



# EVALUACIÓN DE LA ROBUSTEZ DE UNA RED DE RIEGO CON INDICADORES DE RESILIENCIA

C. Mireya Lapo-Pauta<sup>1</sup>, F. Javier Martínez-Solano<sup>2</sup>, Viviana de los Ángeles Briceño Ojeda<sup>3</sup>, Holger M. Benavides-Muñoz<sup>4</sup>

<sup>1,3,4</sup>Dep. Ing. Civil, Univ. Técnica Particular de Loja, Loja 110150, Ecuador

<sup>2</sup>Dep. Ing. Hidráulica y M.A., Universitat Politècnica de Valencia, 46022 Valencia, Spain

<sup>1</sup>*cmlapo@utpl.edu.ec*, <sup>2</sup>*jmsolano@upv.es*, <sup>3</sup>*vabriceno@utpl.edu.ec*,

<sup>4</sup>*hmbenavides@utpl.edu.ec*

## RESUMEN

Los sistemas de riego están íntimamente ligados al desarrollo a niveles de mejoramiento socio-organizativo, agro productivo y económico. Un sistema de riego moderno, eficiente y sostenible contribuye al Objetivo de Desarrollo Sostenible ODS 12 (producción y consumo responsable). En concreto, dentro de este ODS 12 se establece como meta antes de 2030 lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales, entre ellos, el agua.

El riego implica un alto consumo de agua. La FAO indica que la agricultura representa aproximadamente el 70 % de las extracciones de agua dulce del mundo. Se estima que para el año 2050 será necesario un aumento del 60% en la producción agrícola, y en consecuencia también aumentará las necesidades de riego.

Para asegurar una producción sostenible y evitar los efectos negativos del estrés hídrico, se requieren sistemas de riego eficientes y su adecuada gestión. En este contexto, se han utilizado dos indicadores de resiliencia para estudiar el impacto que pueden tener los cambios en los cultivos o en la modalidad de riego. Esta información puede resultar de gran utilidad a los gestores a la hora de la toma de decisiones.

## Palabras clave

Riego, Resiliencia, Diseño de redes

## 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de riego están íntimamente ligados al desarrollo tanto a nivel social como productivo y económico. Un sistema de riego moderno, eficiente y sostenible contribuye al Objetivo de Desarrollo Sostenible ODS 12 (producción y consumo responsable).

El riego implica un alto consumo de agua. La FAO [1] indica que la agricultura representa aproximadamente el 70 % de las extracciones de agua dulce del mundo, y en algunos países en desarrollo esto puede llegar al 95%. Debido al crecimiento proyectado de la población mundial, se estima que para el año 2050 será necesario un aumento del 60% en la producción

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

agrícola. Sin embargo, al optimizar las prácticas de riego, este aumento esperado podría reducirse a solo el 10%. En Ecuador, el riego supera el 70% de las extracciones de agua dulce. En 2010, la demanda de riego fue de 13.045 hm<sup>3</sup> y se espera que aumente para 2025.

Para asegurar una producción sostenible y evitar los efectos negativos del estrés hídrico, se requieren sistemas de riego eficientes y su adecuada gestión. Por tanto, el diseño integral y la gestión de proyectos de riego es un desafío que debe ser abordado. En este contexto, el concepto de resiliencia puede ser una herramienta apropiada para la planificación y gestión de los sistemas de riego, ya que permite una infraestructura hídrica más adaptable y confiable.

En este contexto, el concepto de la resiliencia puede ser un instrumento adecuado para la planificación y gestión de los sistemas de riego, ya que permite obtener infraestructuras hídricas más adaptables y confiables [2]. Aunque en la ingeniería este concepto es relativamente nuevo [3], no existe una definición universal del concepto de la resiliencia. Sin embargo, muchos investigadores, como Liu et al. [4] y Butler et al. [5], indican que es la capacidad del sistema para resistir y dar respuesta a eventos desfavorables. Ayala Cabrera et al. [6] afirma que los indicadores de resiliencia permiten obtener información útil para una mejor preparación (planificación) y gestión (mitigación) durante situaciones desfavorables en las redes de agua.

Con esta investigación se busca identificar indicadores de resiliencia cuantitativos que permitan evaluar la robustez de una red de riego frente a eventos disruptivos. Por tal razón, se han seleccionado dos indicadores con los que se evaluará la red de riego San Francisco de Cunuguachay en Ecuador. Los indicadores seleccionados fueron el índice de resiliencia hidráulica de tuberías (PHRI) definido por Liu et al. [7] y el índice de adaptabilidad ( $R_{sys}$ ) de Zhuan et al. [8], mediante los cuales se pretende mejorar la toma de decisiones respecto a la planificación y gestión de este sistema de riego ante eventos desfavorables.

Para ello, se determina la respuesta de la red cuando es sometida a varios escenarios desfavorables (cambios de operación en la red, variaciones de presión, variaciones de demanda). Para el desarrollo del trabajo investigativo, primero, se calcula el caudal ficticio continuo, Smith et al. [9] en base a los requerimientos agronómicos de la red. Se diseña la red de riego operando a la demanda según Clement [10] y operando a turnos según Lapo Pauta et al. [11]. En el diseño hidráulico de la red de riego, se verifican los parámetros hidráulicos. Finalmente, se implementan y calculan los índices de resiliencia descritos anteriormente para la red de estudio.

## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1 ESTRUCTURA GENERAL DE LA METODOLOGÍA SEGUIDA**

El procedimiento de cálculo se dividió en tres fases, de las cuales la tercera es la que se presenta en este trabajo. Estas fases se muestran en la Tabla 1. En primer lugar, se determinan las necesidades hídricas para los cultivos esperados en la red de riego. A continuación, se realiza el diseño hidráulico en función de que la modalidad elegida para la demanda sea por disponibilidad continua (riego a la demanda) o con restricciones temporales (riego a turnos). Por último, se hacen las modificaciones pertinentes para poder evaluar el comportamiento de la red así diseñada frente a eventos disruptivos inesperados, determinando los indicadores elegidos para esta evaluación.

Tabla 1. Fases del análisis de la fiabilidad en una red de riego

Fase	Procedimiento
Fase 1. Diseño agronómico	1.1. Determinación de las variables agronómicas. 1.2. Estimación de las necesidades hídricas y el caudal ficticio continuo mediante métodos agronómicos [9].
Fase 2 Diseño hidráulico	2.1. Topología de la red 2.2. Diseño del sistema operando a la demanda. 2.3. Diseño del sistema operando a turnos. 2.4. Comprobaciones (presión, velocidad y transitorios).
Fase 3 Indicadores	3.1. Definición de los indicadores de resiliencia. 3.2. Establecimiento de los escenarios. 3.3. Cálculo de los indicadores.

## 2.2 DISEÑO HIDRÁULICO DE LA RED DE RIEGO

Para el diseño hidráulico (Fase 2) se realizó el cálculo de la red para las dos configuraciones de riego utilizadas habitualmente: riego a la demanda y riego por turnos:

### Modalidad 1. Riego a la demanda

Para determinar los caudales de diseño a la demanda de cada línea se utilizó el primer modelo de Clément [10] en función de la garantía de suministro (GS). Ésta se estableció de acuerdo al número de hidrantes acumulados [13].

### Modalidad 2. Riego a turnos

Por su parte, para determinar los caudales de diseño a turnos se calcularon las dotaciones de los hidrantes mediante el diseño de la parcela tipo. Partiendo del caudal de concesión se estandarizan las parcelas del proyecto en función de la parcela tipo (con una superficie de 1 ha) para ello se eligió un aspersor con una presión, caudal y diámetro de alcance de riego, datos que vienen definidos por catálogos. A partir de estos datos, se define el número de emisores (aspersores) en cada parcela y las dotaciones en los hidrantes a partir del coeficiente del emisor. Se determinaron los caudales de diseño de cada turno a partir de la sumatoria de los hidrantes abiertos aguas abajo del turno que corresponda.

El diseño hidráulico se realizó empleando el método de la pendiente hidráulica uniforme para las dos modalidades de operación de la red de estudio (turnos y demanda). El dimensionamiento consistió en calcular todos los diámetros en función de la pendiente mínima o crítica, que corresponde al nudo crítico. A partir de ello, se determinaron las velocidades en las líneas de la red, la presión en los nudos, las pérdidas por fricción. También se comprobó que las presiones fuesen suficientes para el correcto funcionamiento de los hidrantes, que el rango de velocidades para el diseño estuviese entre 0,5 m/s hasta 2,5 m/s, y que las tuberías tuviesen un timbraje adecuado a las presiones. La verificación del cumplimiento de los parámetros de diseño en la red de estudio se realizó usando el software EPANET [12].

## 2.3 ESCENARIOS CONTEMPLADOS

Para la modelación y simulación de la red se definieron diferentes escenarios con la finalidad de representar eventos disruptivos o inesperados que afectan a la operación del sistema de riego. Se consideraron las variaciones en las variables hidráulicas críticas: las demandas y las presiones en la red. Estos eventos disruptivos se consideraron de manera diferenciada en las dos modalidades de operación mencionadas anteriormente:

### 2.3.1. Cambio en el régimen de riego

Debido a las diferentes características del diseño basado en el riego a la demanda o por turnos, se tuvieron que establecer dos hipótesis distintas que afectaban a las redes calculadas para cada una de las modalidades.

#### **Escenario 1a (Variación del régimen de riego en la red calculada a la demanda).**

A partir del diseño realizado para unas determinadas características de riego y una determinada garantía de suministro (GS) se plantean dos posibles escenarios de cambio:

Se supuso que la configuración de la red se modifica entendiéndose esto como que un grupo de hidrantes operan al mismo tiempo. En otras palabras, para una red de riego a la demanda diseñada con una cierta GS, se producen demandas que exceden estas previsiones. Partiendo de esta premisa, se modificaron los caudales calculados mediante la fórmula de Clément haciendo variar la GS desde el 90% hasta el 99,5%. Esto influye directamente en el número de hidrantes en funcionamiento simultáneamente y por ende en la flexibilidad del sistema [13].

#### **Escenario 2a (Variación del régimen de riego en la red calculada por turnos de riego).**

En este caso se estudió el caso en el que algunos usuarios no respetarían el turno asignado. Para ello, la red se analiza bajo distintos estados de servicio. Partiendo del diseño original con un reparto de los turnos basado en métodos tradicionales y sin ningún cambio, se plantearon de forma aleatoria cambios en los turnos de funcionamiento. Los hidrantes correspondientes a diferentes turnos se abrirán progresivamente de forma estocástica en escalones de 30%, hasta un máximo del 50%.

### 2.3.2. Cambio en las necesidades de riego

En este caso se asume que en la red existe un cambio en los tipos de cultivos preestablecidos y, por tanto, de las necesidades de riego. Partiendo de nuevo del diseño original, se modifican las necesidades de riego de determinados usuarios, modificando por tanto las demandas de consumo. Se consideró que ciertos usuarios deciden plantar un nuevo cultivo, distinto del previsto en el diseño inicial, incrementando el consumo de agua entre un 10% y 30%. Para ello se definieron de forma aleatoria los hidrantes a los que afectaría este cambio, considerando inicialmente solo el 10% de estos y posterior a ello se incrementó progresivamente el número de hidrantes hasta un máximo del 70% de los hidrantes.

Estos cambios conducen a dos nuevos escenarios:

#### **Escenario 1b. Efecto del cambio de cultivo en el diseño a la demanda**

#### **Escenario 2b. Efecto del cambio de cultivo en el diseño por turnos**

## 2.4 MEDIDA DE LA RESILIENCIA DE LA RED

Los indicadores permiten evaluar el desempeño mediante formulaciones matemáticas. Los índices de resiliencia y sus modificaciones se han aplicado para valorar la fiabilidad de una red de agua frente a las variaciones hidráulicas [5]. En este estudio se van a contrastar dos índices: el índice de resiliencia de tuberías (PHRI en sus siglas en inglés), propuesto por Liu et al. [10] y el índice de disponibilidad ( $R_{sys}$ ) propuesto por Zhuang et al. [8].

#### 2.4.1. Índice de resiliencia de tuberías (PHRI)

El PHRI es un método que combina la cabeza de presión y la longitud de la tubería (apoyándose en el gradiente hidráulico de la tubería), el que está vinculado con la diferencia de altura en ambos extremos de una tubería y la longitud de la misma. El método establece que se obtendrá más carga aguas abajo, siempre y cuando las tuberías aguas arriba disipen menos energía. El PHRI se calculó con la ecuación (2):

$$PHRI = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n (S_i + A_i)} \quad (1)$$

En la anterior ecuación,  $n$  es el número de tuberías en el sistema de distribución de agua,  $A_i$  representa la energía disipada en la red,  $S_i + A_i$  sería la energía total aportada en cabecera y por tanto  $S_i$  es el exceso de energía suministrada, esto es, el margen que quedaría para hacer frente a situaciones inesperadas. Estos términos se calculan a partir de la línea de alturas piezométricas de cada tubería:

$$S_i = \frac{1}{2}(H_{ds,i} - H_{req}) \cdot L_{p,i} \quad (2)$$

$$S_i + A_i = \frac{1}{2}(H_{us,i} - H_{req}) \cdot L_{p,i} \quad (3)$$

$$L_{p,i} = \sqrt{L_i^2 - (Z_{us,i} - Z_{ds,i})^2} \quad (4)$$

Donde:  $H_{us,i}$  y  $H_{ds,i}$  son respectivamente las alturas piezométricas en los nudos aguas arriba y aguas debajo de la tubería  $i$ , y  $H_{req}$  es la altura piezométrica mínima requerida en cabecera de la red. Por su parte,  $L_{p,i}$  es la longitud de la tubería  $i$  proyectada sobre el plano horizontal.

#### 2.4.2. Índice de disponibilidad del sistema ( $R_{sys}$ )

Por otro lado, el  $R_{sys}$  es un método que se basa en términos de disponibilidad del sistema, es decir, en la cantidad de agua que se suministra a los nudos de consumo durante eventos desfavorables en el sistema. Este indicador se puede calcular tanto a nivel nodal y como para todo el sistema. En este trabajo se utilizará el índice global del sistema, expresado según la ecuación (5):

$$R_{sys} = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N Q(t)_{i,d}}{\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N Q(t)_{i,r}} \quad (5)$$

En esta ecuación,  $R_{sys}$  es el mencionado índice de disponibilidad del sistema,  $Q(t)_{i,d}$  es la demanda entregada (disponible) en el nudo  $i$  en el instante  $t$ ,  $Q(t)_{i,r}$  es la demanda requerido (utilizada para el diseño) en el nudo  $i$  en el instante  $t$ ,  $T$  es la duración de la simulación, esto

**SMART WATER:**

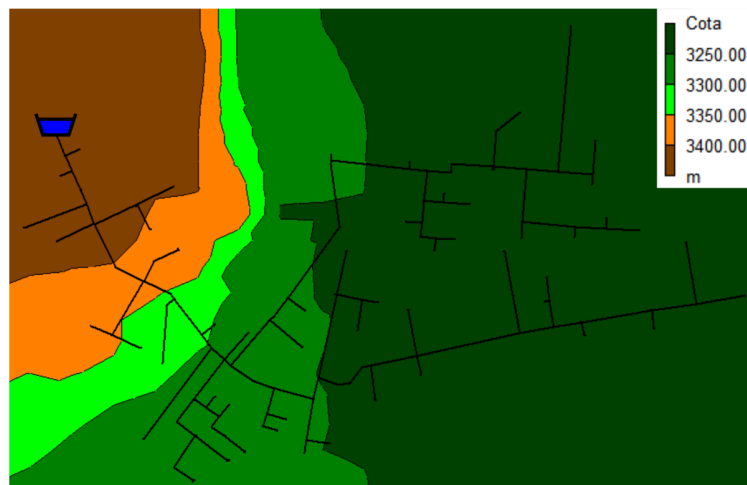
Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

es, la duración del funcionamiento bajo un evento desfavorable del sistema, y  $N$  es el número de nudos de demanda de la red.

Ambos indicadores evalúan la resiliencia en un rango de 0 a 1, siendo los valores cercanos a 1 los que indican que el sistema tiene una resiliencia elevada (un funcionamiento fiable) y lo contrario si el valor se acerca a 0. De esta forma, el primer indicador (PHRI) evalúa la resiliencia de todo el sistema en función de la presión disponible en los nudos y el segundo se centra más en la demanda entregada.

**3. CASO DE ESTUDIO**

Como caso de aplicación se ha seleccionado la red de riego de San Francisco de Cunuguachay, sector ubicado en la provincia Chimborazo (Ecuador). Esta red se divide en cinco ramales. Para este trabajo se ha utilizado el ramal denominado Yulchirón 2 (Figura 1), la cual consta de 171 hidrantes y cubre un área de riego de 23,38 ha con 7300 metros de tubería. En esta red cabe destacar la gran diferencia de cotas que hay entre el embalse principal (situado a 3472,55 m) y el hidrante situado a menor cota (3210 m), con 262 m de desnivel.



*Figura 1. Planimetría del sector Yulchirón 2, de la red de riego de San Francisco de Cunuguachay.*

Para determinar las necesidades hídricas se utilizaron datos de precipitación obtenidos en la estación pluviométrica San Juan Chimborazo. La media de precipitación recogida en los últimos 22 años (extensión de la serie histórica) es de 680 mm/año. Para el cálculo se consideró una precipitación con una probabilidad de ocurrencia del 75%, llegando a los 565 mm/año.

Siguiendo los métodos utilizados por la FAO [9] se obtuvo que el caudal ficticio continuo para esta red de riego alcanza un valor de 0,32 (l/s)/ha, siendo ésta la demanda correspondiente al mes de agosto (el mes que requiere una mayor cantidad de agua).

**4. RESULTADOS**

En el siguiente apartado se presentan los resultados de la implementación de los indicadores en el ramal Yulchirón 2 en los escenarios propuestos.

#### 4.1 DISEÑO A LA DEMANDA

##### Escenario 1a. Efecto del cambio en el régimen de riego en el diseño a la demanda

La Figura 2 muestra el valor de los índices de resiliencia  $R_{SYS}$  y  $PHRI$  en el ramal Yulchirón 2 cuando se modifica la configuración de los hidrantes, mediante la variación de las garantías de suministro “GS” desde el 90% (caso base, es decir, con las demandas empleadas en el diseño) hasta el 99.5%. Se observa que el indicador  $R_{SYS}$  es igual a 1 pese al incremento del caudal debido al aumento del número de hidrantes en funcionamiento. Sin embargo, el indicador  $PHRI$  disminuye a medida que se incrementa la GS, debido a la mayor pérdida de energía en las líneas, disminuyendo así las presiones en los hidrantes en cierta medida.

##### Escenario 1b. Efecto del cambio de cultivo en el diseño a la demanda

En la Figura 3 se visualiza la tendencia de los índices de resiliencia, el índice  $R_{SYS}$  se mantiene constante pese al incremento del caudal, no así el índice  $PHRI$  que disminuye en función de la variación del caudal. Al igual que en el caso anterior, se detecta que para el diseño a la demanda el índice  $R_{SYS}$  apenas es sensible a los cambios provocados, mientras que el índice  $PHRI$  sí muestra dichos cambios.

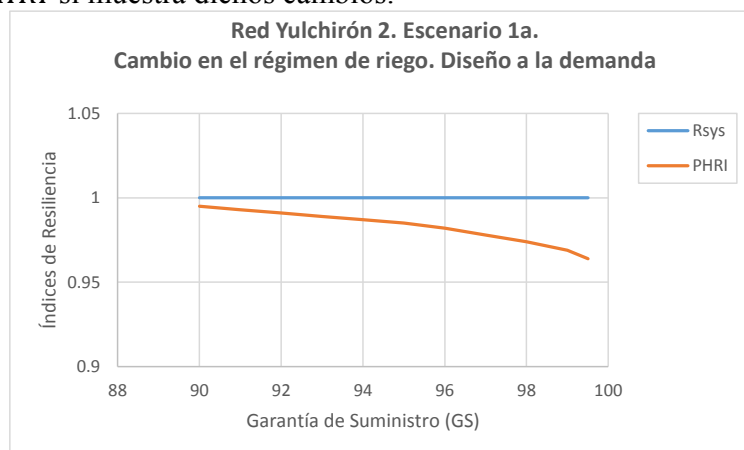


Figura 2. Resultados de  $R_{SYS}$  y  $PHRI$  para el escenario 1a.

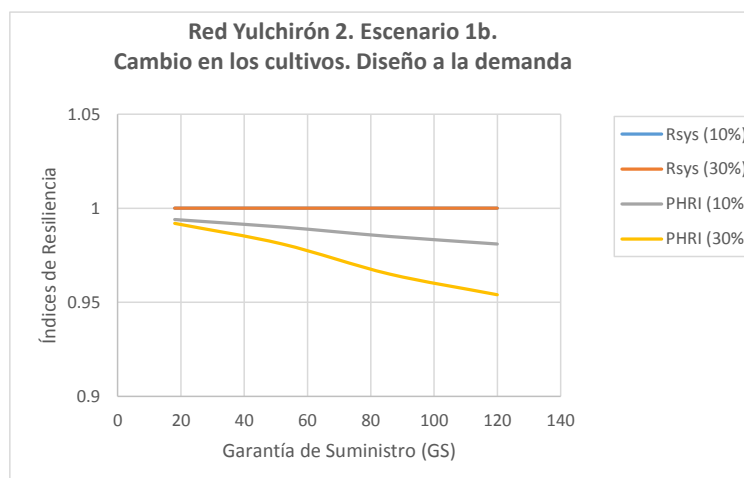


Figura 3. Resultados de  $R_{SYS}$  y  $PHRI$  para el escenario 1b.

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

**4.2 DISEÑO POR TURNOS**

**Escenario 2a. Efecto del cambio de cultivo en el diseño a la demanda**

En la Figura 4 se observa la tendencia de los índices de resiliencia. En este caso el índice  $R_{sys}$  disminuye a medida que se incrementa el número de hidrantes que cambian de turno, mientras que el índice PHRI se mantiene constante.

**Escenario 2b. Efecto del cambio de cultivo en el diseño por turnos**

En la Figura 5 se visualiza la tendencia de los índices de resiliencia. En este caso el índice  $PHRI$  se mantiene prácticamente constante mientras que el índice  $R_{sys}$  disminuye cuando se incrementa el caudal del 10% al 30%. Se observa claramente que cuando se requiere una mayor demanda en el sistema, éste pierde resiliencia a nivel de disponibilidad de agua.

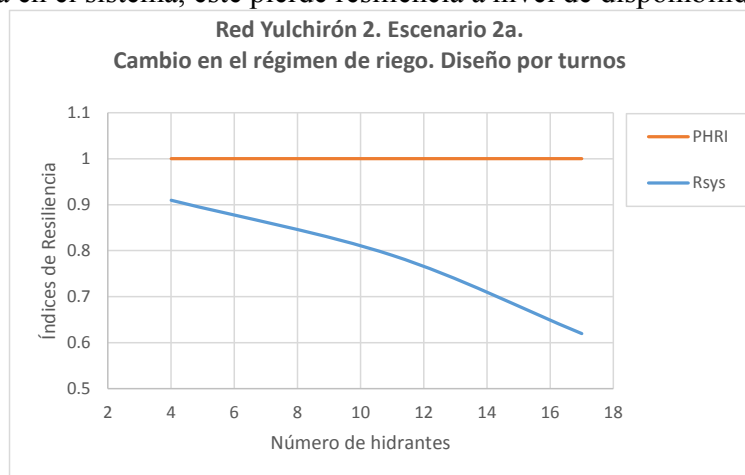


Figura 4. Resultados de  $R_{sys}$  y PHRI para el escenario 2a.

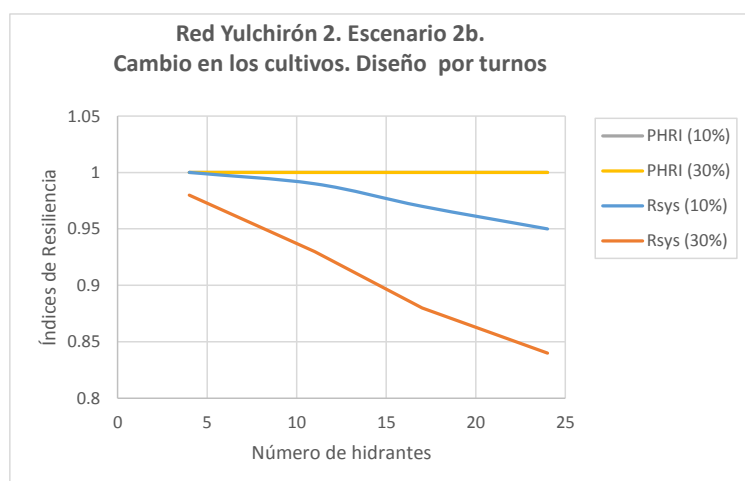


Figura 5. Resultados de  $R_{sys}$  y PHRI para el escenario 2b.

**5. CONCLUSIONES**

En este artículo se ha comparado el funcionamiento de una misma red diseñada tanto para funcionar a turnos como para suministrar riego a la demanda. La red resultante se ha sometido



**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

a cambios tanto en el tipo de cultivo (afectando a las necesidades hídricas) como al cambio en el régimen de riego (modificando los turnos asignados). Para cuantificar el efecto de estos cambios, se han empleado dos indicadores distintos: PHRI y Rsys. De los resultados obtenidos se han podido extraer las siguientes conclusiones:

- Las redes de riego operando a la demanda ofrecen una gran flexibilidad. Esto les permite eguir entregando caudal en condiciones aceptables incluso si se modifica la demanda, tal y como demuestra el hecho de que el indicador Rsys presente valores óptimos en todos los escenarios estudiados.
- Por el contrario, las redes operadas presentan una flexibilidad casi nula y presentan inconvenientes a nivel de demandas cuando existen eventos disruptivos que requieren que se entregue una mayor cantidad de caudal.
- Los dos indicadores utilizados permiten evaluar la resiliencia a nivel de demandas (Rsys) o de presiones (PHRI). El indicador Rsys es preferible para evaluar la resiliencia en redes de riego frente a cambio en las demandas.
- Por su parte, el indicador PHRI es más adecuado para evaluar la resiliencia a nivel de presiones en redes operadas a la demanda, ya que a nivel de demandas este tipo de redes apenas presentan inconvenientes.

Finalmente se considera importante evaluar la resiliencia de las redes de riego a presión con este tipo de indicadores ya que permiten valorar como responderán estos sistemas cuando son sometidos a disrupciones. De esta forma será posible planificar y gestionar los sistemas antes de que sean implantados, facilitando la toma de decisiones acertada del proyectista.

## REFERENCIAS

- [1] FAO, Water for Sustainable Food and Agriculture: A report produced for the G20 Presidency of Germany, Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations., 2017.
- [2] S. Shin, S. Lee, D. R. Judi, M. Parvania, E. Goharian, T. McPherson y S. J. & Burian, A systematic review of quantitative resilience measures for water infrastructure systems, *Water*, vol. 10, n° 2, pp. 1-25, 2018.
- [3] S. Hosseini, K. Barker y J. E. & Ramirez-Marquez, «A review of definitions and measures of system resilience,» *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 145, p. 47-61, 2016.
- [4] D. Liu, X. Chen y T. & Nakato, «Resilience Assessment of Water Resources System,» *Water Resources Management*, vol. 26, n° 13, p. 3743-3755, 2012.
- [5] D. Butler, R. Farmani, G. Fu, S. Ward, K. Diao y M. & Astaraie-Imani, «A new approach to urban water management: Safe and sure,» *Procedia Engineering*, vol. 89, p. 347-354, 2014.
- [6] D. Ayala Cabrera, O. Piller, M. Herrera, D. Gilbert y J. & Deuerlein, «Absorptive resilience phase assessment based on criticality performance indicators for water distribution networks,» *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 145, n° 9, pp. 1-15, 2019.

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

- [7] H. Liu, D. A. Savić, Z. Kapelan, E. Creaco y Y. & Yuan, «Reliability surrogate measures for water distribution system design: Comparative analysis,» *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 143, n° 2, p. 1–14, 2017.
- [8] Zhuang, B., Lansey, K., & Kang, D. (2013). Resilience/availability analysis of municipal water distribution system incorporating adaptive pump operation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(5), 527-537.
- [9] Smith, M, Allen, R, and Pereira, L. Revised FAO methodology for crop-water requirements. IAEA: N. p., 1998. <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/676839>
- [10] Clément, R. (1966). Calcul des débits dans les réseaux d'irrigation fonctionnant à la demande. *La Houille Blanche*, (5), 553-576.
- [11] Pauta, L. (2022). CM; Briceño Ojeda, VA; Martínez-Solano, FJ; Benavides Muñoz, H. Implementation of Quantitative Resilience Measurement Criteria in Irrigation Systems. *Water* 2022, 14, 2698.
- [12] Rossman, L.A. (2000) EPANET 2 Users Manual. EPA/600/R-00/057, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH.
- [13] Lapo Pauta, C. M. (2019). Diseño óptimo de redes de riego a presión para su explotación a turnos (Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de València).