

**ADAPTACIÓN DEL MÉTODO PROPUESTO POR FAO PARA EVALUAR LA
EVAPOTRANSPIRACION REAL EN EL MODELO DE SIMULACION HIDROLOGICA SHALL.**

**ADAPTATION OF THE FAO'S METHOD TO ASSESS REAL EVAPOTRANSPIRATION IN THE
SHALL HYDROLOGICAL SIMULATION MODEL.**

Erik Zimmermann⁽¹⁾⁽²⁾

⁽¹⁾Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales, Facultad de Ciencias Exactas,
Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario. Rosario, Santa Fe, Argentina.

⁽²⁾Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Argentina.

email: erikz@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

Considerando la predominancia del sentido vertical en los flujos de intercambio entre componentes hidrológicos de los sistemas de llanura y, consecuentemente, la preponderancia de la evapotranspiración como proceso, se presenta una adaptación de la metodología propuesta por FAO a las variables empleadas por el modelo hidrológico SHALL, apto para simulación continua en áreas de llanura. El modelo es hidrodinámico cuasi-3D, que contempla las componentes subterránea y superficial de flujos de agua, conjuntamente con los flujos verticales hacia el acuífero y la atmósfera. El modelo ha sido aplicado en sistemas abiertos del sur santafesino y en sistemas cerrados pampeanos y actualmente se está implementando en áreas deprimidas bonaerenses. Para la adaptación se propone una estimación de saturaciones efectivas extremas conforme a las curvas de retención de humedad ajustadas con la fórmula de Brooks-Corey. Siguiendo los lineamientos de la publicación FAO N° 56, se presenta una estimación de la saturación efectiva límite para la cual por debajo de la misma las coberturas vegetales comienzan a restringir el abastecimiento de la evapotranspiración potencial, y del coeficiente de estrés hídrico en función de las saturaciones límites calculadas, para estimar, finalmente, la evapotranspiración real en función de variables que contempla el modelo SHALL.

Palabras clave: adaptación método FAO, evapotranspiración, llanura, modelo SHALL.

ABSTRACT

Considering the predominance of the vertical direction in the exchange flows between hydrological components of the plain systems and, consequently, the preponderance of evapotranspiration as a process, an adaptation of the methodology proposed by FAO to the variables used by the SHALL hydrological model is presented. This model is suitable for continuous simulation in plain areas. The model is quasi-3D hydrodynamic, which considers the underground and surface components of water flows, together with the vertical flows towards the aquifer and the atmosphere. The model has been applied in open systems in the south of Santa Fe province and closed systems in the La Pampa province and is currently being implemented in depressed areas of Buenos Aires province. For the adaptation, an estimate of extreme effective saturation is proposed according to the moisture retention curves adjusted with Brooks-Corey formula. Following the guidelines of the publication FAO No. 56, an estimate of the effective limit saturation is presented for which, below it, the vegetal covers begin to restrict the supply of potential evapotranspiration, and the coefficient of hydric stress based on the calculated limit saturations, to estimate, finally, the real evapotranspiration based on variables contemplated by the SHALL model components.

Keywords: FAO method adaptation, evapotranspiration, flatland, SHALL model.

INTRODUCCIÓN

La morfología de los sistemas hidrológicos emplazados en áreas de llanura condiciona los procesos que se desarrollan allí y el modelo conceptual requerido para describirlos (Kovacs, 1983; Tricart, 1983). Hay un aspecto clave en el funcionamiento hidrológico de esos sistemas que es la marcada interacción de la hidrología superficial con la subterránea. En función de los niveles freáticos, los excedentes hídricos pueden incorporarse al perfil del suelo o generar derrames y acumulación superficial de consideración. La zona no saturada (ZNS) representa la interfaz entre los procesos superficiales y subterráneos, y la estimación correcta de los flujos de intercambio entre ambos ambientes a través de ella es crucial a la hora de realizar simulaciones mediante modelos hidrológicos en áreas de llanura (Kruse y Zimmermann, 2002).

Otro aspecto dominante es el sentido vertical de los flujos de intercambio entre sus componentes, entre los que se encuentran procesos preponderantes tales como infiltración, evaporación y evapotranspiración (Fertonani y Prendes, 1983; Caamaño Nelli y Zimmermann, 1990).

Como una alternativa aplicable a estos sistemas se han desarrollado esquemas de modelación, basados en celdas interconectadas representativas de los ambientes que intercambian materia, energía e información. Un ejemplo de esto es el modelo de Simulación Hidrológica de Áreas de Llanura, SHALL (Zimmermann y Riccardi, 2000). El modelo es hidrodinámico cuasi-3D, que contempla las componentes subterránea y superficial de flujos de agua, conjuntamente con los flujos verticales hacia el acuífero y la atmósfera. En cada celda o unidad de discretización espacial, el modelo SHALL puede cuantificar dinámicamente variables de estado (almacenamientos por intercepción, superficial, en el perfil del suelo y subterráneo) y flujos de intercambio (evapotranspiración, ascenso capilar, escurrimiento superficial, mantiforme y encauzado, a superficie libre y a través de constricciones -puentes, alcantarillas, sobrepaso de terraplenes, etc.-, infiltración, percolación profunda y escurrimiento subterráneo). La aptitud de conectar la hidrología de superficie con la subterránea, lo habilita para realizar predicciones acerca de evoluciones en los procesos hidrológicos provocados por acciones antrópicas a escala de cuenca y en el largo plazo.

El modelo ha sido aplicado en sistemas abiertos del sur santafesino (Zimmermann y Riccardi, 2003; Méndez Zacarías y Zimmermann, 2011) y sistemas cerrados pampeanos (Zimmermann y Mecca, 2010).

Actualmente se está constituyendo el modelo en un sector deprimido de la cuenca del arroyo del Azul, que conforma la vertiente sur del río Salado (provincia de Bs. As.). Es aquí donde los procesos de evaporación y transpiración de la cobertura vegetal se manifiestan fuertemente, convirtiéndose en una de las principales salidas del sistema.

Con el fin de obtener resultados más representativos de estos procesos hidrológicos e incorporar nuevas fórmulas ya probadas y recomendadas se presenta aquí una adaptación de la metodología propuesta por la *Food Agriculture Organization* (FAO, Naciones Unidas) para la estimación de la evapotranspiración real utilizando los parámetros del modelo SHALL.

La metodología comprende la estimación del factor de estrés hídrico, K_d , considerando diferentes tipos de coberturas, contenido de humedad de la zona no saturada activa en términos de saturación de humedad efectiva del suelo, pudiendo incorporarse otras variables que puedan condicionar el proceso de evapotranspiración (p.ej. contenido salino del suelo).

METODOLOGÍA PROPUESTA POR FAO

El procedimiento, fue presentado por primera vez en la publicación de la Serie de Riego y Drenaje de la FAO N° 24 «Las Necesidades de Agua de los Cultivos», denominado como el enfoque de « $K_c E_{To}$ », donde los efectos del clima sobre los requerimientos de agua del cultivo vienen reflejados en la evapotranspiración del cultivo de referencia E_{To} y el efecto del cultivo se incorpora en el coeficiente del cultivo K_c . Recientemente se han actualizado los contenidos con una nueva publicación, denominada FAO N° 56 (Allen et al., 2006) donde se vuelve a sugerir el uso del método de Penman-Monteith para la estimación de la evapotranspiración, dando pautas para situaciones con escasa información meteorológica.

Para el método de Penman-Monteith se define el cultivo de referencia como un cultivo hipotético con una altura asumida de 0,12 m, con una resistencia de la superficie de 70 s m^{-1} y un albedo de 0,23, lo que asemeja a la evaporación que ocurre en una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo

activamente y bien regada, la que se toma como referencia. Se han desarrollado procedimientos y recomendaciones para la utilización del método con datos climáticos limitados, eliminando por lo tanto la necesidad de utilizar otros métodos para la estimación de la evapotranspiración y creando una base consistente y transparente para una estandarización universal de los cálculos de los requerimientos de agua de los cultivos (Allen et al., 2006).

En el enfoque del «Kc ETo», las diferencias en la vegetación del cultivo y en la resistencia aerodinámica, con respecto al cultivo de referencia, resultan consideradas en el coeficiente del cultivo, Kc, el cual sirve como una integración de todas las diferencias físicas y fisiológicas entre los cultivos.

En la publicación de referencia se presentan varios procedimientos de ajustes al coeficiente del cultivo que toman en cuenta las desviaciones de las condiciones de desarrollo del cultivo con respecto a las condiciones estándar, tales como la presencia de estrés hídrico y salino, baja densidad de plantas, factores ambientales y las prácticas de manejo del cultivo.

Restricciones por estrés hídrico

Las fuerzas que actúan sobre el agua presente en el suelo disminuyen su energía potencial y la hacen menos disponible para su extracción por parte de las raíces de las plantas. Cuando el suelo se encuentra húmedo, el agua presente tiene una energía potencial alta, teniendo libertad de movimiento y pudiendo ser extraída fácilmente por las raíces de las plantas. En suelos secos el agua tiene una energía potencial baja, siendo retenida fuertemente por fuerzas capilares y de adsorción a la matriz del suelo, lo que la hace menos extraíble por el cultivo. Cuando la energía potencial del agua del suelo cae por debajo de cierto valor umbral, se dice que el cultivo se encuentra estresado (Allen et al., 2006). Los efectos del estrés hídrico son incorporados al multiplicar el coeficiente basal del cultivo por el coeficiente de estrés hídrico, Kd (se ha modificado la nomenclatura original del trabajo de referencia para evitar confusiones.)

$$ETc_{aj} = Kd Kc ETo \quad (1)$$

El total de agua disponible, ADT, en la zona radicular es la diferencia entre los contenidos de humedad a capacidad de campo y el punto de marchitez permanente:

$$ADT = 1000(\theta_{CC} - \theta_{PMP}) Z_r \quad (2)$$

donde ADT está dado en (mm), θ_{CC} contenido de humedad a capacidad de campo ($m^3 m^{-3}$), θ_{PMP} contenido de humedad en el punto de marchitez permanente ($m^3 m^{-3}$), Z_r profundidad de las raíces (m).

A medida que disminuya la cantidad de humedad en el suelo, el agua será retenida más fuertemente a la matriz del suelo y será más difícil de extraer. Cuando el contenido de humedad del suelo esté por debajo de cierto valor umbral, el agua del suelo no podrá ser transportada hacia las raíces con la velocidad suficiente para satisfacer la demanda de transpiración y el cultivo comenzará a sufrir de estrés. La fracción de ADT que un cultivo puede extraer de la zona radicular sin experimentar estrés hídrico es denominada agua fácilmente aprovechable en el suelo, AFA:

$$AFA = p ADT \quad (3)$$

donde AFA (mm), p fracción promedio del total de agua disponible en el suelo (ADT) que puede ser agotada de la zona radicular antes de presentarse estrés hídrico.

El factor p varía de un cultivo a otro, normalmente entre 0,30 para plantas de raíces poco profundas, a tasas altas de ETc ($> 8 mm d^{-1}$), hasta 0,70 para plantas de raíces profundas y tasas bajas de ETc ($< 3 mm d^{-1}$). Un valor de 0,50 para p es utilizado comúnmente para una gran variedad de cultivos (Allen et al., 2006).

Coefficiente de estrés hídrico, Kd

Los efectos del estrés hídrico sobre el valor de la ET del cultivo se reflejan mediante la reducción del valor del coeficiente del cultivo. Esto se logra al multiplicar el valor del coeficiente del cultivo por el coeficiente de estrés hídrico Kd (ecuación 1). El contenido de humedad en la zona radicular puede ser expresado en función del agotamiento de humedad en la zona radicular, Dr, es decir la cantidad de agua faltante con respecto a la capacidad de campo. En capacidad de campo, el agotamiento en la zona radicular es igual a cero ($Dr = 0$). Cuando se produce la extracción del agua a través de la evapotranspiración, aumentará el agotamiento de humedad y se iniciarán las situaciones de estrés cuando el valor de Dr sea igual a AFA. Después de que el agotamiento en la

zona radicular exceda a AFA (o sea, el contenido de agua es menor al valor umbral, θ_p), el agotamiento será lo suficientemente alto como para limitar la evapotranspiración a valores menores que su potencial, por lo que la evapotranspiración del cultivo comenzará a disminuir en proporción (lineal) a la cantidad de agua remanente en la zona radicular. Si $Dr > AFA$, se propone que:

$$K_d = \frac{ADT - Dr}{ADT - AFA} = \frac{ADT - Dr}{(1-p)ADT} \quad (4)$$

EL MODELO SHALL

En el modelo SHALL se simula el movimiento y redistribución del agua en la zona no saturada (ZNS) mediante un esquema numérico basado en la ecuación de Richards. Bajo este esquema numérico también se determinan los montos de agua intercambiados con la atmósfera, mediante evapotranspiración, y el acuífero. El esquema se ha adaptado y validado para condiciones freáticas someras, típicas de las llanuras pampeanas (Zimmermann, 2021).

Vale decir que el proceso de evapotranspiración llevado a cabo por la cobertura vegetal es considerado como una condición de contorno en el extremo superior de la ZNS. La desecación como condición de borde superior contempla a la lámina interceptada como primer almacenamiento que satisface la demanda de evaporación potencial y en segundo término la lámina almacenada en superficie (si existen). Se establece una interacción entre procesos superficiales y subsuperficiales, para los períodos sin lluvia. Si los montos almacenados en superficie no alcanzan para cubrir la demanda se extrae agua del suelo por transpiración vegetal.

Para analizar el movimiento del agua en la ZNS deben conocerse parámetros del suelo tales como las curvas de conductividad hidráulica $K(\theta)$, y de retención de humedad $\psi(\theta)$. En el modelo se han adoptado las relaciones de Brooks-Corey (1964), representadas por las siguientes ecuaciones:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \begin{cases} \left(\frac{\psi_c}{\psi}\right)^\lambda & \text{si } \rightarrow |\psi| \geq |\psi_c| \\ 1 & \text{si } \rightarrow |\psi| < |\psi_c| \end{cases} \quad (5)$$

donde θ_r y θ_s son los contenidos de humedad

correspondientes a humedades residual y de saturación, respectivamente, λ es un parámetro que depende de la distribución de los tamaños de poros del suelo, ψ_c es la succión crítica (presión de entrada de aire) y S_e es la saturación efectiva. Para la estimación de la conductividad hidráulica relativa, $K_r = K(\theta)/K_s$, siendo K_s la conductividad hidráulica saturada, se utiliza la ecuación siguiente:

$$K_r = \frac{K}{K_s} = S_e^{(2+\lambda)} \quad (6)$$

Estimación de la evapotranspiración en la formulación original del SHALL

El modelo adoptado para estimar la evapotranspiración real es el de Feddes (1982). Allí se asume que la tasa real de evapotranspiración es limitada por un factor β función del potencial mátrico del suelo ψ ($0 < \beta(\psi) < 1$). La función β es nula por debajo de un potencial $\psi_1 = 0$ debido a la deficiencia de oxígeno donde el suelo se encuentra en estado de saturación y por debajo de un valor ψ_4 equivalente a una humedad de punto de marchitez permanente. Es máxima ($\beta(\psi) = 1$) entre los valores de potencial equivalente a la capacidad de campo ψ_2 y un potencial ψ_3 el cual depende de la tasa máxima de evapotranspiración. Entre $\psi_1 - \psi_2$ y $\psi_3 - \psi_4$ se proponen relaciones lineales.

Adaptación del método propuesto por FAO al modelo SHALL

Durante las simulaciones, la evolución de los almacenamientos de agua en la ZNS se evalúa en términos de saturación efectiva o contenidos de humedad, no en láminas almacenadas como se presentan en la metodología de FAO.

Dado que las humedades se expresan en términos de la saturación efectiva, S_e , deben expresarse los límites de humedades, θ_{CC} y θ_{PMP} , y almacenamientos, ADT y AFA, en función de la misma. Conocida la curva de retención $\psi(\theta)$, o bien, $\psi(S_e)$ la cual es parametrizada en cada celda del dominio, las saturaciones efectivas respectivas a los límites de humedades que definen ADT se obtienen a partir de las mismas:

$$h_{dt} = ADT / 1000 Z_r \quad (7)$$

$$h_{fa} = AFA / 1000 Z_r = p h_{dt} \quad (8)$$

$$\theta_p = (1-p)(\theta_{CC} - \theta_{PMP}) + \theta_{PMP} \quad (9)$$

Siendo h_{dt} y h_{fa} los rangos de humedad definidos por FAO para el total de agua disponible y extraíble con facilidad, respectivamente, y θ_p el contenido de humedad por debajo del cual comienza el estrés de la cobertura (Figura 1).

Sabiendo por definición que un tenor de humedad en condiciones de capacidad de campo representa una succión de 33 cm y en condiciones de marchitez permanente 15 bares o aproximadamente 150 m de succión, se tiene que:

$$S_{eCC} = \frac{\theta_{CC} - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{\psi_c}{0,33} \right)^\lambda \quad (10)$$

$$S_{ePMP} = \frac{\theta_{PMP} - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{\psi_c}{150} \right)^\lambda \quad (11)$$

$$S_{ep} = \frac{\theta_p - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = (1-p)S_{eCC} + pS_{ePMP} \quad (12)$$

Con estos parámetros transformados, siguiendo el método de FAO, el coeficiente de estrés K_d puede esquematizarse en función del contenido de humedad o la saturación efectiva como (Figura 1):

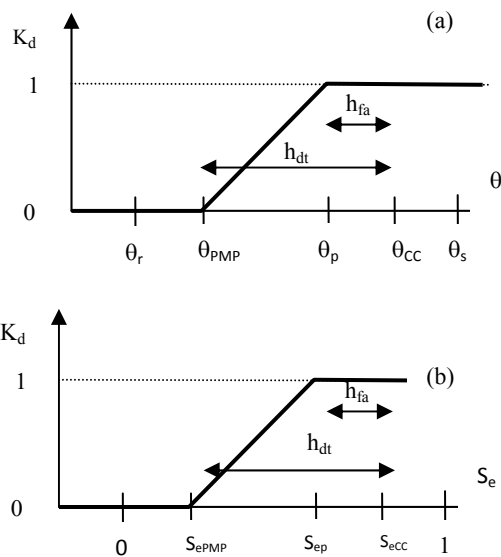


Figura 1. Coeficiente de estrés hídrico, K_d , en función de los contenidos de humedad (a) y de las saturaciones efectivas (b)

En síntesis y adaptando el método ofrecido por FAO a los términos del modelo, el coeficiente de estrés hídrico, K_d , puede expresarse como:

$$K_d = \begin{cases} 0 & S_e < S_{ePMP} \\ \frac{S_e - S_{ePMP}}{S_{ep} - S_{ePMP}} & S_{ePMP} < S_e < S_{ep} \\ 1 & S_{ep} < S_e \end{cases} \quad (13)$$

Esta ecuación se ha incorporado en el módulo que determina la evapotranspiración real del modelo SHALL.

Respecto a la metodología originaria empleada en el modelo, si bien ambas formulaciones son de carácter empírico, se considera que esta propuesta presenta dos importantes ventajas, a saber:

- conjuga un mayor número de experiencias de campo acumuladas en más de 20 años respecto a la primigenia, publicadas por un organismo reconocido como la FAO,
- los parámetros están estudiados y publicados para numerosos tipos de cultivos desarrollados en todo el mundo. Particularmente, respecto a la formulación original, elimina la incertidumbre del parámetro ψ_3 propuesto en el modelo de Feddes sobre el cual no hay definiciones precisas.

CONCLUSIONES

Se presenta como objetivo adaptar la metodología para estimar la evapotranspiración real propuesta FAO a las variables empleadas por el modelo hidráulico-hidrológico SHALL, apto para simulación continua en áreas de llanura.

Se propone una estimación de saturaciones efectivas extremas, desde un punto de vista agrológico, capacidad de campo y punto de marchitez permanente, conforme a las curvas de retención ajustadas con la fórmula de Brooks-Corey.

Siguiendo los lineamientos del método propuesto por FAO, se presenta una estimación de la saturación efectiva límite para la cual por debajo de la misma las coberturas vegetales comienzan a restringir el abastecimiento de la evapotranspiración potencial, y del coeficiente de estrés hídrico en función de las saturaciones límites calculadas, para estimar, finalmente, la evapotranspiración real en función de variables que contempla el modelo SHALL.

Respecto a la formulación originaria empleada en el modelo se considera que esta propuesta presenta ventajas comparativas respecto a los parámetros involucrados y la experiencia recogida y publicada por un organismo reconocido como la FAO.

BIBLIOGRAFIA

- Allen R., Pereira, L., Raes D., Smith, M. (2006). FAO. Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. FAO. Riego y Drenaje N° 56. ISSN 0254-5293. © FAO 2006.
- Brooks, R.H. and Corey, A.T. (1964) Hydraulic Properties of Porous Media and Their Relation to Drainage Design. *Transactions of the ASAE*, 7, 26-28. <https://doi.org/10.13031/2013.40684>
- Caamaño Nelli, G. y Zimmermann, E. (1990). Tipología de los Sistemas Hidrológicos Superficiales. *XVI Congreso Nacional Asociación Argentina Geofis. y Geod.*. Bahía Blanca. Argentina.
- Feddes, R.A. (1982). *Simulation of plant growth and crop production*. Ed.: Penning de Vries, F.W.T., van Laar, H.H. Wageningen. ISBN 9789022008096 - p. 194 - 209.
- Fertonani, M., y Prendes, H. (1983) Hidrología en áreas de llanura. Aspectos Conceptuales Teóricos y Metodológicos. *Coloquio de Hidrología de Grandes Llanuras*. Olavarría. Argentina.,1, p 119-156.
- Kovacs, G. (1983). General Principles of Flatlands Hydrology. *Coloquio de Hidrología de Grandes Llanuras*. Olavarría. Argentina, p 297-357.
- Kruse, E. y Zimmermann, E. (2002). Hidrogeología de grandes llanuras. Particularidades en la llanura pampeana (Argentina). In: *Workshop publication on Groundwater and Human development* (pp. 2025-2038).
- Méndez Zacarías J. y Zimmermann E. (2011). Uso de Sistemas de Información Geográfica para Parametrización de Modelos de Simulación Hidrológica en Llanuras. *XXIII Congreso Nacional del Agua y VI Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur*. Resistencia. Argentina.
- Tricart, J. (1983) L'Hydrologie des Grans Plains, Quelques Reflexions Methodologiques. *Coloquio de Hidrología de las grandes Llanuras*. Olavarría, Argentina, 2, p 1191-1193.

Zimmermann E. y Riccardi, G. (2000) Modelo de simulación hidrológica superficial para áreas de llanura. *XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Córdoba. Argentina.

Zimmermann, E. y Riccardi, G. (2003). Modelo hidrológico superficial y subterráneo desarrollado para la simulación de sistemas de llanura. 1. Aplicación en el sistema Ludueña (Santa Fe, Argentina). *Boletín Geológico y Minero*, 114(2), 147-158.

Zimmermann E. y J. Mecca (2010). Aplicación del modelo SHALL en los sistemas hidrológicos de las lagunas don Tomás y bajo Giuliani (La Pampa, Argentina) para la evaluación de impactos provocados por efluentes y escurrimientos. *I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras*. Azul, Buenos Aires, Argentina.

Zimmerman, E. (2021). Esquema explícito para la solución numérica del flujo no saturado en medios heterogéneos bajo condición de niveles freáticos someros. *Cuadernos del CURIHAM*. Vol. 27, p 47-58. doi: <https://doi.org/10.35305/curiham.v27i.169>

Tipo de Publicación: ARTICULO.

Trabajo recibido el 18/06/2022 y aprobado para su publicación el 21/11/2022.

COMO CITAR

Zimmermann, E. (2022). Adaptación del Método Propuesto por FAO para Evaluar la Evapotranspiración Real en el Modelo de Simulación Hidrológica SHALL. *Cuadernos del CURIHAM*, 28, 59-64. DOI: <https://doi.org/10.35305/curiham.v28i.185>

Este es un artículo de acceso abierto bajo licencia: Creative Commons Atribución -No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>)

