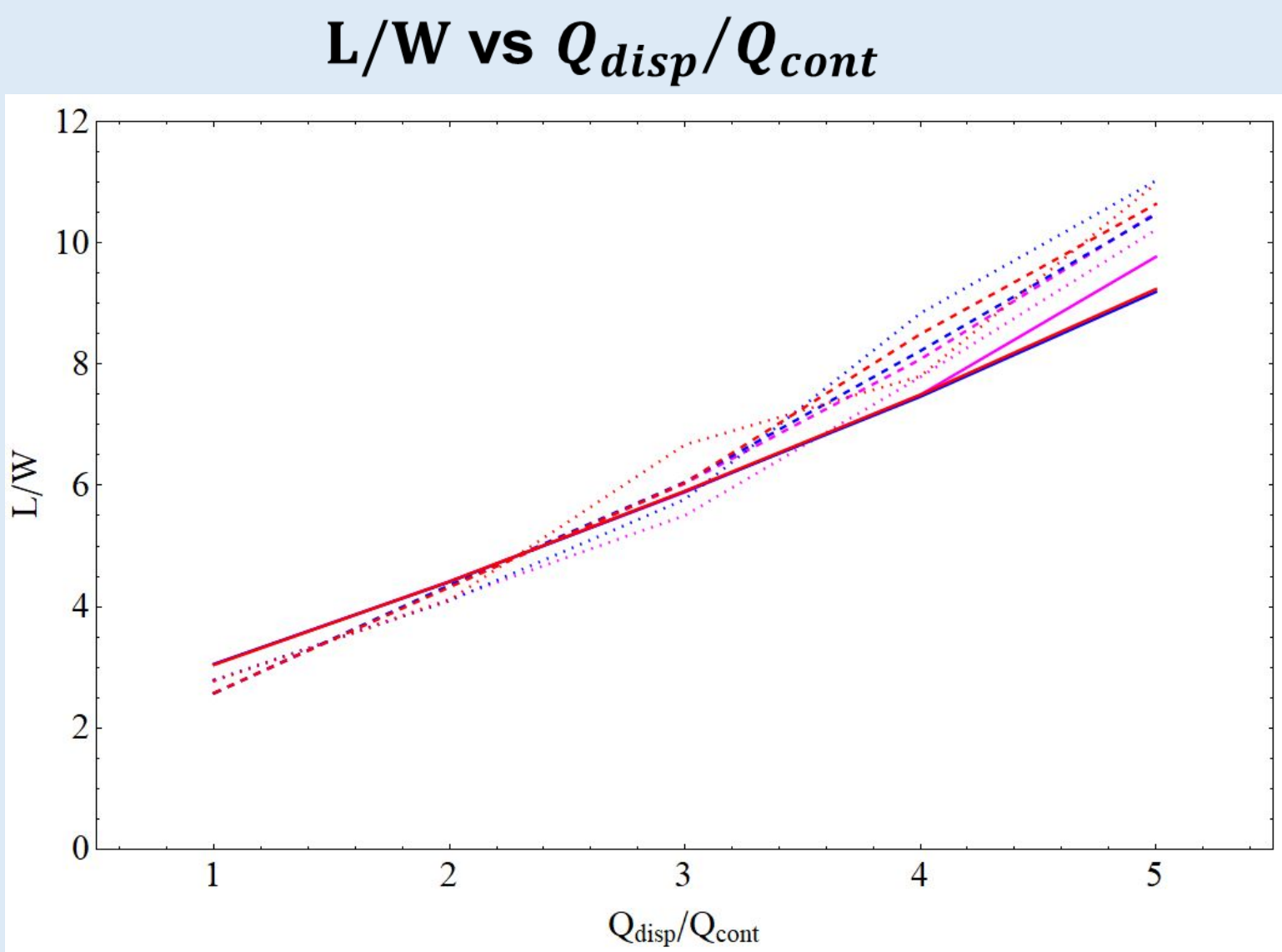
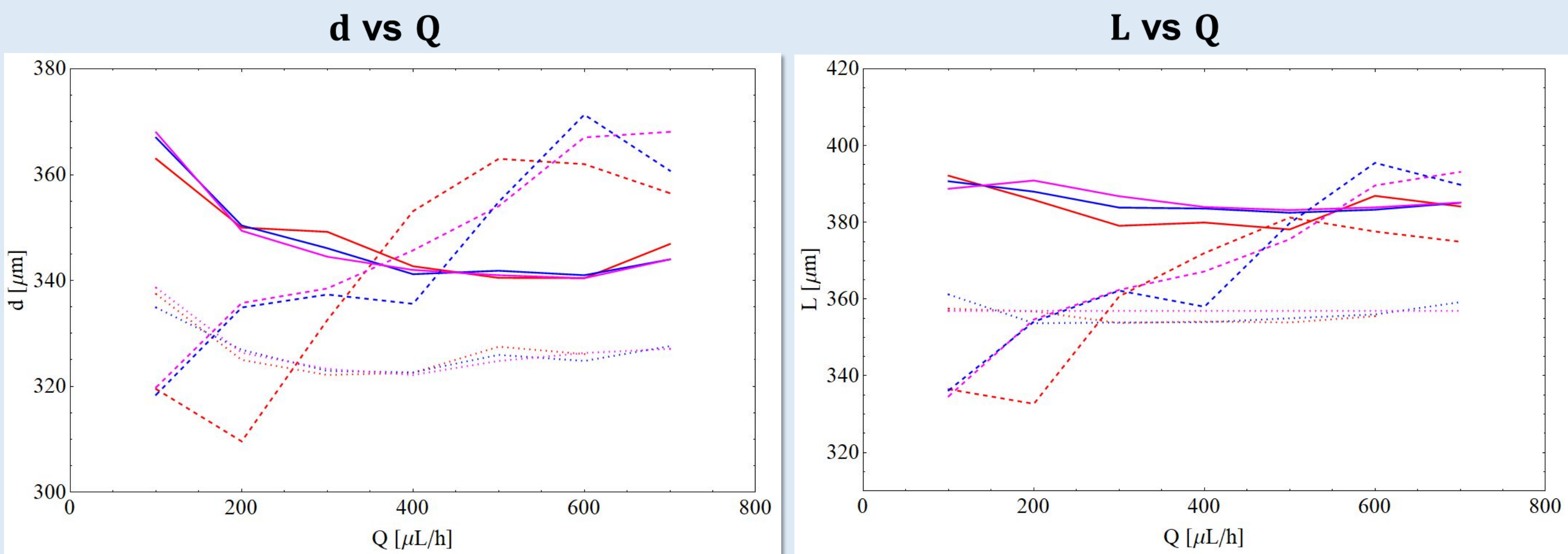


A) Mallado del microcanal. B) Distribución superficial de la fracción volumétrica de agua $V_f(\phi)$



A la izquierda, la figura muestra cómo obtuvimos los valores de d (distancia entre gotas) y L (longitud de la gota) a partir del gráfico de la variación de la fracción volumétrica de fluido $V_f(\phi)$ en función de la longitud del canal en un corte longitudinal del mismo en la interfaz agua-aceite, donde $\phi \approx 0.5$.

Resultados numéricos



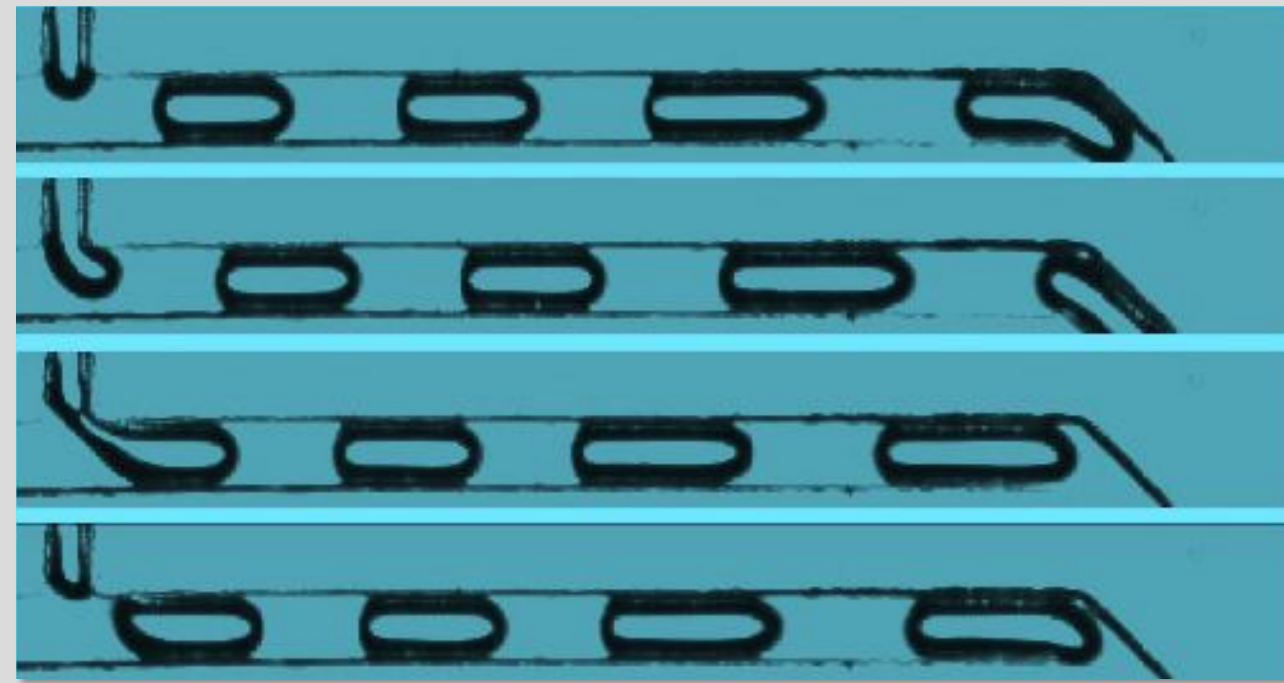
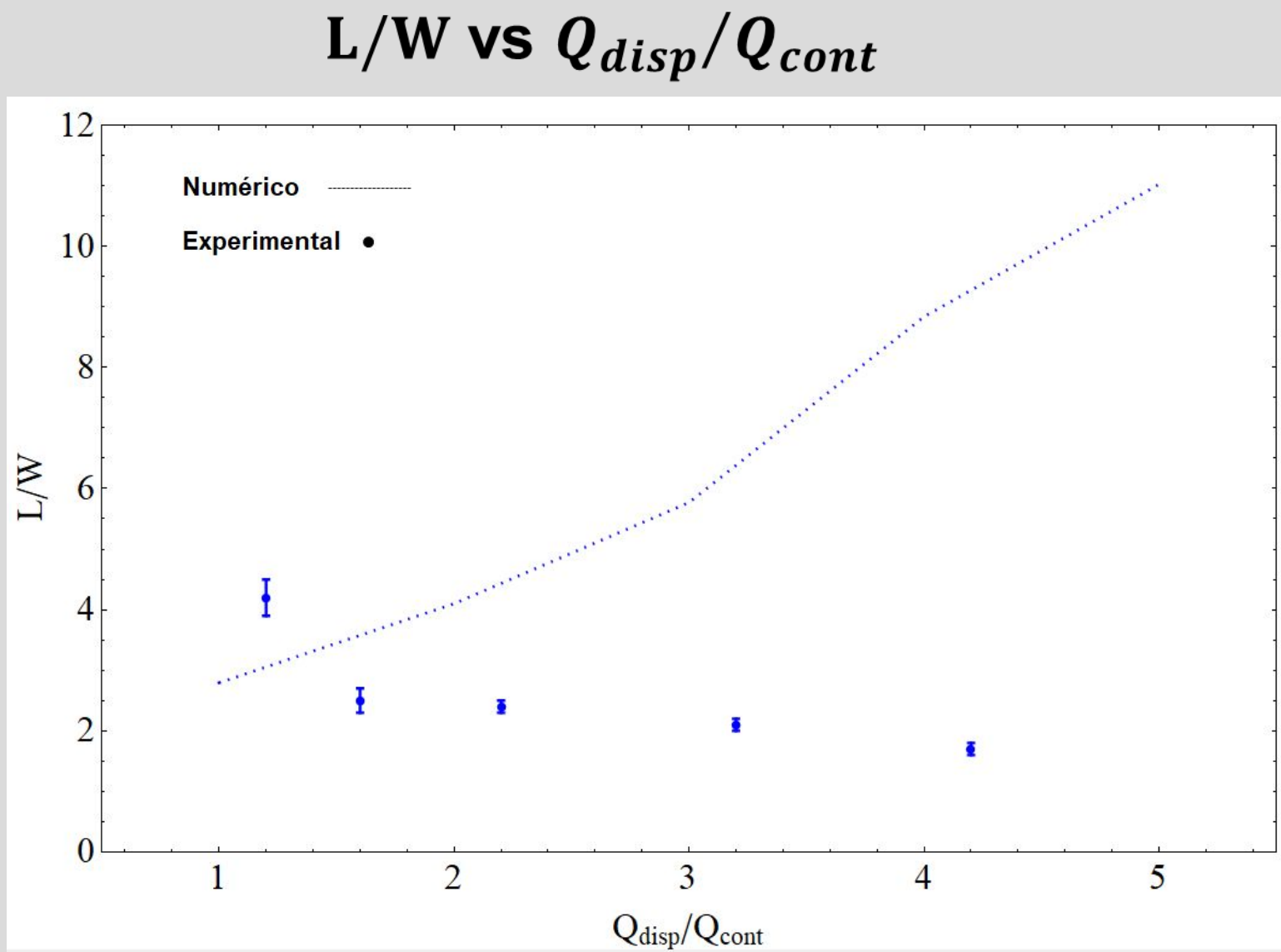
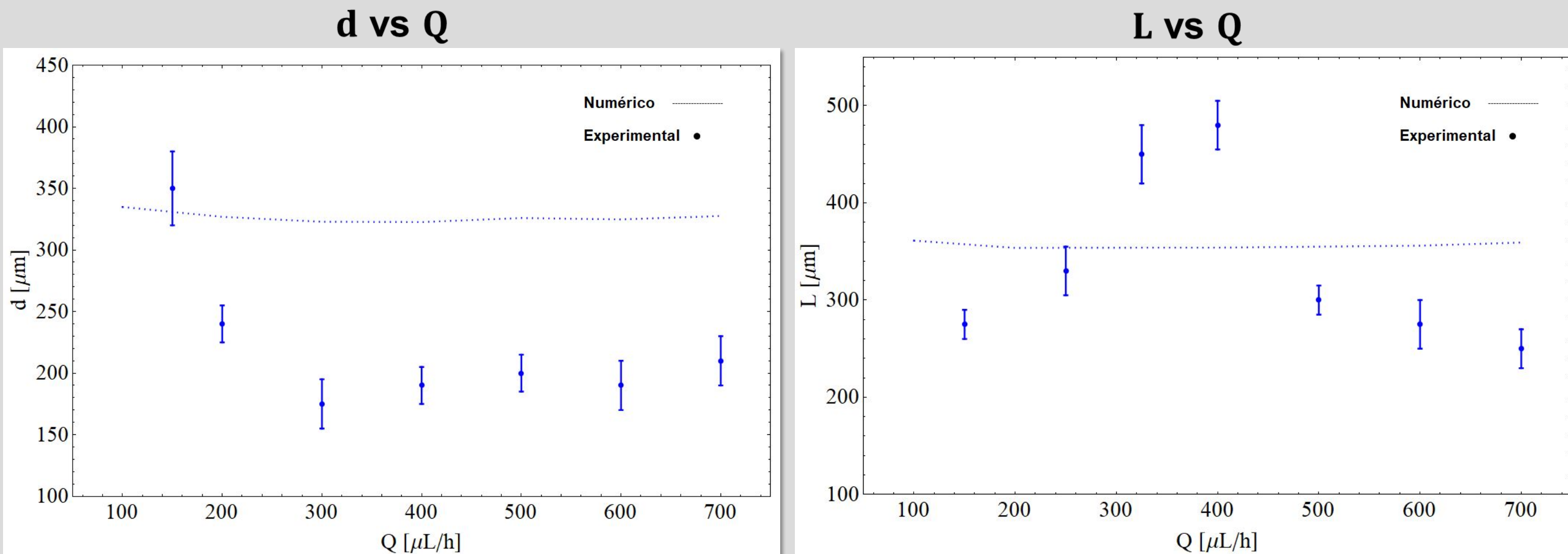
Referencias

$\theta = 121.5^\circ$	-----
$\theta = 135^\circ$	-----
$\theta = 148.5^\circ$	-----
$\sigma = 31.5 \times 10^{-3} \text{ N/m}$	—
$\sigma = 35 \times 10^{-3} \text{ N/m}$	—
$\sigma = 38.5 \times 10^{-3} \text{ N/m}$	—

Conclusiones I

- $Q_{disp} = Q_{cont} = Q$.
 - a. La distancia entre las gotas d se mostró notablemente influida por la variación de θ . Para $\theta = 135^\circ$ y 148.5° el comportamiento de d es similar, mostrando un decrecimiento leve para caudales bajos y una tendencia a saturar a un valor, que depende de θ , para los caudales mayores. No se observa un efecto importante de σ . Contrariamente, para $\theta = 121.5^\circ$, d aumenta con Q .
 - b. Para L , el comportamiento es similar al de d , destacando ahora que los grupos de curvas correspondientes a los dos ángulos mayores prácticamente son ctes, como es de esperarse. Para $\theta = 121.5^\circ$, L crece con Q , es decir que las gotas además de alejarse entre sí dentro del canal, tienden a estirarse conforme aumenta Q .
- $Q_{disp} \neq Q_{cont}$. El cociente L/W muestra la dependencia lineal esperada. Sin embargo, el gráfico sugiere que la pendiente puede verse afectada por el valor de θ (pendiente menor para menor θ).

Resultados numéricos vs experimentales



Visualización experimental de las gotas

Conclusiones II

- Encontramos diferencias notables entre resultados numéricos y experimentales.
 - $Q_{disp} = Q_{cont} = Q$.
 - a. La disminución experimental de d para los Q más pequeños es más notoria que en la observada en las simulaciones, saturando a un valor de d aprox. 59% menor.
 - b. El comportamiento no monótono de L en los experimentos no puede ser explicado con nuestras simulaciones 2D.
 - $Q_{disp} \neq Q_{cont}$. La mayor disparidad la obtuvimos para L/W . De acuerdo a esta relación de escala, el cociente debe aumentar conforme aumenta Q_{disp}/Q_{cont} .
 - Deberá revisarse el procedimiento experimental junto a la validez de sus parámetros intervinientes.

Bibliografía

- [1] "Formation of droplets and bubbles in a microfluidic T-junction - scaling and mechanism of break-up" Piotr Garstecki, Michael J. Fuerstman, Howard A. Stone and George M. Whitesides. Lab Chip 6, 437-446 (2006).
- [2] "Droplet formation in microfluidic T-junction generators operating in the transitional regime. II. Modeling", T. Glawdel, C. Elbuken, and C. Ren *, Phys. Rev. E 016323 (2012).

Agradecimiento: Agradecemos a la Agencia Nacional de Investigación en Innovación por el apoyo económico a través del Fondo Clemente Estable, proyecto código FCE_3_2024_1_180940.