INTRODUCCIÓN A LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA: MODELO GR4J

Edición 2025

Alejandra De Vera

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA)
Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay

adevera@fing.edu.uy

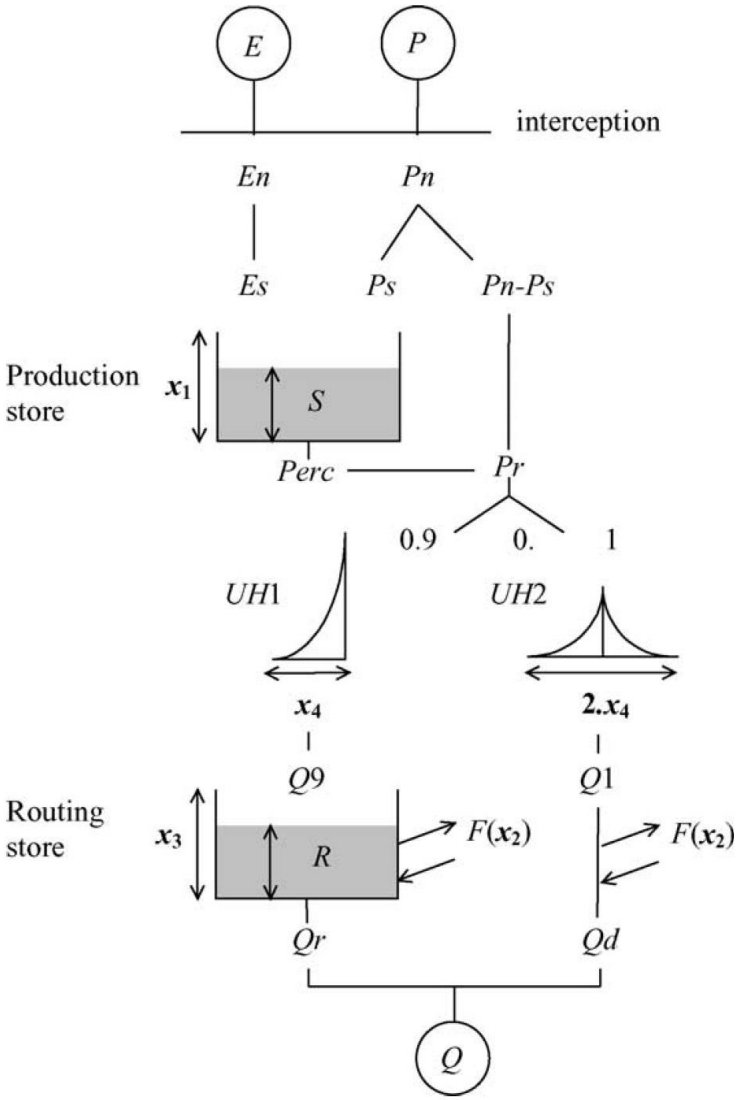
MODELO GR4J

- GR4J: Modèle du “Génie Rural à 4 paramètres Journalier”
- Propuesto y mejorado por INRAE, UR HYCAR Équipe Hydrologie de Francia (Perrin et al., 2003).
- Página web oficial: https://webgr.inrae.fr/webgr-eng/tools/hydrological-models/daily-hydrological-model-gr4j

MODELO GR4J

Estructura del modelo

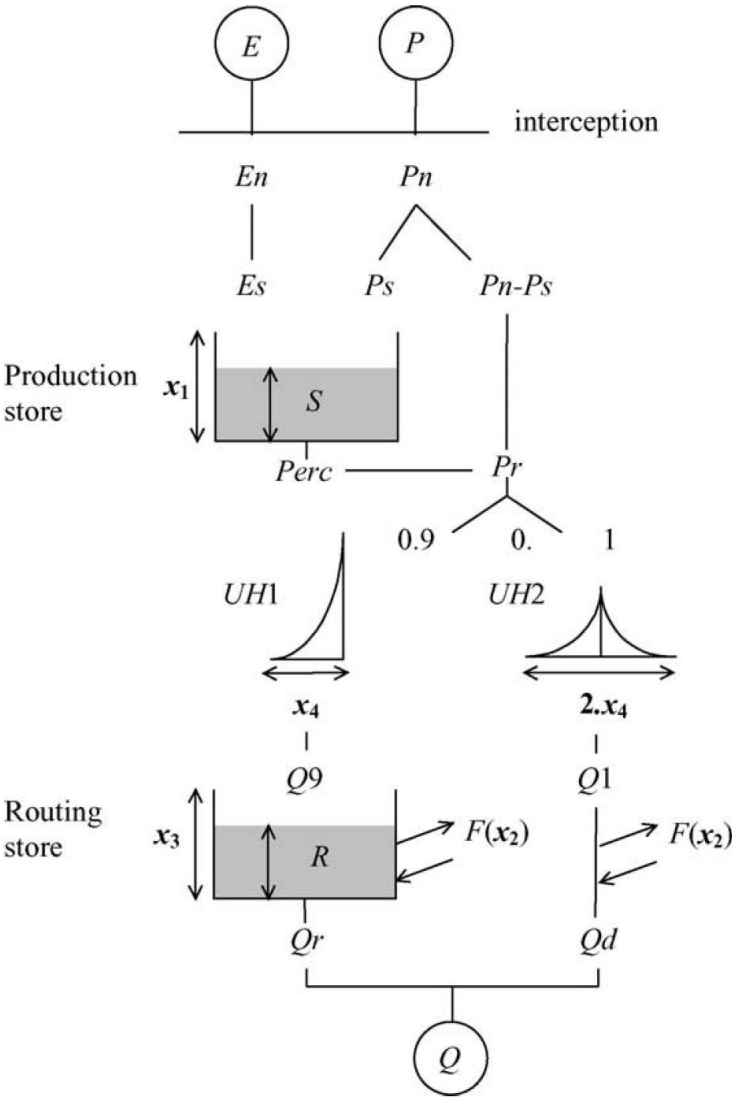
- Modelo conceptual, simple, de paso diario, concentrado.
- Basado en la cuantificación de la humedad del suelo.
- Datos de entrada: Precipitación y ETP.
- Salida: Caudal.



MODELO GR4J

Estructura del modelo

- Almacenamiento de agua en el suelo a través de dos reservorios:
  - Reservorio de producción
  - Reservorio de tránsito (no lineal)
- Variables de estado: Nivel de agua en los reservorios (S y R).
- Escorrentía directa (Qd): Tránsito a través de un HU simple.
- Escorrentía sub-superficial (Qr): Tránsito a través de otro HU que se almacena en el reservorio no lineal.
- Esc. Total = Esc. Directa + Esc. sub-superficial

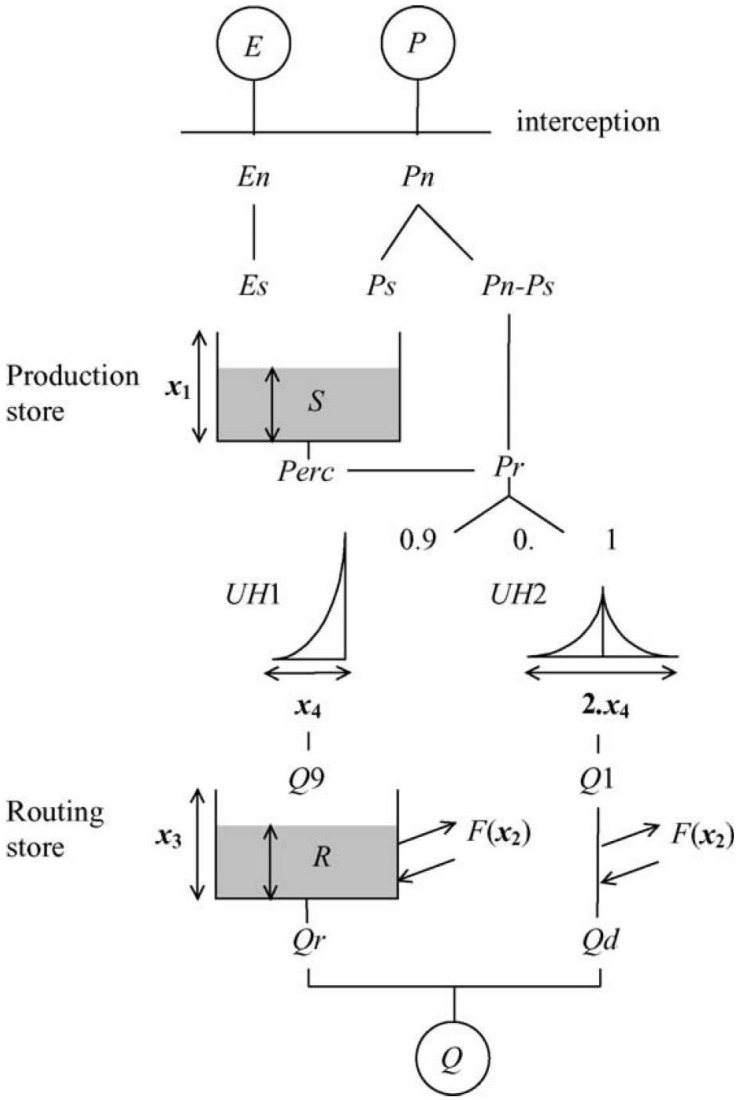


MODELO GR4J

Estructura del modelo

- Tiene 4 parámetros.

Parámetro	Descripción	Unidad
x_1	Capacidad máxima del reservorio de producción	mm
x_2	Coeficiente de intercambio con el agua subterránea	mm
x_3	Capacidad máxima del reservorio de tránsito	mm
x_4	Tiempo base del hidrograma unitario	día



MODELO GR4J

Estructura del modelo

(1) Precipitación neta (**Pn**) y Evapotranspiración neta (**En**)

$$\text{If } P \geq E, \quad \text{then } P_n = P - E \text{ and } E_n = 0$$

$$\text{otherwise } P_n = 0 \quad \text{and} \quad E_n = E - P$$

(2) Reservorio de producción (**Ps**, **Es**, **S**)

Si Pn > 0:

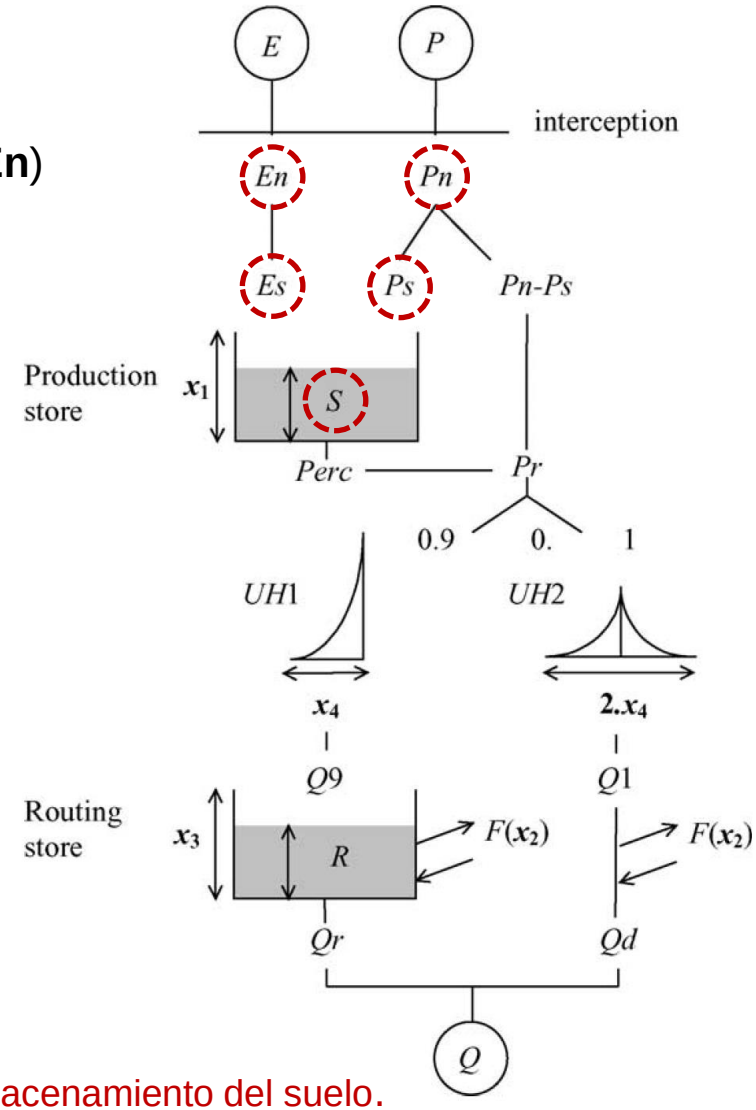
$$P_s = \frac{x_1\left(1 - \left(\frac{S}{x_1}\right)^2\right)\tanh\left(\frac{P_n}{x_1}\right)}{1 + \frac{S}{x_1}\tanh\left(\frac{P_n}{x_1}\right)}$$

Si En > 0:

$$E_s = \frac{S\left(2 - \frac{S}{x_1}\right)\tanh\left(\frac{E_n}{x_1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{x_1}\right)\tanh\left(\frac{E_n}{x_1}\right)}$$

Contenido de agua en el suelo: $S = S - E_s + P_s$
(capa sub-superficial)

$0 \leq S \leq x_1$ (mm)



x_1 (mm): Parámetro que representa la capacidad máxima de almacenamiento del suelo.

MODELO GR4J

Estructura del modelo

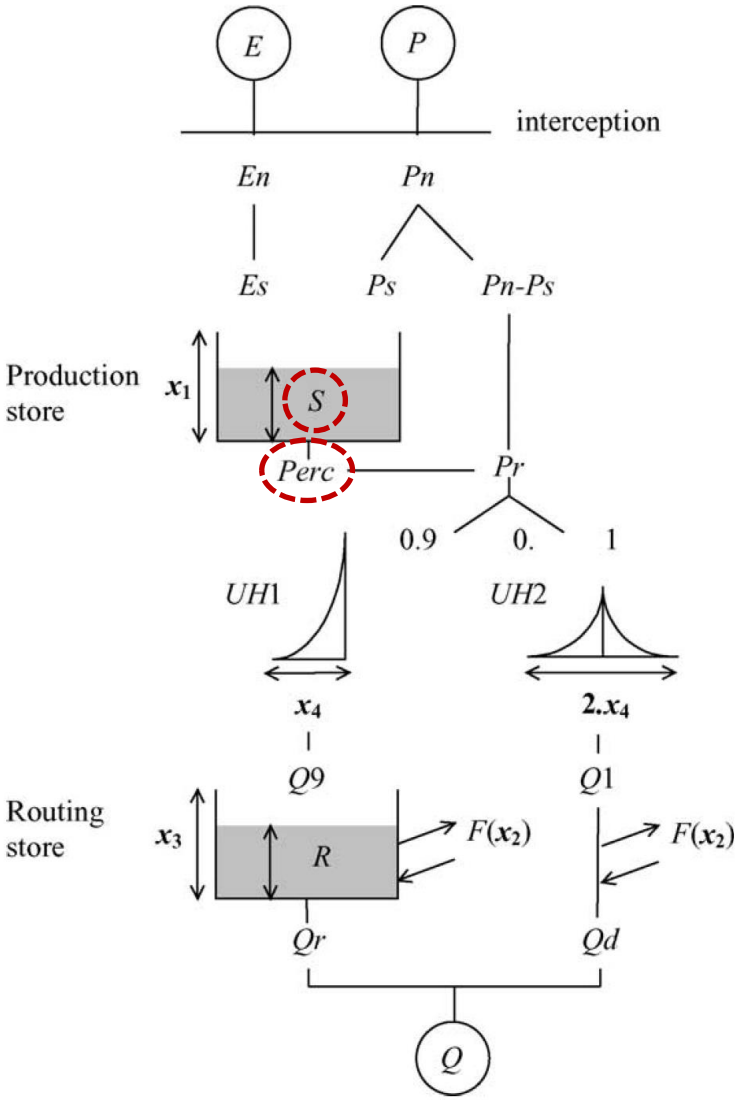
(3) Percolación hacia la zona saturada del suelo (**Perc**)

$$\mathrm{Perc} = S\left\{1 - \left[1 + \left(\frac{4}{9}\frac{S}{x_1}\right)^4\right]^{-1/4}\right\}$$

(0 ≤ Perc < S)

Se actualiza el contenido de agua en el suelo (**S**):

$$S = S - \mathrm{Perc}$$



MODELO GR4J

Estructura del modelo

(4) Escorrentía (**Pr**), que luego es transitada hasta la salida de la cuenca

$$P_r = \text{Perc} + (P_n - P_s)$$

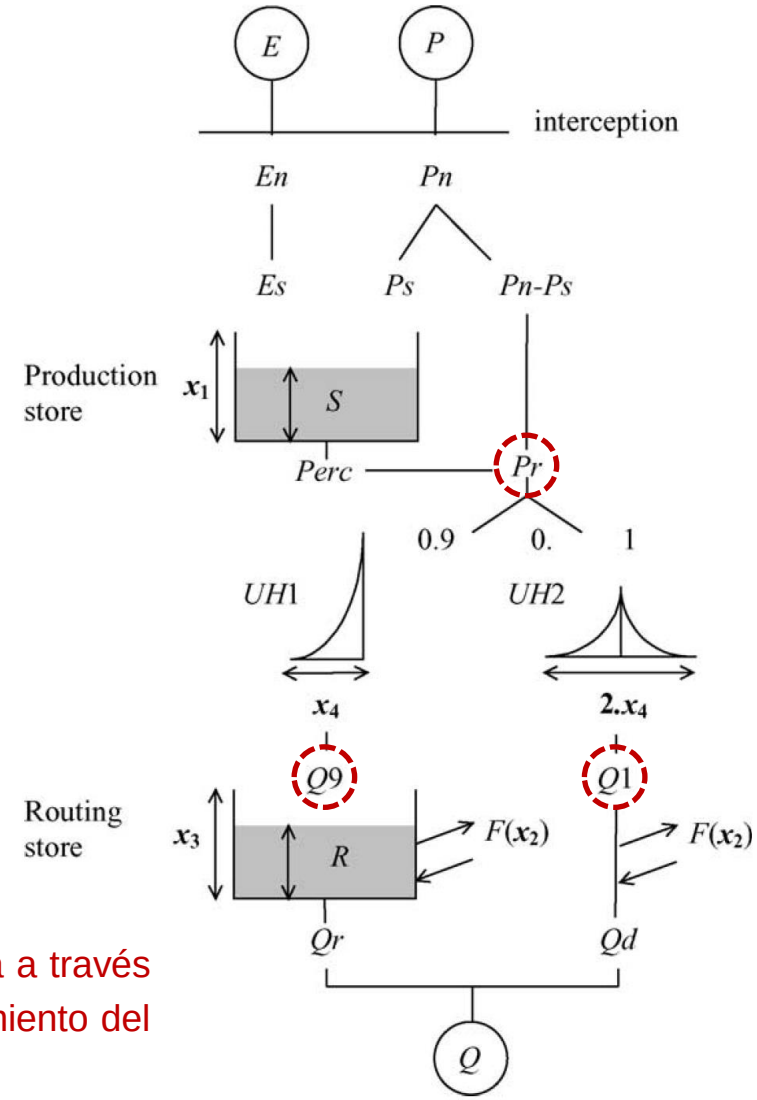
Pr se divide en dos componentes del flujo:

- Escorrentía directa (**Q1**):

  El 10% de Pr se transita a través de un hidrograma unitario simple (UH2).

- Escorrentía sub-superficial o flujo lento (**Q9**):

  El 90% restante de Pr se transita a través de un hidrograma unitario (UH1) y un posterior reservorio no lineal.



El tiempo base de ambos hidrogramas unitarios se representa a través de un único parámetro x_4 (días) y la capacidad de almacenamiento del reservorio no lineal constituye otro parámetro x_3 (mm).

MODELO GR4J

Estructura del modelo

(5) Intercambio de agua subterránea o con otras cuencas (**F**)

$$F = x_2\left(\frac{R}{x_3}\right)^{7/2}$$

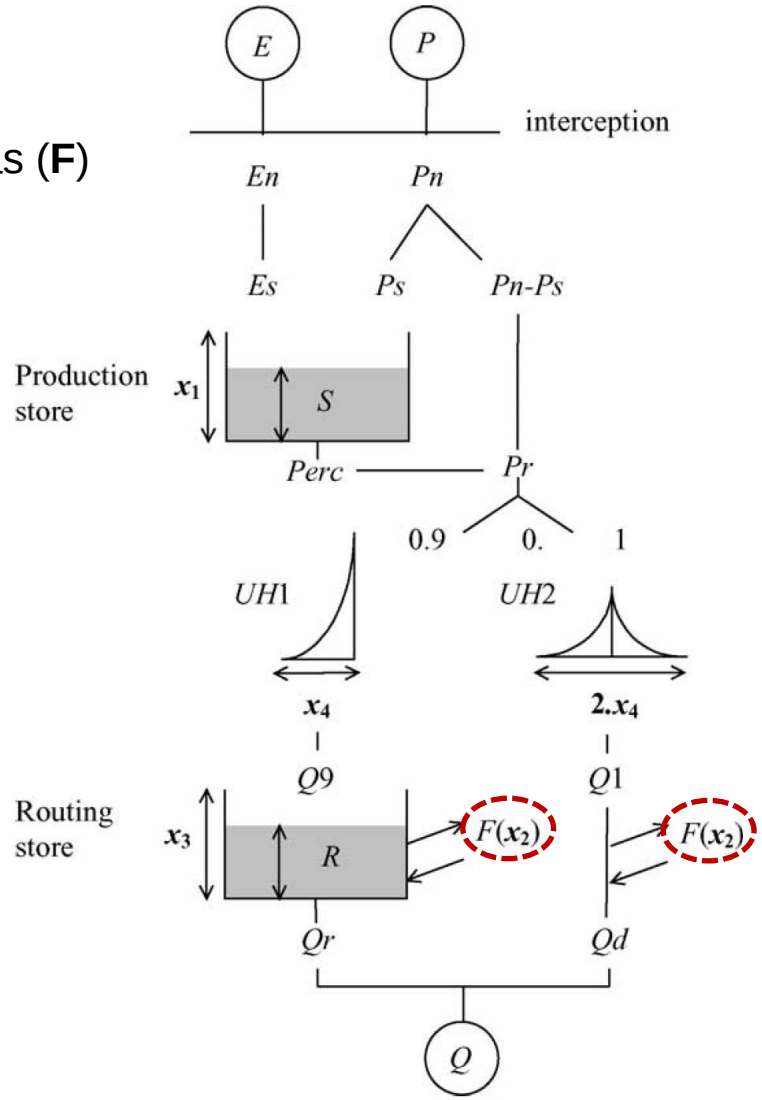
F: función de intercambio dependiente de x_2

$x_2 > 0$: "importación" de agua

$x_2 < 0$: "exportación" de agua

$x_2 = 0$: No hay intercambio

x_2 (mm): Coeficiente de intercambio con el agua subterránea. Parámetro que representa la máxima cantidad de agua que se puede intercambiar cuando R = x_3.



MODELO GR4J

Estructura del modelo

(6) Reservorio de tránsito no lineal (**R**)

$$R = \max(0; R + Q9 + F)$$

Caudal de salida del reservorio (**Qr**):

$$Q_r = R\left\{1 - \left[1 + \left(\frac{R}{x_3}\right)^4\right]^{-1/4}\right\}$$

(0 ≤ Qr < R)

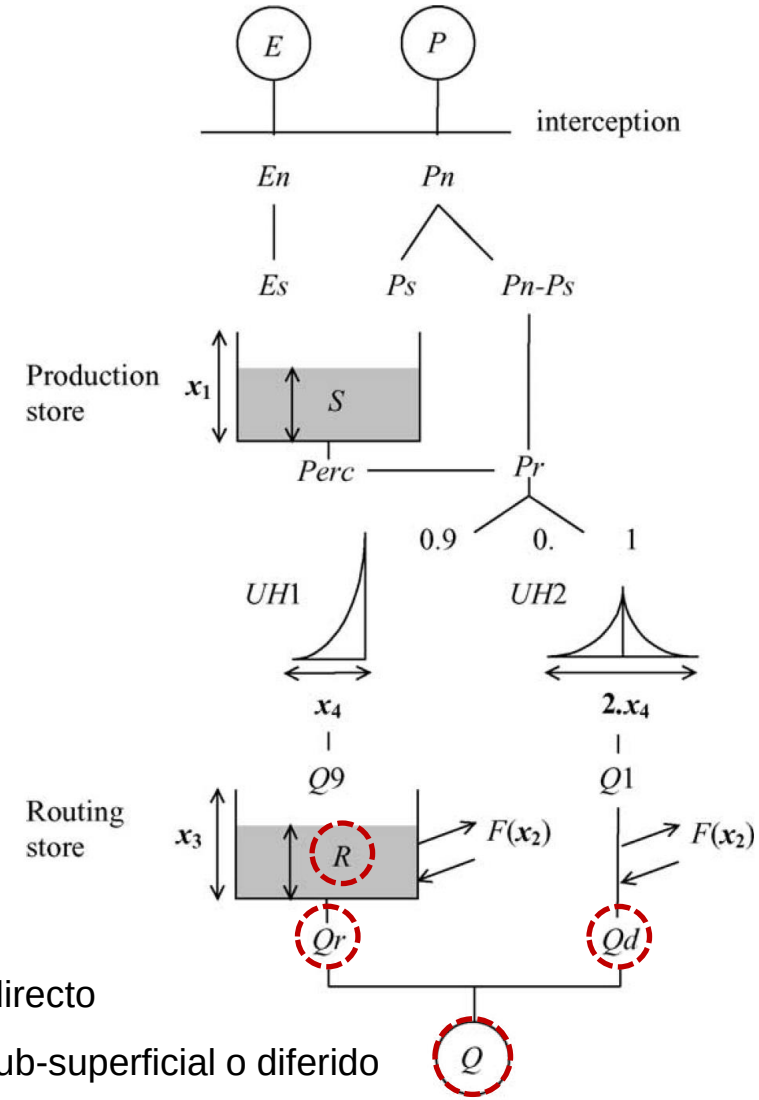
Se actualiza el nivel en el reservorio (**R**):

$$R = R - Q_r$$

(7) Escorrentía total (**Q**)

$$Q_d = \max(0; Q1 + F)$$

$$\boxed{Q = Q_r + Q_d}$$



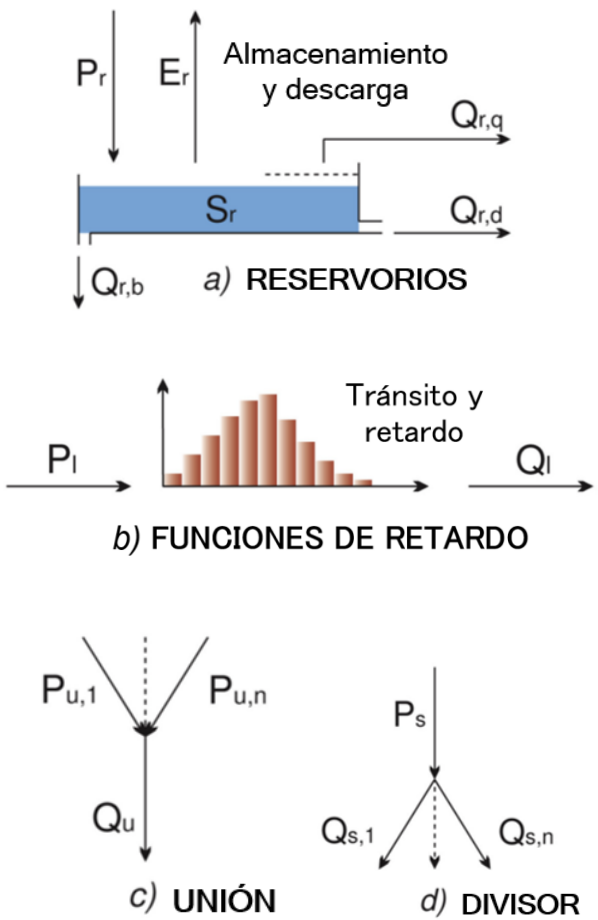
Qd: Flujo directo

Qr: Flujo sub-superficial o diferido

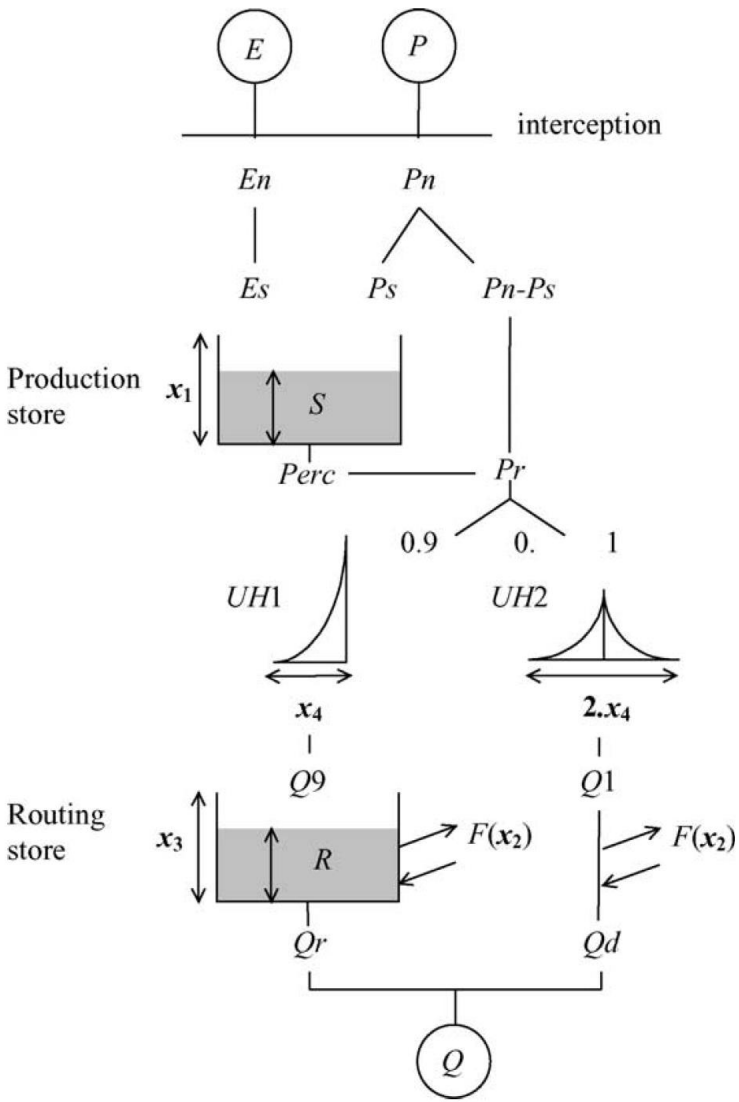
MODELO GR4J

Estructura del modelo

Elementos según Fenicia et al. (2011):



???



MODELO GR4J

Código disponible

Página web oficial:

https://webgr.inrae.fr/webgr-eng/tools/hydrological-models/daily-hydrological-model-gr4j

- The GR4J code in Excel.
- The GR4J code in the R-package airGR (together with other hydrological models).
- The GR4J code in the airGRteaching web app (together with other hydrological models).

❖ Excel:
https://webgr.inrae.fr/webgr-eng/Media/Files/modeles-hydrogeologiques/GR4J/exel-GR4

❖ airGR: https://webgr.inrae.fr/webgr-eng/tools/software/airgr

❖ airGRteaching interfaz gráfica: https://sunshine.irstea.fr/app/airGRteaching

MODELO GR4J

Código disponible

- airGRteaching interfaz gráfica: https://sunshine.irstea.fr/app/airGRteaching

MODELO GR4J

Aplicación en Uruguay: Regionalización

- Se realizó en dos etapas:

  1) CALIBRACIÓN INDIVIDUAL:

  Un valor de la cuarteta de parámetros en cada cuenca.

  2) CALIBRACION REGIONAL:

  Un valor de la cuarteta de parámetros para todo Uruguay.

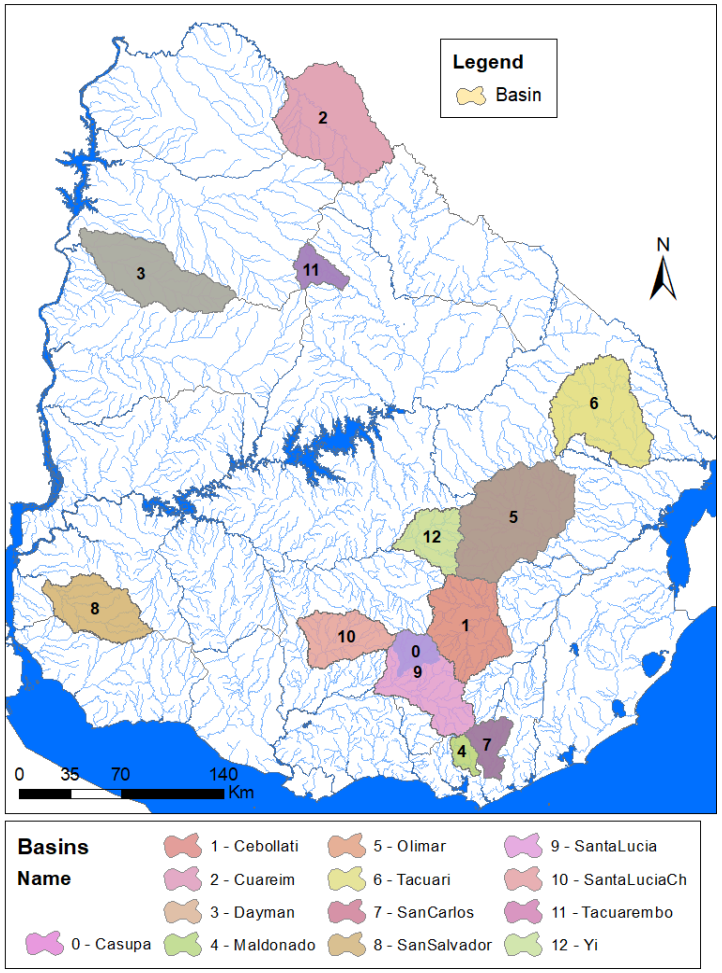
Narbondo et al., 2020.

MODELO GR4J

Aplicación en Uruguay: Regionalización

- Selección de cuencas

Cuenca		Características			
ID	Nombre	Area (km^2)	Pend. (%)	Tc (hs)	AD (mm)
0	Casupa	689	5.4	16	77
1	Cebollati	2884	6.2	38	76
2	Cuareim	4568	4.4	50	37
3	Dayman	3183	2.5	44	78
4	Maldonado	366	8.4	12	72
5	Olimar	4679	6.6	43	86
6	Tacuari	3544	5.1	54	107
7	San Carlos	803	8.3	18	74
8	San Salvador	2151	2.4	38	125
9	Santa Lucia	2754	6.0	36	81
10	Santa Lucía Ch.	1749	3.3	26	99
11	Tacuarembo Ch.	660	6.8	23	77
12	Yi	1380	4.2	26	76



Narbondo et al., 2020.

Periodo de datos: 2001-2010

MODELO GR4J

Aplicación en Uruguay: Regionalización

- Resultados de la calibración regional

Relación parámetros-características físicas de la cuenca:

- X_1 (mm) = AD
- X_4 (días) = f(Tc) = $1.24 \cdot T_c^{0.205}$ con Tc (hrs)

Valores óptimos de X_2 y X_3:

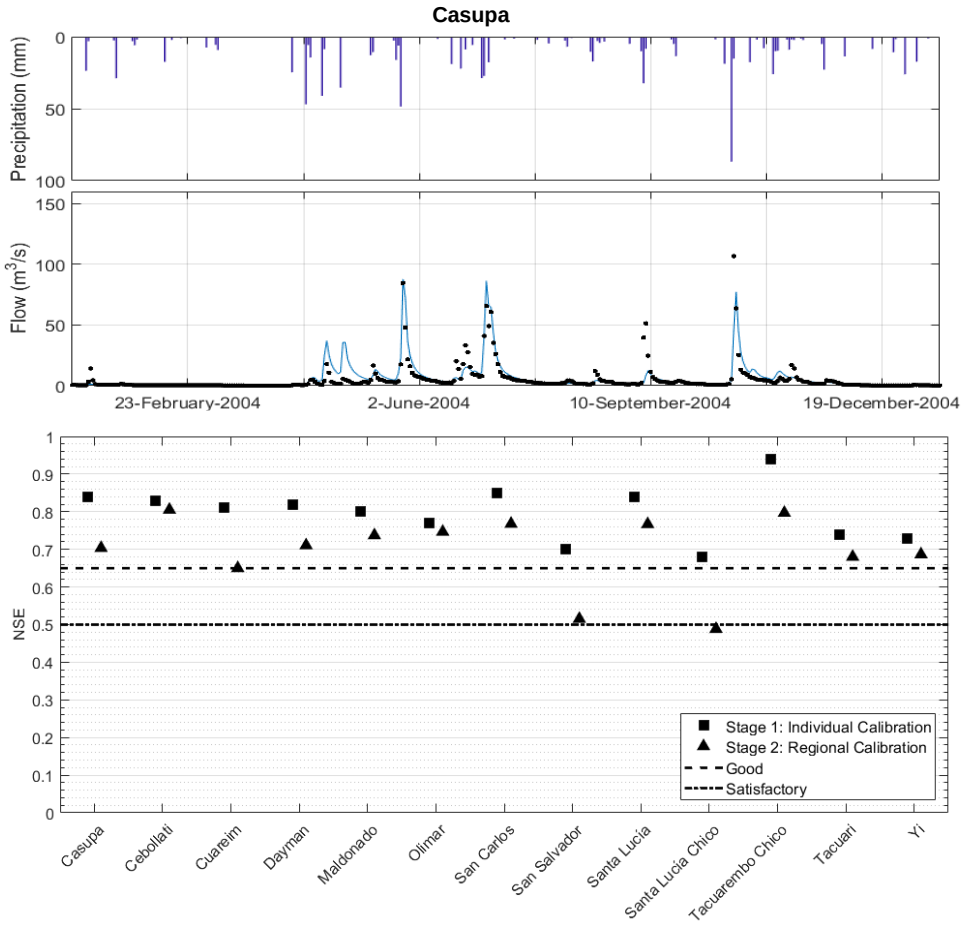
- X_2 = -1,5 mm
- X_3 = 59 mm

Narbondo et al., 2020.

MODELO GR4J

Aplicación en Uruguay: Regionalización

- Resultados: Validación (Calibración cruzada)



Narbondo et al., 2020.

MODELO GR4J

Aplicación en Uruguay

- **ENERGÍA:** Evaluación del potencial de generación hidrocinético

1) Implementación y calibración de modelos hidrológicos (GR4J y Geetha)
2) Selección del modelo
3) Regionalización de los parámetros del modelo GR4J
4) Simulación de caudales diarios, tirantes y velocidades

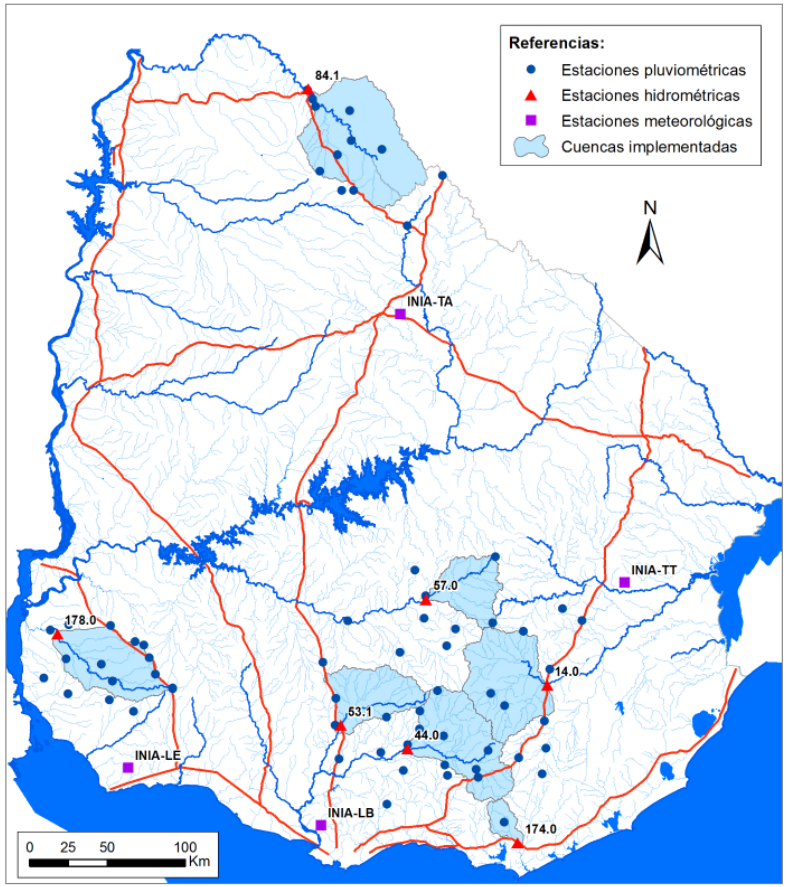


Figura 2-1: Cuencas y estaciones pluviométricas, hidrométricas y meteorológicas utilizadas

Proyecto ANII FSE _1_2014_1_102258 (2016)

MODELO GR4J

Baja potencialidad de generar energía hidrocinética:
La permanencia de velocidades mayores a 1 m/s es muy baja (10% o incluso menor).

Aplicación en Uruguay

- **ENERGÍA:** Evaluación del potencial de generación hidrocinético

4) Simulación de caudales diarios, tirantes y velocidades

Curva de permanencia de velocidades

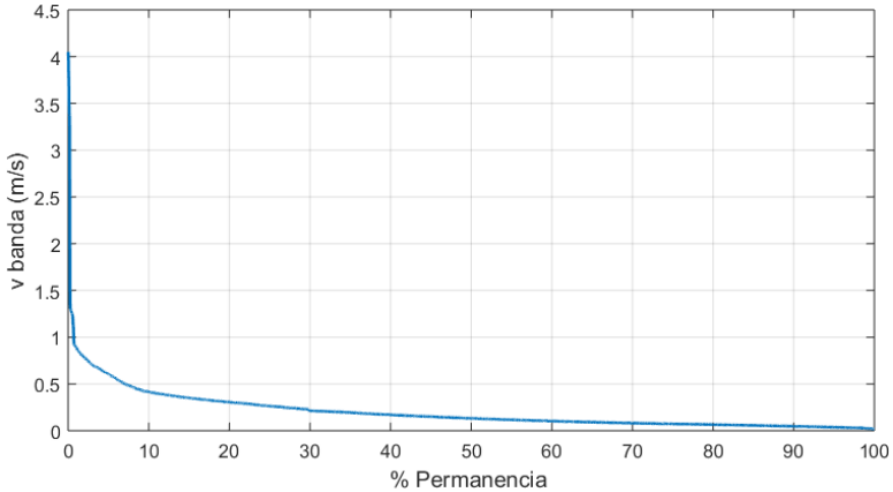


Figura 4-1: Curva de permanencia de velocidades para la banda central en la sección de punto de cierre del Arroyo Maldonado

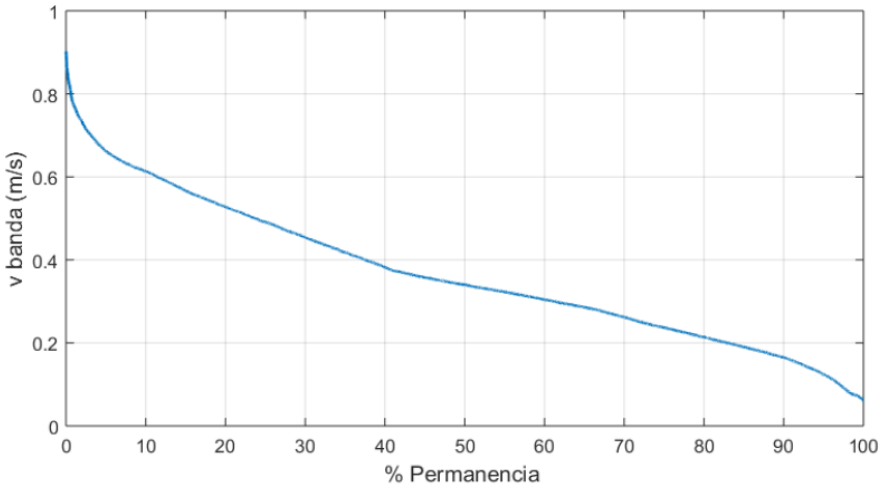
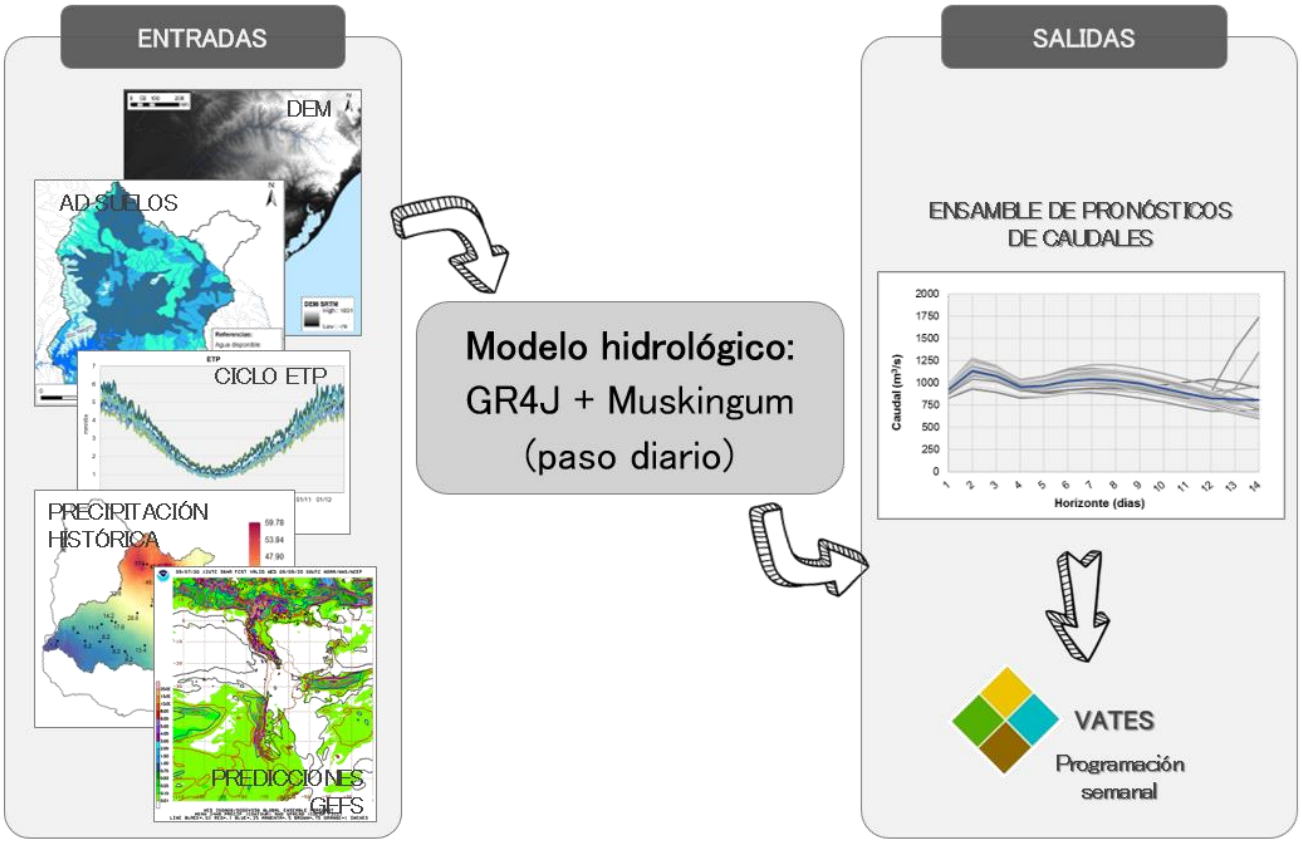


Figura 4-2: Curva de permanencia de velocidades para la banda central en la sección de punto de cierre del Rio San Salvador

MODELO GR4J

Aplicación en Uruguay

- **ENERGÍA:** Pronóstico de caudales para generación hidroeléctrica en el Río Negro



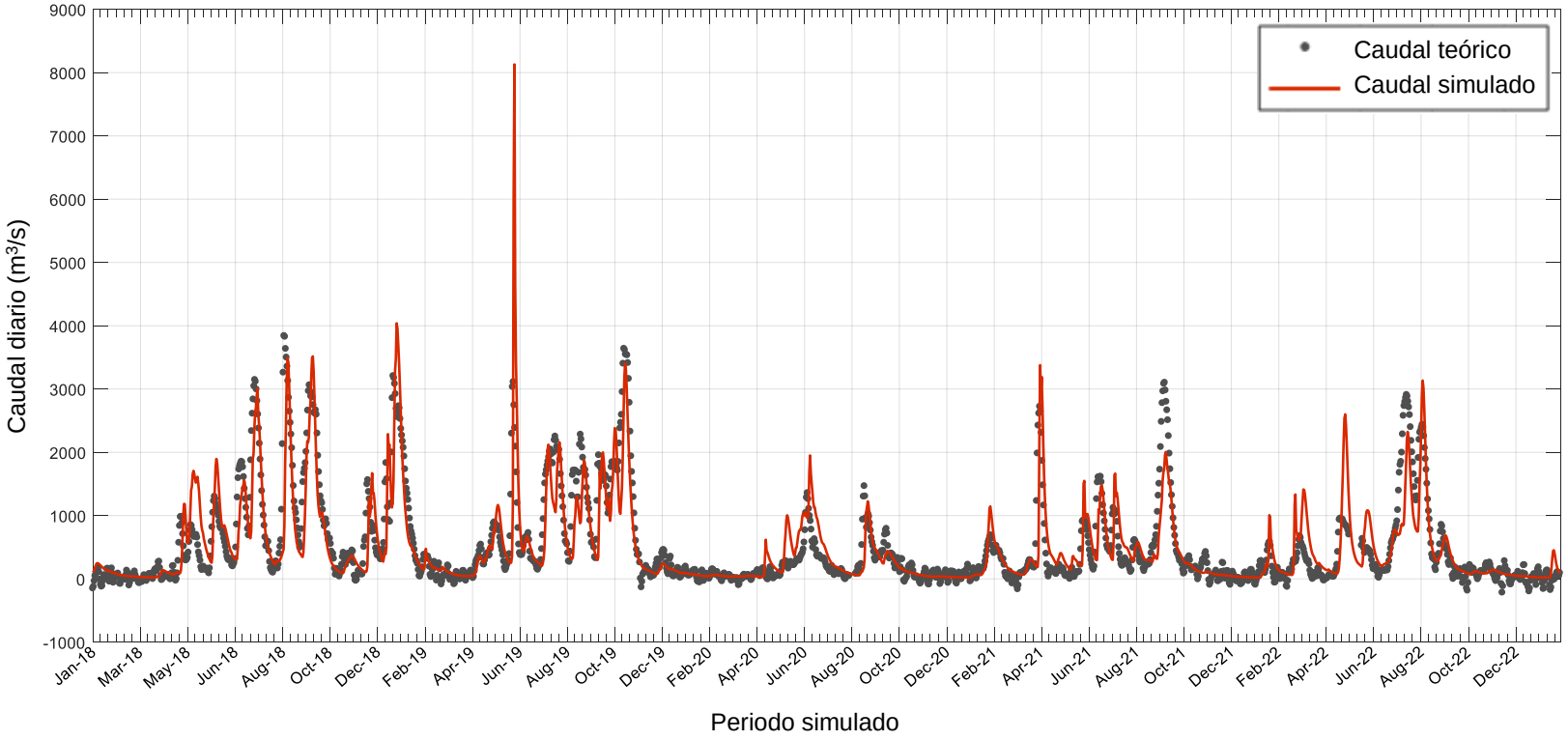
De Vera et al., 2021; De Vera et al., 2022.

MODELO GR4J

Aplicación en Uruguay

- **ENERGÍA:** Pronóstico de caudales para generación hidroeléctrica en el Río Negro

Simulación continua en Rincón del Bonete



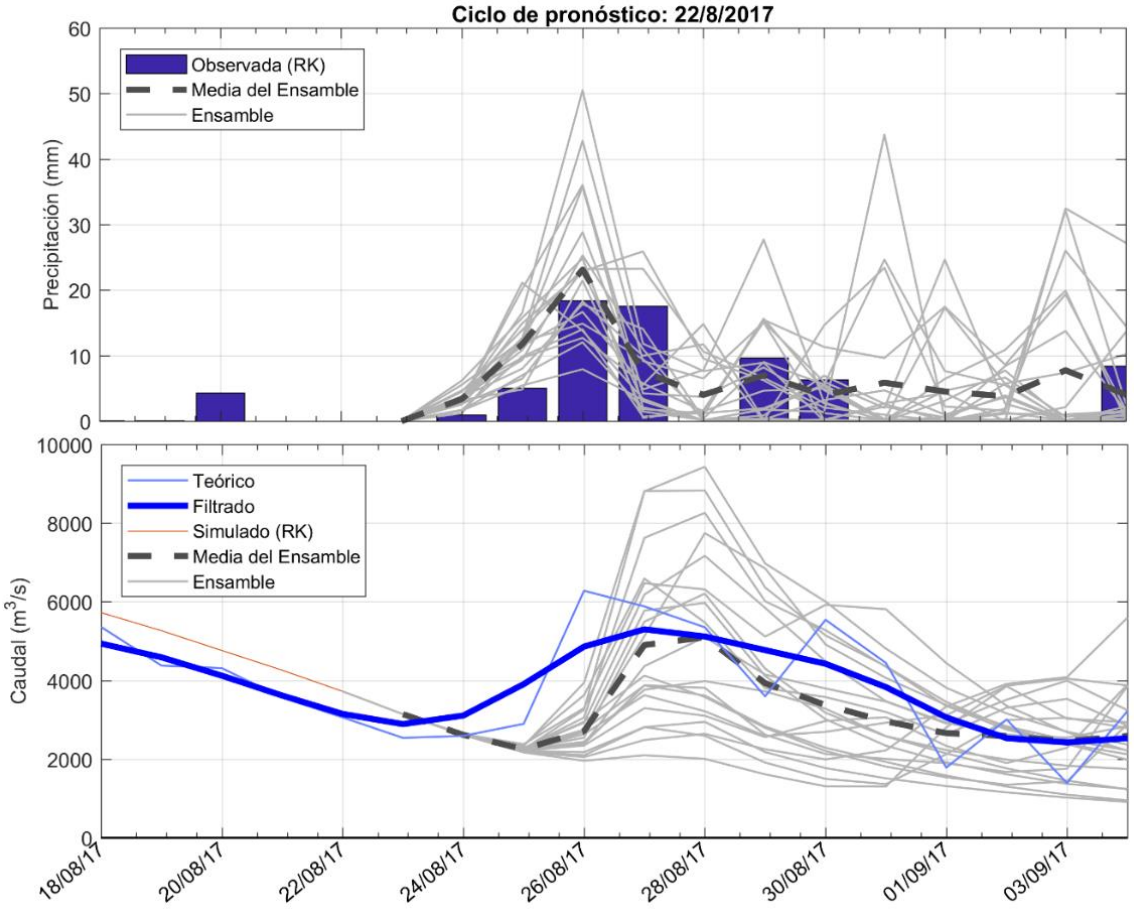
MODELO GR4J

Aplicación en Uruguay

- **ENERGÍA:** Pronóstico de caudales para generación hidroeléctrica en el Río Negro

Pronóstico a 14 días

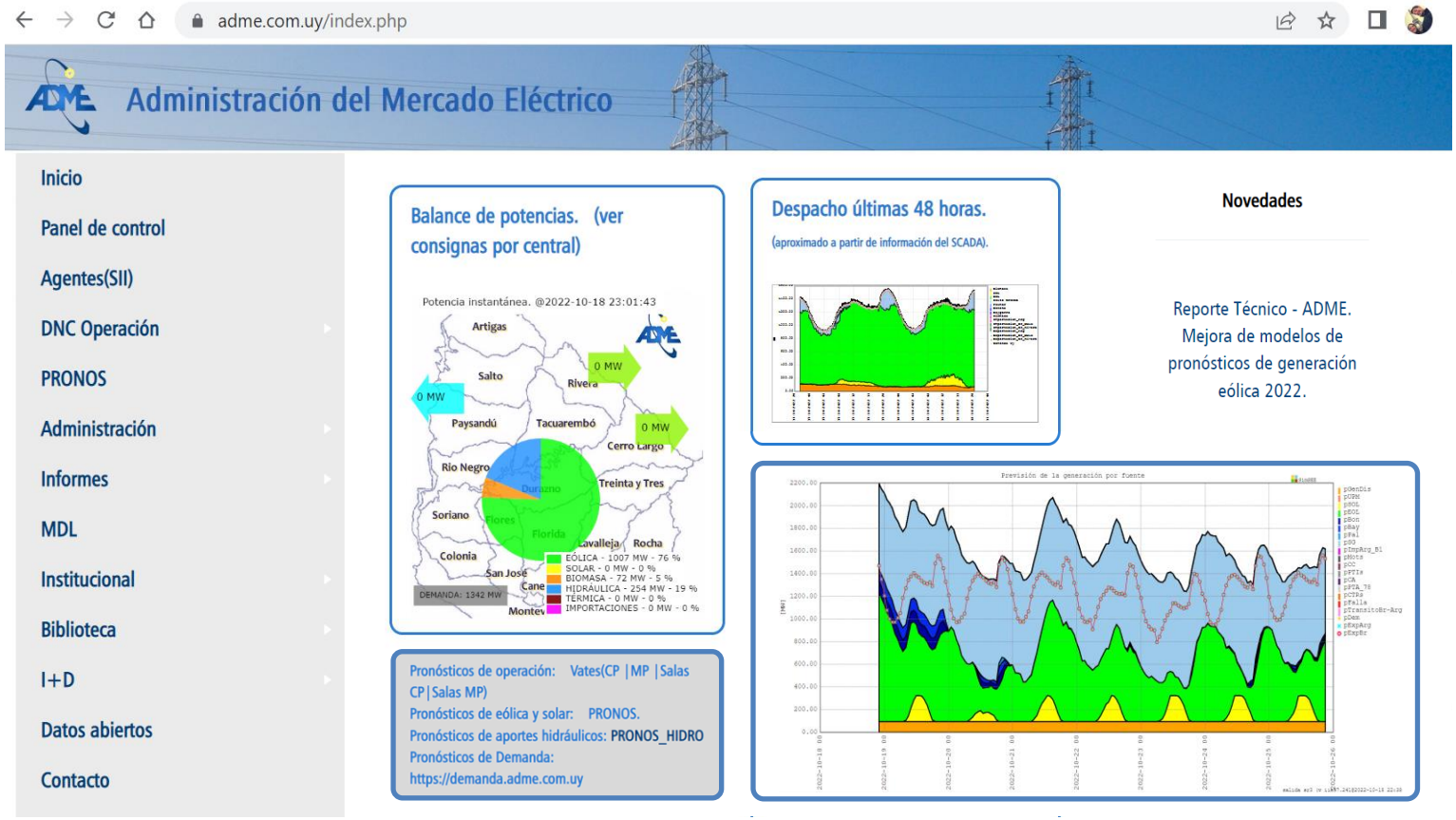
(Central Constitución)



MODELO GR4J

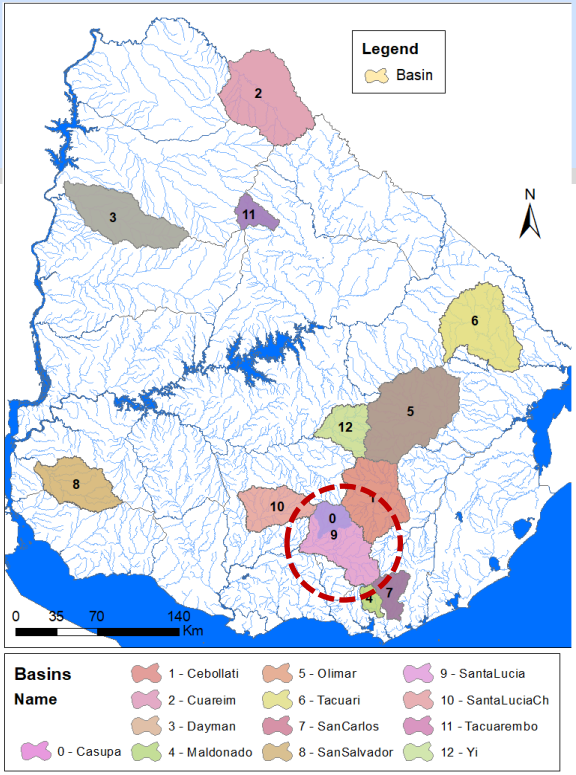
Aplicación en Uruguay

- **ENERGÍA:** Pronóstico de caudales para generación hidroeléctrica en el Río Negro



https://www.adme.com.uy/

MODELO GR4J



Ejemplo

Cuenca del río Santa Lucía

- Simulación de caudales diarios a partir de P y ETP empleando los parámetros regionalizados.
  - Ac = 2754 km^2
  - Tc = 36 hrs
  - AD = 81 mm
  - Estado inicial del sistema: S_0 = 0.5*x1 y R_0 = 0.5*x3
  - Periodo de estudio: 2001 – 2010.
- Comparación visual con la serie de caudales registrados.
- Evaluación del desempeño del modelo.

MODELO GR4J

Ejemplo

Cuenca del río Santa Lucía

Modélisation pluie-débit à l'aide du modèle journalier GR4J (Version Perrin et al., 2003)

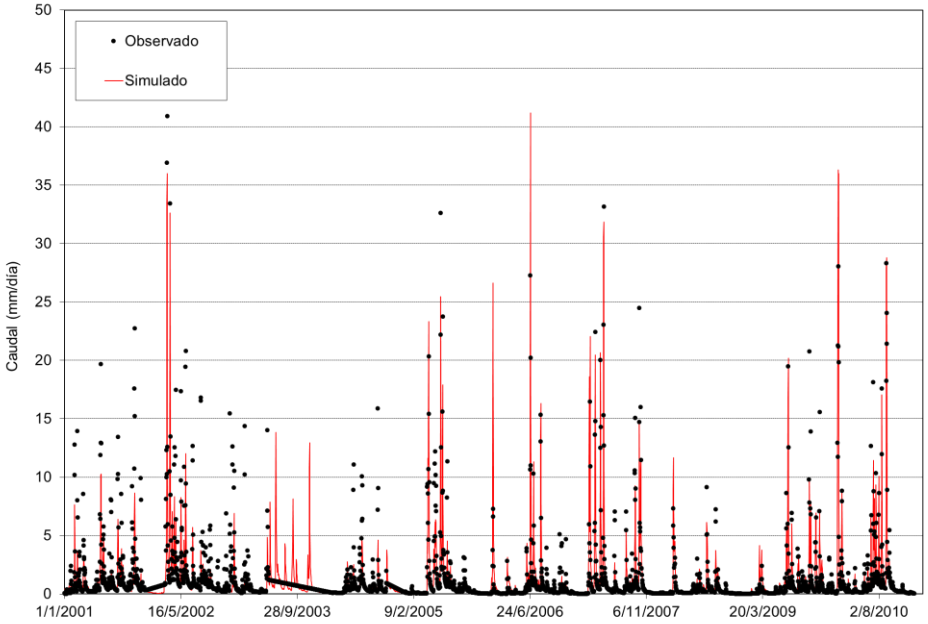
(Rq: seules les cellules en jaune sont à modifier, les autres sont issues de calculs; les formules des cellules G41 à BQ41 sont à recopier sur les lignes suivantes pour les calculs des pas de temps suivants)

Nom du bassin	Santa Lucía

Superficie du bassin (km²)	2754

Paramètres modèle	Transf.	Réels
x1: Capacité rés. production (mm)	81	81
x2: Paramètre d'échange (mm)	-1,5	-1,5
x3: Capacité rés. routage (mm)	59	59
x4: Délai (jours)	2,59	2,59

Valeurs initiales	
Taux de remplissage initial S0/x1	0,50
Taux de remplissage initial R0/x3	0,50



Resultados obtenidos con el código del GR4J disponible en Excel.

MODELO GR4J

Bibliografía

- De Vera A., Alfaro P., Terra R. (2021). “Operational Implementation of Satellite-Rain Gauge Data Merging for Hydrological Modeling”. Water 2021, 13, 533. https://doi.org/10.3390/w13040533
- De Vera A., Flieller G., Chaer R., Terra R. (2022). “Evaluación de un sistema operativo de pronósticos hidrológicos por ensambles para la gestión del sistema eléctrico en Uruguay”. Ribagua, 9:1, 10-24. https://doi.org/10.1080/23863781.2023.2213843
- Narbondo S., Gorgoglione A., Crisci M., Chreties, Ch. (2020). “Enhancing physical similarity approach to predict runoff in ungauged watersheds in sub-tropical regions”. Water, 12(2), 528; https://doi.org/10.3390/w12020528
- Perrin C., Michel C.; Andréassian V. (2003). “Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation”. J. Hydrol., 279, 275–289.