

Artículo de investigación



## Nueva metodología para la obtención de relaciones Intensidad-Duración-Recurrencia a partir de Datos de Precipitación Derivados de Satélites para la República Argentina

### *New methodology for obtaining Intensity-Duration-R recurrence relationships from Satellite-Derived Precipitation Data for the Argentine Republic*

Juan Francisco Weber\*, Santiago Alejo Drab

\*Autor de correspondencia

#### HISTORIA DEL ARTÍCULO

Recibido 22 Agosto 2022  
Revisado 11 Septiembre 2022  
Aceptado 3 Octubre 2022  
Publicado 5 Octubre 2022

#### PALABRA CLAVES

Hidrología estadística; lluvias de diseño; hidrometeorología; sensores remotos.

#### KEYWORDS

Statistical hydrology; design rainfalls; hydrometeorology; remote sensing.

#### Resumen

Se presentan los resultados preliminares de una metodología de obtención de relaciones Intensidad-Duración-Recurrencia (idT) basada en el uso de Datos de Precipitación Derivados de Satélites (DPDS) para la República Argentina. Como DPDS se utilizó el producto PDIR-Now, de paso horario y cobertura temporal de 20 años, en correspondencia con 25 localidades donde se cuenta con relaciones idT. De esta información se obtuvieron los intervalos de máxima intensidad anual (IMA), para duraciones entre 1 hora y 24 horas; a estas series se asignaron probabilidades empíricas y luego, se determinó un coeficiente de corrección por sesgo, función de la duración y de la localización, comparando estos resultados con las relaciones idT existentes. Estos coeficientes se interpolaron espacialmente con el objeto de extender la aplicación a sitios donde no se cuenta con relaciones idT. Se validaron los resultados en dos localidades donde se cuenta con estimaciones de la relación idT, evidenciándose algunas limitaciones. Se considera que si bien los resultados pueden ser mejorados, la metodología presentada puede ser de utilidad para la estimación de relaciones idT en sitios del territorio nacional, en ausencia de información pluviográfica.

#### Abstract

Preliminary results of a methodology for obtaining Intensity-Duration-R recurrence relationships or the Argentine Republic are presented. This methodology is based on the use of Satellite-Derived Precipitation Data (DPDS). As DPDS, the PDIR-Now product was used, with 1-hour time-step and 20-year temporal coverage, at 26 places with existent idT relationships. From this information, the intervals of maximum annual intensity (IMA) were obtained, for durations between 1 hour and 24 hours; Empirical probabilities were assigned to these series; then, a bias correction coefficient was determined, as a function of duration and location, comparing these results with existing idT relationships. These coefficients were spatially interpolated in order to extend the application to places where idT relationships are not available. The results were validated in two localities where estimations of the idT relationships are available, showing some limitations. It is considered that, although the results can be improved, the described procedure can be useful for estimating idT relationships in sites of the national territory, in the absence of pluviographic information.

1 Laboratorio de Hidráulica, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional, Córdoba, Argentina, +54.0351 . 598-6000 jweber@frc.utn.edu.ar; santidrab2015@gmail.com

## 1. INTRODUCCIÓN

Para diversos proyectos de ingeniería en los cuales intervienen obras hidráulicas, como así también en la delimitación de áreas en base al riesgo hídrico, resulta necesario definir tres magnitudes que describen las precipitaciones máximas: intensidad ( $i$ ), duración( $d$ ) y recurrencia (expresada a través del periodo de retorno  $T$ ). La relación entre estas tres variables, conocida como relación Intensidad-Duración-Recurrencia ( $idT$ ) se obtiene a partir de los registros de lluvias intensas durante un periodo de tiempo suficientemente extenso y representativo de los eventos extremos locales (Tucci, 1993).

En Argentina las mediciones subsidiarias de precipitación se realizan mediante el uso de estaciones pluviográficas. Como consecuencia, estas observaciones (de carácter puntual) frecuentemente no representan en forma apropiada la variabilidad espacio-temporal de los campos de precipitación; esto hace necesario la incorporación de otras fuentes de información que puedan mejorar estas limitaciones (Vidal et al., 2012). Además, y como en muchos otros países de la región, resultan escasas las series pluviográficas de extensión y calidad suficientes que permitan la determinación de relaciones  $idT$ . Debido a ello, se han propuesto diversos procedimientos de regionalización de relaciones  $idT$  para el país o regiones de él (Rühle, 1966; Devoto, 2002; Farías y Olmos, 2007; Caamaño Nelli y Dasso, 2003; Zamanillo et al., 2008). Lamentablemente, estas investigaciones encuentran su mayor limitación en la significativa escasez (e irregularidad en su distribución espacial) de series pluviográficas de extensión suficiente para alcanzar representatividad estadística. Los campos interpolados de precipitaciones de diseño, obtenidos a partir de escasas estimaciones puntuales, no pueden reflejar adecuadamente las condicionantes tanto topográficas como climáticas derivadas de la gran variabilidad en el territorio nacional.

A través del avance tecnológico de los últimos años se han logrado desarrollar infraestructuras de datos de

precipitación obtenidos a partir de observaciones satelitales que compensan las deficiencias señaladas en las redes hidrometeorológicas existentes. Una de ellas es el Portal de Datos CHRS (*Center for Hydrometeorology and Remote Sensing*) de la Universidad de California, Irvine (UCI) que facilita el acceso a distintos conjuntos de datos con resolución temporal sub diario (Nguyen et al., 2019). La ventaja comparativa de este tipo de datos es su amplia cobertura espacial, la cual abarca gran parte de la superficie del planeta, desde los 60° latitud norte hasta 60° latitud sur, de esta forma puede obtenerse información hidrometeorológica en cualquier punto del país incluso en regiones donde no existe registro alguno.

Debido a las problemáticas expuestas, resulta de gran interés evaluar la aplicabilidad de estos Datos de Precipitaciones Derivados de Satélites (DPDS) en la estimación de relaciones Intensidad-Duración-Recurrencia ( $idT$ ) en el ámbito nacional.

### 1.1 Antecedentes

Devoto (2002) desarrolló, utilizando la información de 26 estaciones pluviográficas, un procedimiento para la estimación de relaciones  $idT$  en la República Argentina en localidades carentes de información. El método asume que las precipitaciones intensas siguen la distribución de probabilidades de Gumbel, y a su vez, establece una relación de tipo hiperbólico entre intensidades y duraciones. Los cuatro parámetros del método son: las precipitaciones intensas medias de 1 y 12 horas de duración, y los correspondientes coeficientes de variación, a los que el autor presenta como campos continuos en el territorio nacional a través de mapas de isolíneas. En base a esto, el método permite estimar relaciones sintéticas  $idT$  para todo el territorio argentino. De este modo se convierte en el único procedimiento accesible de regionalización de validez en todo el país.

El método supone que, para cada periodo de retorno considerado, existe una relación entre la intensidad  $i$  (en mm/h) y la duración  $d$  de la tormenta (en minutos) dada por:

$$i = \frac{a}{d^b + c} \quad (1)$$

donde  $a$ ,  $b$  y  $c$  son parámetros a determinar. Devoto (2002) sugiere adoptar un valor constante para  $b=0.80$ , de modo que los parámetros  $a$  y  $c$  se obtienen

a partir de un par de valores  $i_1$  e  $i_2$  para las duraciones  $d_1=1$  hora y  $d_2=12$  horas. Las correspondientes láminas  $P_1$  y  $P_2$  se calculan a partir

de las precipitaciones medias  $P$  de esa duración, de su coeficiente de variación  $Cv$  y del periodo de retorno

$T$  (con base en la distribución de Gumbel) como:

$$P = \bar{P} \cdot \left\{ 1 - \frac{0,5772}{1,282} Cv - \frac{1}{1,282} Cv \cdot \ln \left[ -\ln \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \right] \right\} \quad (2)$$

Devoto (2002) describe a las precipitaciones intensas medias de 1h y 12h de duración, y sus respectivos coeficientes de variación, como campos continuos. Calculando esos parámetros para las 26 estaciones pluviográficas consideradas, y por interpolación, presenta cuatro mapas de isolíneas para estas cantidades, a partir de los que es posible estimar, por interpolación lineal, los correspondientes valores para cualquier otro punto del territorio nacional.

Por su parte, Caamaño Nelli y García (1999) proponen un método de base estadística para la determinación de relaciones idT (llamado modelo DIT) que facilita su regionalización. El método se fundamenta en el concepto de factor de frecuencia (Chow et al., 1994), que describe a un valor extremo y de la serie como su media  $\mu_y$  más el factor de frecuencia  $\Phi_y$  multiplicado por el desvío estándar  $\sigma_y$ :

$$y = \mu_y + \sigma_y \Phi_y \quad (3)$$

El factor de frecuencia  $\Phi_y$  se establece en base a una distribución teórica de probabilidades ajustada a la serie de extremos. El planteo original del modelo DIT asume que las lluvias de la provincia de Córdoba

siguen la distribución lognormal. Caamaño y García (1999) publican una expresión pseudo-analítica para estimar el factor de frecuencia correspondiente a un determinado periodo de retorno  $T$ :

$$\Phi_y = 2,584458(\ln T)^{0,375} - 2,252573 \quad (4)$$

En base a una serie de consideraciones teóricas, estos autores presentan una ecuación que relaciona las

variables  $i$ ,  $d$ ,  $T$  y que constituye la expresión del modelo DIT:

$$\ln i = A\Phi_y - B\delta_y + C \quad (5)$$

en donde  $\Phi_y$  es el mencionado factor de frecuencia definido en la expresión (4), y  $\delta_y$  (denominado factor de duración) se calcula como:

$$\delta_y = (\ln d)^q \quad (6)$$

siendo  $A$ ,  $B$ ,  $C$  y  $q$  los parámetros del modelo.

El modelo DIT presenta el mismo número de parámetros que la difundida ecuación de Sherman (cuatro), pero al fundamentarse en conceptos estadísticos, es posible su transposición a una estación pluviométrica asociada, mediante el mecanismo descrito por Caamaño Nelli y Dasso (2003).

Posteriormente, Caamaño Nelli et al. (2010) presentan una versión simplificada de este modelo, denominado DIT 3p, manteniendo constante el valor del exponente  $q$  de la ecuación (6) en  $q=5/3$  y obteniendo los restantes parámetros para 27 estaciones pluviográficas del territorio nacional.

Finalmente, Weber et al. (2023) describen los resultados de una metodología para la estimación de

las precipitaciones diarias de diseño en la Argentina, para el 97 % de su territorio continental. El análisis se fundamentó en el procesamiento de los Datos de Precipitación Derivados de Satélite (DPDS) del producto CHIRPS (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data*), que cuenta con una resolución espacial de 5 km y una cobertura temporal de 37 años. Los autores presentan mapas de precipitaciones diarias de diseño para periodos de retorno variables entre 2 y 100 años. Los resultados obtenidos fueron validados contra 30 estaciones seleccionadas del Sistema Nacional de Información Hídrica, obteniéndose un acuerdo aceptable, con una media de los errores relativos en valor absoluto del 25.1 %, frente a los 43.4 % arrojados por el método de Devoto (2002) antes descripto.

### 1.2 Los Datos de Precipitación Derivados de Satélites (DPDS)

Las mediciones pluviográficas de superficie tienen varias limitaciones, como una cobertura espacial irregular, como así también amplias áreas no monitoreadas, como la mayoría de las áreas oceánicas y las escasamente pobladas. Los principales desafíos en la medición convencional de la precipitación están asociados a su intermitencia, como así también al muestreo temporal y espacial. Si bien los pluviómetros son fundamentales en la medición directa de la precipitación, la densidad espacial de las redes pluviométricas es limitada. Por otro lado es habitual aplicar técnicas de interpolación a estos datos pluviométricos para establecer campos continuos para cubrir todo el mundo; este proceso suaviza los valores extremos y afecta las tendencias a largo plazo, particularmente en zonas con baja densidad en la red pluviométrica.

Las estimaciones satelitales compensan estas limitaciones al disponer de una cobertura espacialmente más homogénea en gran parte de la superficie terrestre; además, presentan series temporales más completas. Estas estimaciones se basan en el uso de instrumentos que adquieren información en las bandas del infrarrojo (IR) y microondas (MW). De este modo, los datos satelitales proporcionan una resolución temporal adecuada y una alta resolución espacial con una amplia cobertura, lo que permite estimar con precisión las precipitaciones en algunas regiones no monitoreadas, como los océanos, áreas montañosas y desiertos. Algunos conjuntos de DPDS están disponibles operativamente, entre ellos se pueden citar los siguientes productos: TRMM (*Tropical*

*Rainfall Measuring Mission*), PERSIANN (*Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks*), CMORPH (*CPC MORPHing technique*), CFSR (*Climate Forecast System Reanalysis*) y CHIRPS (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data*) (Sun et al., 2018).

Además, existen productos que combinan mediciones satelitales y de campo, en conjunto con estimaciones de modelos meteorológicos (denominados *reanálisis*), lo que mejora la estimación de variables climáticas; este enfoque maximiza los beneficios relativos de cada tipo de datos. En muchos casos, los productos descriptos cuentan ya con varias décadas de registros disponibles; por lo tanto, son susceptibles de ser evaluados en cuanto a su versatilidad para el análisis de precipitaciones máximas; en Argentina incluso, estas series son aún más extensas que muchos de los registros pluviométricos tradicionales (Weber et al., 2023).

## 2. OBJETIVO

Implementar una metodología para la obtención de relaciones Intensidad-Duración-Recurrencia (idT) basada en el uso de Datos de Precipitación Derivados de Satélites (DPDS), en el territorio de la República Argentina, validando sus resultados con relaciones idT existentes. Como hipótesis de trabajo, se supone la estacionariedad de las propiedades estadísticas de las series de precipitaciones intensas, tanto en el periodo de los DPDS como de los registros pluviográficos con que se estimaron las relaciones idT existentes. Como hipótesis de investigación, se plantea que los DPDS permiten estimar relaciones Intensidad-Duración-Recurrencia (idT) comparables a las obtenibles a partir de información pluviográfica.

## 3. METODOLOGÍA

### 3.1 Materiales

Como información de campo, se utilizaron las relaciones idT publicadas por Rico et al. (2017), expresadas por medio de los parámetros del modelo DIT 3p anteriormente descripto (de aquí en más denominadas datos reales). Estos autores recopilaron información pluviográfica o bien relaciones idT publicadas previamente, para ajustar los parámetros del modelo DIT, conformando la mayor colección de relaciones idT disponibles en el país a la fecha. En la Figura 1 se presenta la localización geográfica de las

estaciones consideradas por Rico et al. (2017), junto con la procedencia de la información. Puede observarse la irregular distribución geográfica de estas estaciones, lo que limitará la validez geográfica de la metodología propuesta. A su vez debe tenerse

en cuenta que muchas de estas relaciones se obtuvieron a partir de relaciones idT previamente publicadas y no sobre los datos originales, por lo que no es posible establecer periodos en común con la información satelital utilizada.

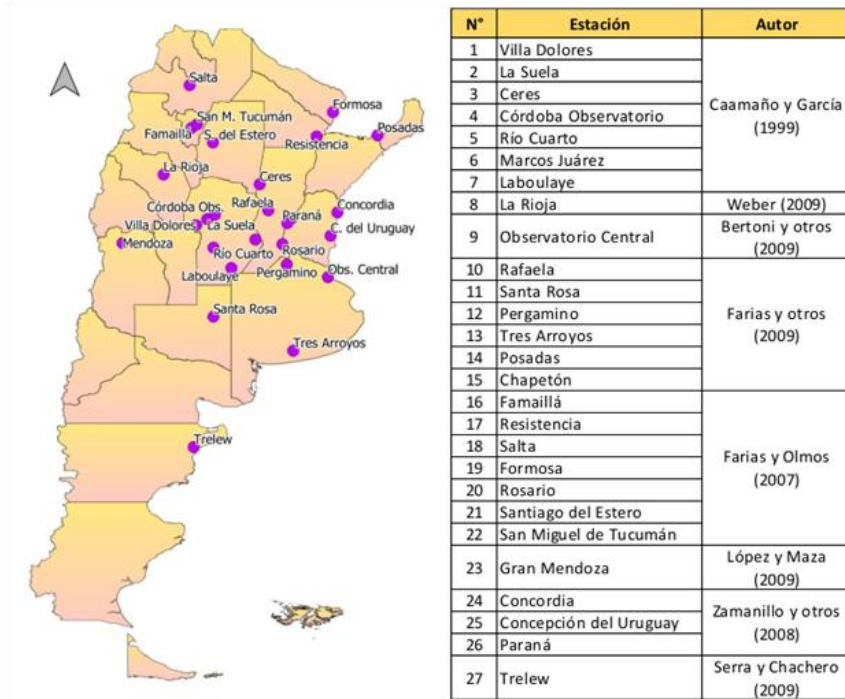


Figura 1. Estaciones con disponibilidad de relaciones idT (Rico et al., 2017)

Para el acceso a la información sintética utilizada en este trabajo se recurrió al Portal de Datos CHRS (*Center for Hydrometeorology and Remote Sensing*) de la Universidad de California, Irvine (Nguyen et al., 2019) que facilita el acceso a cinco conjuntos de datos de precipitación basados en satélites con licencia, estos son: PERSIANN, PERSIANN *Cloud Classification System* (CCS), PERSIANN *Climate Data Record* (CDR), PERSIANN *Dynamic Infrared-Rain Rate Model* (PDIR) y PERSIANN *Cloud Classification System-Climate Data Record* (CCS-CDR). En particular, se optó por el producto PDIR-Now (Nguyen et al., 2020) ya que presenta una adecuada cobertura espacial (60°S – 60°N; 180°W – 180°E), la mayor resolución espacial (0.04° x 0.04° ≈ 4 km x 4 km), una adecuada cobertura temporal (1 de marzo de 2000 al presente) y la mayor resolución temporal (1 hora), compatibles con el objetivo del trabajo. Se adquirieron los datos PDIR-Now entre el 01/03/2000, 00:00 y el 01/11/2020, 00:00, con una frecuencia de 1 hora (datos virtuales), en

correspondencia con cada una de las 27 estaciones consideradas (Figura 1). Esto totaliza 180,385 datos por estación. Las series virtuales así adquiridas fueron analizadas, resultando que dos estaciones (Mendoza y Trelew) presentaron una gran cantidad de datos faltantes, por lo que no pudieron ser consideradas para el análisis. Para la validación de los resultados, se recurrió a relaciones idT obtenidas a partir de los resultados publicados por Puricelli (2014) para la ciudad de Balcarce (Buenos Aires) y por Caamaño Nelli y Dasso (2003) para la ciudad de Villa María (Córdoba), estimada a partir del procedimiento propuesto por estos autores.

### 3.2 Métodos

Debido a la masividad de la información (en especial, la de los datos virtuales) se desarrollaron códigos ad hoc implementados en el lenguaje de programación Python, para su procesamiento. Se desarrollaron e implementaron algoritmos que permitieron: extraer los Intervalos de Máxima Anual (IMA), realizar un

análisis de regresión lineal entre las series de intensidades máximas anuales reales y virtuales, y realizar la corrección por sesgo de estos datos virtuales. Para la obtención de lluvias de diseño a partir de DPDS se definieron los IMA. Los IMA son periodos de tiempo estandarizados para los cuales se puede determinar las precipitaciones máximas en cada año hidrológico de la serie histórica de datos, en

este caso la serie derivada de satélites (datos virtuales). Su uso presenta la ventaja de no tener que definir un criterio de separación entre tormentas, en el análisis de las series de tiempo. Las duraciones  $d$  consideradas para los IMA fueron: 1, 2, 3, 4, 6, 9, 12, 18 y 24 horas. A partir de las precipitaciones acumuladas  $P$  en cada IMA, se obtuvieron las respectivas intensidades  $i$  como:

$$i(mm/h) = \frac{P(mm)}{d(h)} \quad (7)$$

De este modo se generó una serie de 20 intensidades máximas anuales, para cada una de las 25 estaciones efectivamente consideradas y para una de las nueve

duraciones establecidas. Para la asignación de probabilidades empíricas de no excedencia, se recurrió a la difundida fórmula de Weibull:

$$T = \frac{n + 1}{N} \quad (8)$$

donde:  $T$  es el periodo de retorno expresando en años,  $N$  es el número total de los valores de la muestra (20) y  $n$  la posición de un valor en la lista ordenada por magnitud descendente. Para el análisis de correlación se asumió válida una regresión lineal forzada a pasar

por cero entre las intensidades obtenidas a partir de las relaciones  $i_dT$  consideradas (intensidades reales  $i_r$ ) y las calculadas a partir de los datos PDIR-Now (intensidades virtuales  $i_v$ ):

$$i_v = r \cdot i_r \quad (9)$$

donde el coeficiente angular de la regresión, que puede interpretarse como la recíproca de un factor de corrección por sesgo, se obtuvo como:

$$r = \frac{\sum_{j=1}^N i_{rj} \cdot i_{vj}}{\sum_{j=1}^N i_{rj}^2} \quad (10)$$

De este modo, es posible obtener estimaciones corregidas de la intensidad  $i_c$ , a partir de los datos virtuales, como:

$$i_c = \frac{i_v}{r} \quad (11)$$

Para poder aplicar la ecuación (11) a otros sitios, fuera de las 25 estaciones efectivamente consideradas, se asumió que el factor de corrección por sesgo  $r$  es un campo continuo en el espacio, de modo que se implementaron técnicas de interpolación

espacial para la evaluación de dicho campo. A tal efecto, se utilizó una interpolación spline bilineal (Brovelli et al., 2004), implementado en el comando `v.surf.bspline` de GRASS GIS (Neteler y Mitasova, 2013), con un parámetro de tensión de 100, lo que

produjo desviaciones menores al 2% en los resultados corregidos para todas las estaciones consideradas, con excepción de la estación La Suela. El dominio geográfico de dicha interpolación se restringió a los polígonos de Voronoi de las 25 estaciones efectivamente consideradas, restringidos a los límites del territorio nacional; esto debido a que no se cuenta con suficientes relaciones idT para la región sur del país. Para el manejo de la información geoespacial, se recurrió al Sistema de Información Geográfica QGIS.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Análisis de correlación

En la Figura 2 se puede observar, para la estación Villa Dolores y a título de ejemplo, los gráficos de dispersión obtenidos para algunas duraciones de tormenta con sus correspondientes factores de corrección por sesgo  $r$  (pendiente de la recta) y coeficientes de determinación  $R^2$ . Con puntos se representan los distintos pares de intensidades Modelo DIT-PDIR-Now (datos *reales* versus datos *virtuales*), en línea continua color azul la recta identidad y en línea de puntos color negra la recta ajustada al conjunto de datos, según la expresión (9).

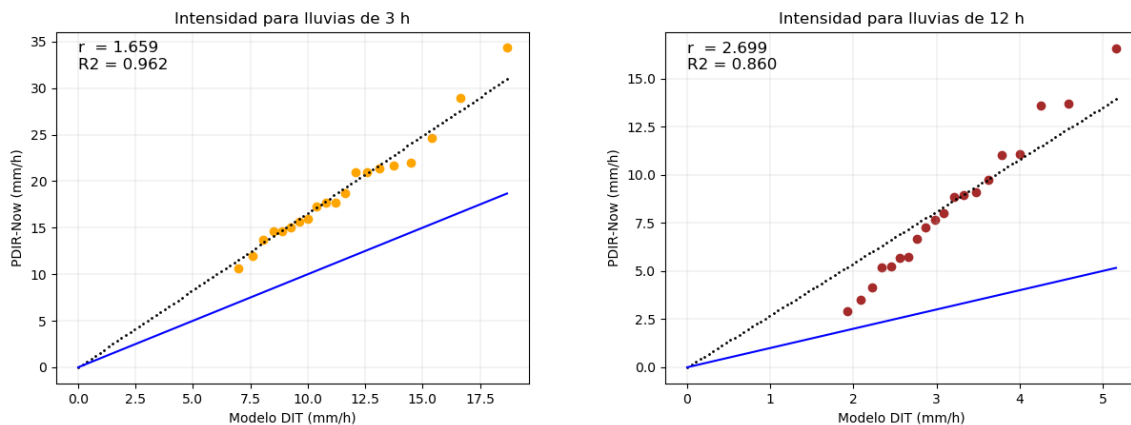


Figura 2. Correlación entre intensidades reales (Modelo DIT) y virtuales (PDIR-Now) para duraciones 3 y 12 h estación Villa Dolores.

Estas gráficas (junto con los coeficientes  $r$  y los estadísticos  $R^2$ ) fueron obtenidas para todas las duraciones y estaciones consideradas. En la Tabla 1 se muestran los coeficientes de corrección por sesgo ajustados.

### 4.2 Corrección por sesgo

Se observa (Figura 2) que el coeficiente de corrección por sesgo  $r$  de la ecuación (9) es función de la duración  $d$  considerada. Se graficó la variación de  $r$  en función de  $d$ , para cada estación. En la Figura 3 (izquierda) se presenta, a título de ejemplo, esta función para la estación Villa Dolores; mientras que en la misma figura, a la derecha, se presenta el gráfico de dispersión de intensidades reales versus virtuales, una vez realizada la corrección por sesgo (Ecuación 11), para todas las duraciones. Como puede observarse, se obtiene una significativa reducción de la dispersión.

### 4.3 Variabilidad espacial

Además de la variabilidad en función de la duración, el coeficiente de corrección por sesgo  $r$  de la ecuación (9) presenta una distribución espacial no uniforme. En la Figura 4 se presenta, como ejemplo, la interpolación spline bilineal antes descrita del factor  $r$  para dos duraciones, dentro del dominio geográfico cubierto por las estaciones efectivamente disponibles. Estos campos, expresados como rásters de la misma resolución que los DPDS utilizados ( $0.04^\circ \times 0.04^\circ$ ) se obtuvieron para las nueve duraciones consideradas. En esta figura puede apreciarse la restricción geográfica en la aplicación de la metodología propuesta, debido a la limitación en la información utilizada. La misma fue impuesta en base a los polígonos de Thiessen de las estaciones reales efectivamente utilizadas.



Tabla 1. Coeficientes de corrección por sesgo obtenidos

Estación	Duración (h)									
	1	2	3	4	6	9	12	18	24	
Villa_Dolores	1.009	1.395	1.659	1.905	2.229	2.577	2.699	2.793	2.844	
La_Suela	0.743	0.855	0.979	1.086	1.280	1.380	1.412	1.366	1.316	
Ceres	0.964	1.248	1.482	1.642	1.878	2.070	2.169	2.312	2.324	
Cordoba_Observatorio	0.909	1.087	1.262	1.421	1.688	1.918	2.005	2.106	2.109	
Rio_Cuarto	1.004	1.244	1.365	1.476	1.631	1.710	1.696	1.764	1.766	
Marcos_Juarez	0.845	1.090	1.280	1.423	1.603	1.692	1.728	1.715	1.741	
Laboulaye	0.916	1.176	1.396	1.569	1.830	2.084	2.225	2.387	2.443	
La_Rioja	1.037	1.134	1.144	1.174	1.157	1.097	1.042	0.964	0.922	
Observatorio_Central	0.930	1.247	1.472	1.634	1.936	2.213	2.328	2.446	2.503	
Rafaela	0.624	0.706	0.750	0.791	0.864	0.871	0.842	0.786	0.754	
Santa_Rosa	0.677	0.875	1.004	1.105	1.282	1.454	1.516	1.606	1.708	
Pergamino	0.997	1.237	1.468	1.673	1.933	2.191	2.282	2.364	2.430	
Tres_Arroyos	0.858	1.032	1.143	1.250	1.446	1.662	1.819	1.917	1.947	
Posadas	0.685	0.883	1.001	1.086	1.217	1.351	1.428	1.484	1.484	
Chapeton	0.707	1.011	1.271	1.529	1.958	2.522	2.892	3.320	3.644	
Famailla	0.573	0.712	0.838	0.906	0.972	1.016	1.004	0.970	0.964	
Resistencia	0.625	0.775	0.886	0.959	1.049	1.099	1.090	1.073	1.050	
Salta	0.715	0.861	0.957	1.071	1.192	1.268	1.254	1.194	1.159	
Formosa	0.646	0.817	0.925	1.020	1.136	1.175	1.182	1.141	1.079	
Rosario	0.742	0.916	1.077	1.210	1.376	1.540	1.622	1.628	1.699	
Santiago_del_Estero	0.928	1.097	1.283	1.428	1.589	1.598	1.534	1.428	1.371	
San_Miguel_de_Tucuman	0.779	0.961	1.077	1.122	1.161	1.173	1.120	1.015	0.976	
Concordia	0.866	1.110	1.317	1.462	1.631	1.755	1.788	1.747	1.804	
Concepcion_del_Uruguay	0.713	0.946	1.121	1.280	1.451	1.584	1.630	1.647	1.745	
Parana	0.831	1.045	1.148	1.228	1.358	1.540	1.598	1.595	1.611	

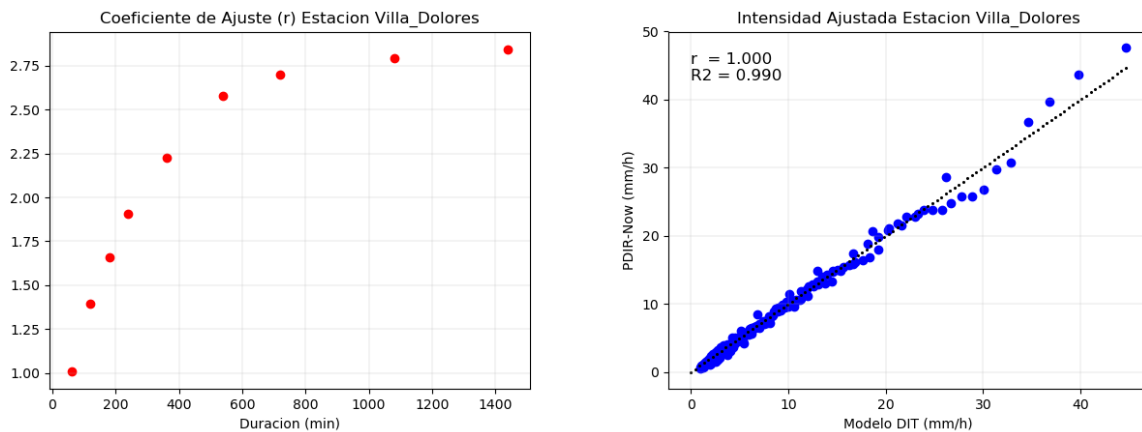


Figura 3. Corrección por sesgo - estación Villa Dolores



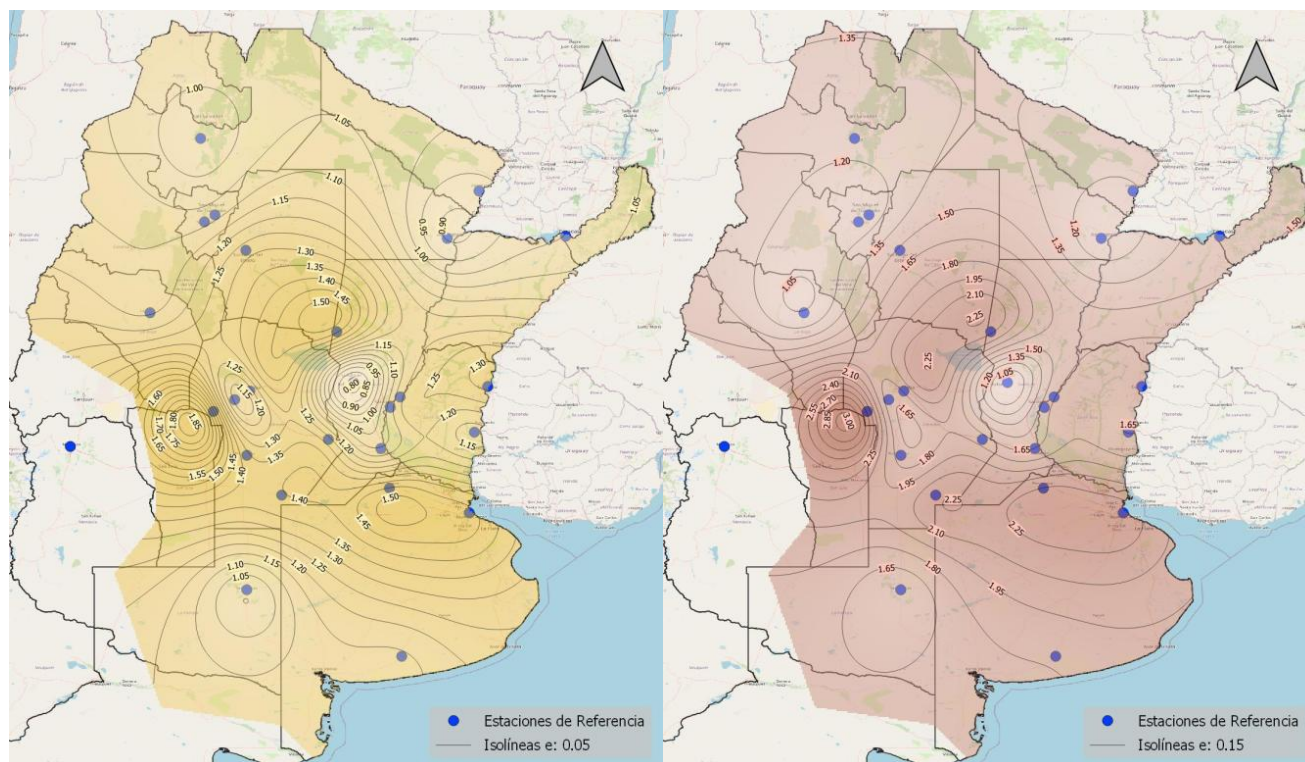


Figura 4. Campo interpolado del coeficiente de corrección por sesgo  $r$ , para  $d = 3$  h (izquierda) y 12 h (derecha)

#### 4.4 Metodología de aplicación

En base a los resultados presentados, se desarrolló una metodología para la obtención de relaciones  $i_dT$  para otros puntos del dominio geográfico considerado, según se detalla sintéticamente a continuación:

1. Adquisición, desde el portal de datos CRHS y para una duración determinada, de la serie virtual de precipitaciones en el sitio escogido.
2. A partir de los códigos desarrollados, definición del año hidrológico, extracción de la serie de intervalos de máxima anual (IMA) y determinación de las intensidades mediante la ecuación (7).
3. Asignación de periodos de retorno  $T$  a la serie ordenada de intensidades  $i$ . por medio de la ecuación (8): obtención de la función  $i(T)$ .
4. Determinación, a partir del campo interpolado correspondiente, del coeficiente de corrección por sesgo  $r$ , para la duración y el sitio considerados (Figura 4).
5. Corrección, mediante la ecuación (11), de la función  $i(T)$ .

6. El procedimiento anterior se repite para cada duración  $d$  a considerar, generando de esta forma la función  $i_dT$  correspondiente.

## 5. DISCUSIÓN

La ventaja de la metodología propuesta radica en la cobertura y resolución espacial de los DPDS utilizados, frente a la limitada distribución espacial que presentan las fuentes convencionales de datos como estaciones pluviométricas y/o pluviográficas. Con esto se espera obtener relaciones  $i_dT$  más representativas para amplias regiones del territorio nacional, en especial aquellas con ausencia de relaciones IDT obtenidas a partir de información de campo. Dado que los campos continuos de DPDS surgen de la observación directa de los sensores remotos, y no de la aplicación de técnicas de interpolación espacial a partir de puntos aislados, se espera que estos resultados describan mejor la variabilidad espacial de las lluvias de diseño, en especial en una geografía tan extendida como la argentina. Sin embargo, la cobertura espacial queda limitada por la disponibilidad de relaciones  $i_dT$  para la corrección presentada, al sector norte del país (Figura 4).

La facilidad de acceso, adquisición y procesamiento de las series de precipitaciones virtuales facilita la implementación de esta metodología. La corrección de las series de IMA a partir de campos continuos para el factor  $r$  permite tener en cuenta las relaciones idT existentes en el país, que representan los datos pluviográficos que les dieron origen. Se aplicó esta metodología a dos sitios de interés que no pertenecen al conjunto de estaciones consideradas: las ciudades de Villa María (Córdoba) y Balcarce (Buenos Aires). En el primer caso, Caamaño y Dasso (2003) presentan una estimación de la relación IDT a partir del modelo DIT antes mencionado; en el segundo

caso, Puricelli (2014) obtiene una relación idT a partir de datos de una estación meteorológica del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), junto con su intervalo de confianza. La Figura 5 (izquierda) muestra las relaciones idT para Villa María, calculadas a partir del modelo DIT, y estimadas por el presente trabajo, para cuatro periodos de retorno. Puede observarse que, si bien el orden de magnitud de las estimaciones es similar, existe cierta tendencia a la subestimación, en especial para duraciones menores (intensidades mayores), lo que se evidencia en la Figura 5 (derecha).

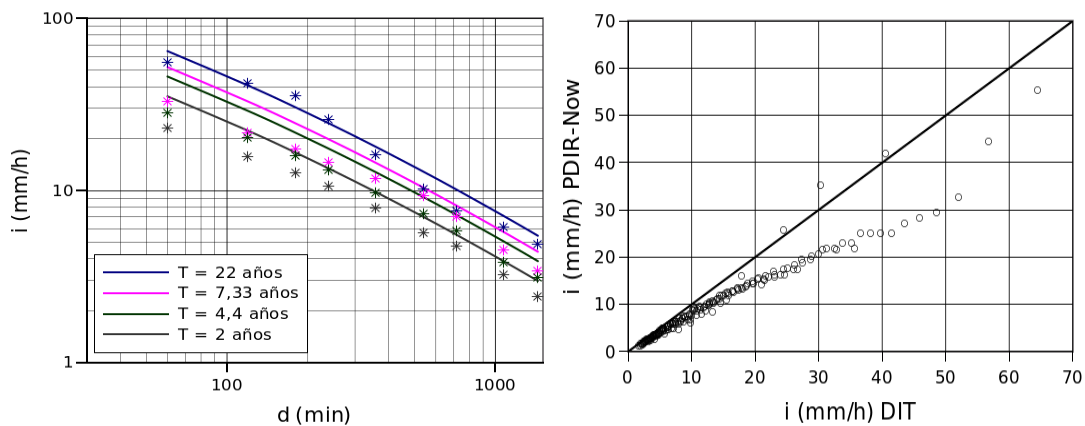


Figura 5. A la izquierda: relaciones idT para Villa María (Córdoba), obtenidas a partir del modelo DIT en base a los resultados publicados por Caamaño y Dasso (2003) (líneas continuas) y por el presente estudio (asteriscos \*). A la derecha: gráfico de dispersión de intensidades estimadas por el modelo DIT y por el presente estudio, para Villa María. La línea continua representa la función identidad

La Figura 6 muestra las relaciones idT para Balcarce presentadas por Puricelli (2014), junto con sus intervalos de confianza, y estimadas por el presente

trabajo, para tres periodos de retorno. Nuevamente se observan diferencias, en este caso en especial para duraciones mayores.

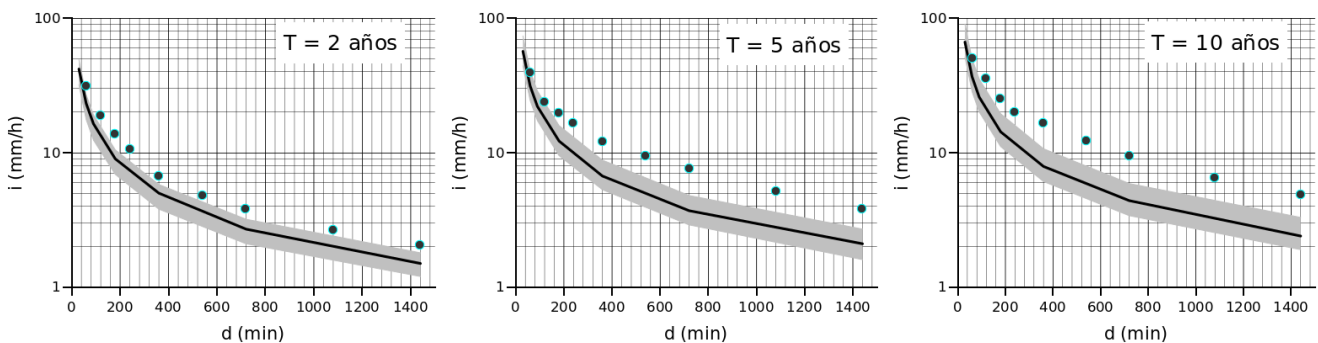


Figura 6. Relaciones idT para Balcarce (Buenos Aires), presentadas por Puricelli (2014), junto con sus intervalos de confianza (líneas continuas y áreas en color gris respectivamente), para recurrencias de 2, 5 y 10 años, y estimadas por el presente estudio (puntos)

Los métodos de interpolación evaluados no consideran la influencia del medio geográfico, en términos de variables tales como la orografía, variables climáticas, etc., en la distribución espacial del coeficiente  $r$  y, por lo tanto, de las relaciones idT obtenidas por la presente metodología, siendo una causa probable de las diferencias observadas en los casos de validación considerados; además de la propia incertidumbre en las relaciones idT contrastadas (Figura 6). A pesar de las limitaciones indicadas, se considera que los DPDS permiten estimar relaciones Intensidad-Duración-Recurrencia (idT) comparables a las obtenibles a partir de información pluviográfica.

## 6. RECOMENDACIONES

En este trabajo se generó un campo interpolado del coeficiente de corrección por sesgo  $r$  para cada una de las duraciones consideradas; sin embargo, como puede observarse en la Figura 3 (izquierda) existe una evidente relación funcional  $r(d)$  (que se repite en todas las estaciones consideradas) por lo que se recomienda buscar una expresión analítica simple para esta dependencia funcional. Lo anterior se justifica en que se evidencia una relación biunívoca entre el coeficiente  $r$  y la duración  $d$ , para todos los casos considerados (Tabla 1). Esto permitiría, por un lado, evaluar dicho coeficiente para otras duraciones, incluso fuera del intervalo considerado; y por otro lado, explorar la distribución espacial de los parámetros de esta función, de modo de basar la metodología en un número menor de campos raster para la corrección de los datos de precipitación derivados de satélites. A partir de esto último será posible generar sintéticamente mapas para la relación idT para el sector del territorio nacional considerado, que serán de utilidad en tareas de diseño hidrológico, en especial en sitios con ausencia de información. Sin

embargo, las incertidumbres presentadas en los casos de validación (Figuras 5 y 6) sugieren que aún deben mejorarse los mapas de corrección por sesgo  $r$ , considerando una eventual dependencia funcional de este parámetro con aspectos geográficos o climáticos, intentando superar las limitaciones de los campos interpolados presentados (Figura 4). Lo anterior se justifica en el hecho que tanto la orografía como el clima inciden en la distribución espacial de las precipitaciones, y por tanto de las precipitaciones máximas. A medida que se amplíe la cobertura temporal de los DPDS, se recomienda extender las series de IMA para cubrir periodos de retorno más extensos, usuales en muchas aplicaciones del diseño hidrológico. Se recomienda además explorar la posibilidad de ajustar estos valores de la relación idT mediante expresiones como las del método de Devoto (2002), el modelo DIT (Caamaño y Dasso, 2003) o la difundida ecuación de Sherman (Chow et al., 1994) lo que permitirá evaluar los resultados en otros periodos de retorno; esto se justifica en el hecho de que para diversas tareas de diseño hidrológico es necesario estimar precipitaciones asociadas a periodos de retorno mayores a los empíricamente establecidos en el presente trabajo. Finalmente, se recomienda explorar la aplicabilidad de la metodología desarrollada en otras zonas con escasez de información pluviográfica para la regionalización de relaciones idT.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Tecnológica Nacional por el financiamiento recibido a través del proyecto UTN 4779, y al Consejo Interuniversitario Nacional por el financiamiento recibido a través del Programa de Becas Estímulo a las Vocaciones Científicas.

## REFERENCIAS

- Brovelli, M. A., Cannata, M., & Longoni, U. M. (2004). LIDAR Data Filtering and DTM Interpolation Within GRASS. *Transactions in GIS*, 8(2), 155–174. doi:10.1111/j.1467-9671.2004.00173.x
- Caamaño Nelli, G. y C. M. García (1999). Relación intensidad-duración-recurrencia de lluvias máximas: enfoque a través del factor de frecuencia – caso lognormal. *Ingeniería Hidráulica en México*, 14(3), 37-44.
- Caamaño Nelli, G., & Dasso, C. (2003). *Lluvias de Diseño: conceptos, técnicas y experiencias*. Ed. Científica Universitaria, Córdoba. ISBN:

- Caamaño Nelli, G., Dasso, C. M., Rico, A., y Colladon, L. (2010). Una aproximación de tres parámetros a la relación intensidad-duración-recurrencia de lluvias máximas. III Congreso Internacional sobre Gestión y Tratamiento Integral del Agua. Córdoba, Argentina.
- Chow, V. T., Maidment, D. R. & Mays, L. W. (1994). Hidrología Aplicada. Mc Graw Hill, Santa Fe de Bogotá. ISBN: 978-9-5860-0171-7
- Devoto, G.A. (2002). Regionalización de Lluvias Intensas en Argentina. XIX Congreso Nacional del Agua, Villa Carlos Paz, Córdoba, Argentina.
- Farias, H.D. y Olmos, L.A. (2007) Validación de Relaciones IDF Generalizadas a Nivel Regional en el Norte Argentino. XXI Congreso Nacional del Agua. Conagua 2007. Tucumán.
- Neteler, M., & Mitasova, H. (2013). Open source GIS: a GRASS GIS approach. Springer Science & Business Media, New York. ISBN: 978-0-3876-8574-8
- Nguyen, P., Ombadi, M., Gorooh, V.A., Shearer, E.J., Sadeghi, M., Sorooshian, S., Hsu, K., Bolvin, D. & Ralph, M. F. (2020). PERSIANN Dynamic Infrared-Rain Rate (PDIR-Now): A Near-real time, Quasi-Global Satellite Precipitation Dataset. Journal of Hydrometeorology. 21(12), 2893–2906. doi: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-20-0177.1>
- Nguyen, P., Shearer, E.J., Tran, H., Ombadi, M., Hayatbini, N., Palacios, T., Huynh, P., Updegraff, G., Hsu, K., Kuligowski, B., Logan, W.S., & Sorooshian S. (2019). The CHRS Data Portal, an easily accessible public repository for PERSIANN global satellite precipitation data. Nature Scientific Data, 6, Article 180296. doi: <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.296>
- Puricelli, M. (2014). Actualización y análisis de las curvas intensidad–duración–frecuencia para la localidad de Balcarce, provincia de Buenos Aires, Argentina. Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente, (32), 61-70. <https://www.editoresasagai.org.ar/ojs/index.php/rgaia/article/view/81>
- Rico, A. F., Dasso, C., Caamaño Nelli, G. y M. García (2010). Regionalización de parámetros de un Modelo para Predicción de Lluvias Máximas. I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. Azul, Buenos Aires Argentina.
- Rühle, F.G.O. (1966). Determinación del Derrame Máximo Superficial de las Cuencas Imbríferas, Revista La Ingeniería (987), Centro Argentino de Ingenieros, Bs. As., Argentina.
- Sun, Q., Miao, C., Duan, Q., Ashouri, H., Sorooshian, S., & Hsu, K. L. (2018). A review of global precipitation data sets: Data sources, estimation, and intercomparisons. Reviews of Geophysics, 56(1), 79-107. doi: <https://doi.org/10.1002/2017RG000574>
- Tucci, C. M. (1993). Hidrologia: Ciência e Aplicação. Editora da Universidade, UFRGS, Rio Grande do Sul. ISBN: 978-857-02-5924-0
- Vidal, L., Salio, P., & Pappalardo, L. (2012). Uso combinado de datos TRMM/PR y disdrómetro para corrección de reflectividad de radares meteorológicos en Argentina. Primer Encuentro de Jóvenes Investigadores en Recursos Hídricos - IFRH 2012. Ezeiza, Buenos Aires, Argentina.
- Weber, J. F., Stehli, P. T. & Bogino Castillo, G. A. (2023). Estimación de las Precipitaciones Diarias de Diseño en Argentina a partir de Datos Derivados de Satélite. Tecnología y Ciencias del Agua, 14(3). En prensa.
- Zamanillo, E., Larenze, G., Tito, M. J., Pérez, M. & Garat, M. E. (2008). Tormentas de diseño para la provincia de Entre Ríos. Univ. Tecnológica Nacional, Buenos Aires. ISBN 978-950-42-0109-0.

*Las denominaciones que se emplean en esta publicación y la presentación de los datos que en ella figuran no suponen por parte de la UNESCO la adopción de postura alguna en lo que se refiere al estatuto jurídico de los países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni en cuanto a sus fronteras o límites. Las ideas y opiniones expresadas en esta publicación son las de los autores y no representan, necesariamente, el punto de vista de la UNESCO, y no comprometen a la Organización.*



Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International  
CC BY-NC-SA 4.0 license