

# GENERACIÓN ESTOCÁSTICA DE SERIES DIARIAS DE PRECIPITACIONES EN EL ALTIPLANO CHILENO

CUARTA JORNADA TÉCNICA ALHSUD 2019

Eduardo Varas C. (PhD)  
Javier Uribe B. (MSc)

27 de junio de 2019

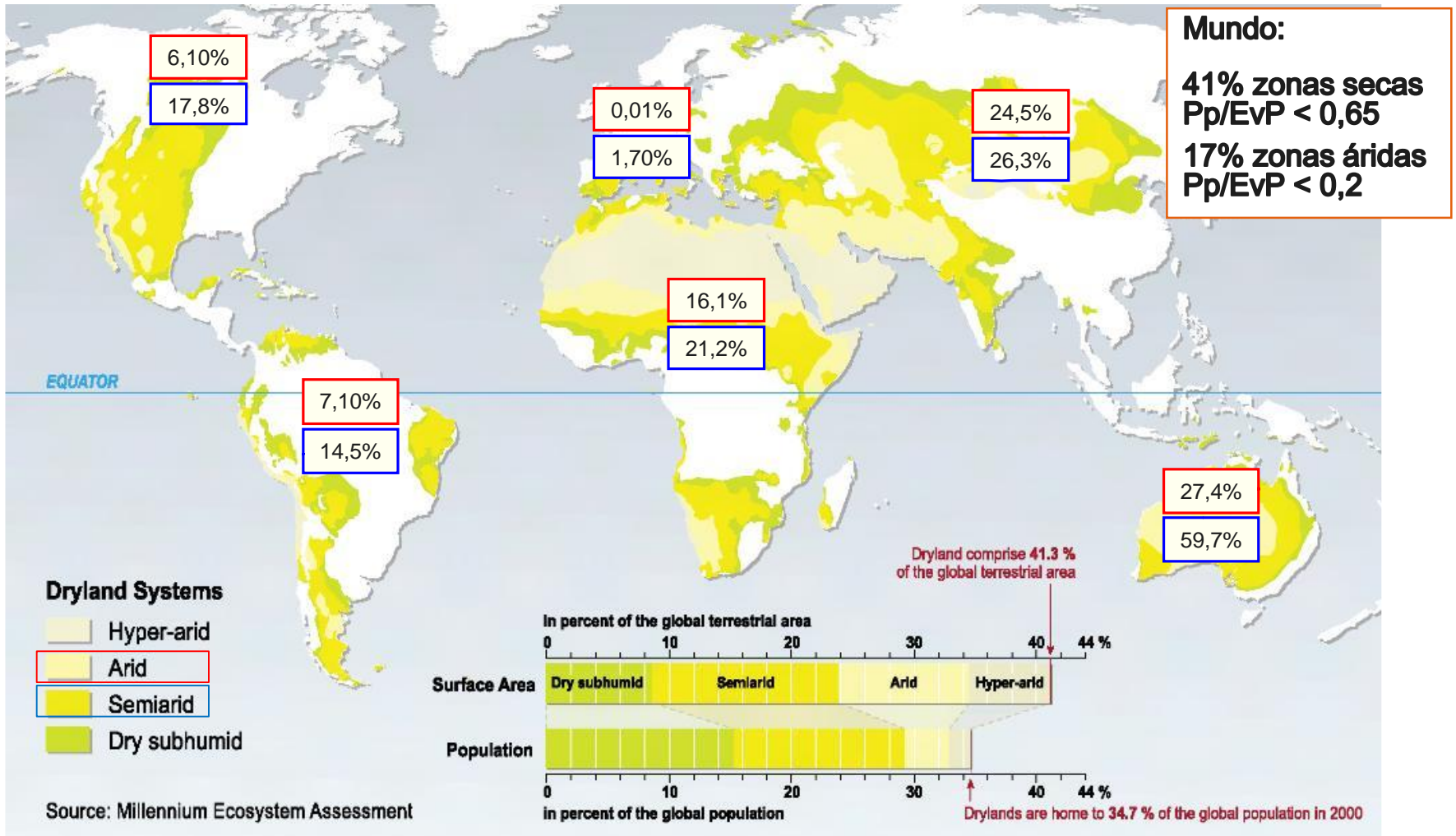
# Contenido

- Introducción: contexto y objetivos
- Metodología
- Resultados
- Conclusiones

# Contenido

- Introducción: contexto y objetivos
- Metodología
- Resultados
- Conclusiones

# Zonas áridas en el mundo

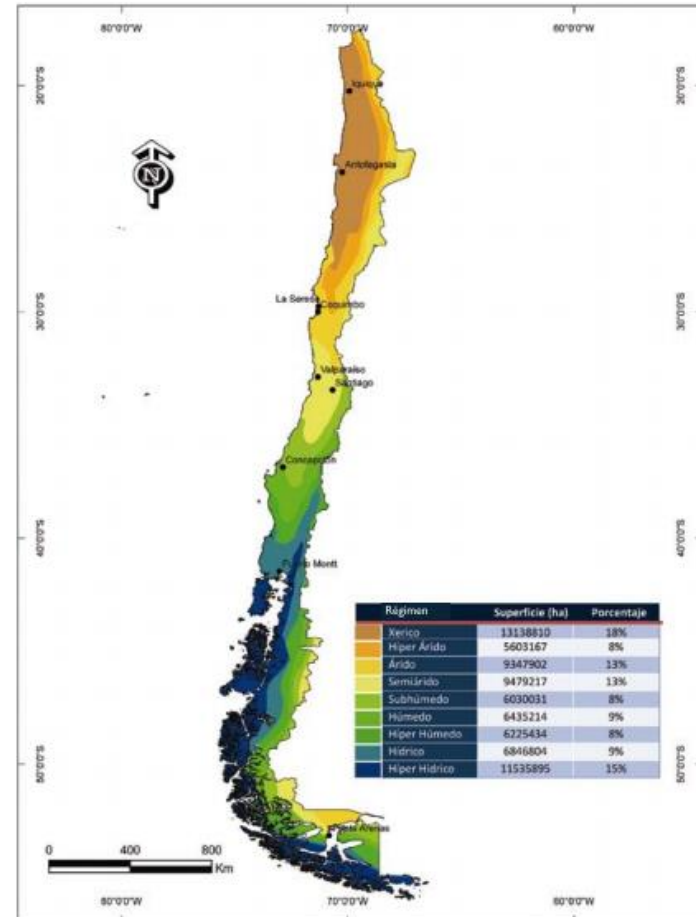


Fuente: Millenium Ecosystem Assessment, 2005 (modificado)

# Caso chileno

39% del territorio es  
xérico, árido o semiárido

Régimen	Superficie (ha)	Porcentaje
Xerico	13138810	18%
Híper Árido	5603167	8%
Árido	9347902	13%
Semiárido	9479217	13%
Subhúmedo	6030031	8%
Húmedo	6435214	9%
Híper Húmedo	6225434	8%
Hídrico	6846804	9%
Híper Hídrico	11535895	15%



# Contexto medioambiental

Altiplano chileno

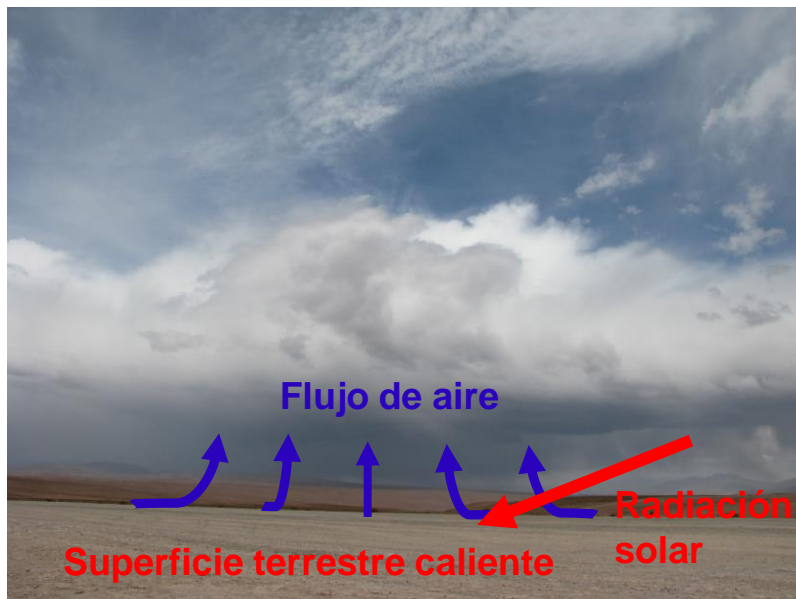
- Ecosistemas protegidos
- Zona árida, de una alta vulnerabilidad ambiental, donde el agua subterránea es la principal fuente hídrica
- Importancia desarrollo socioeconómico





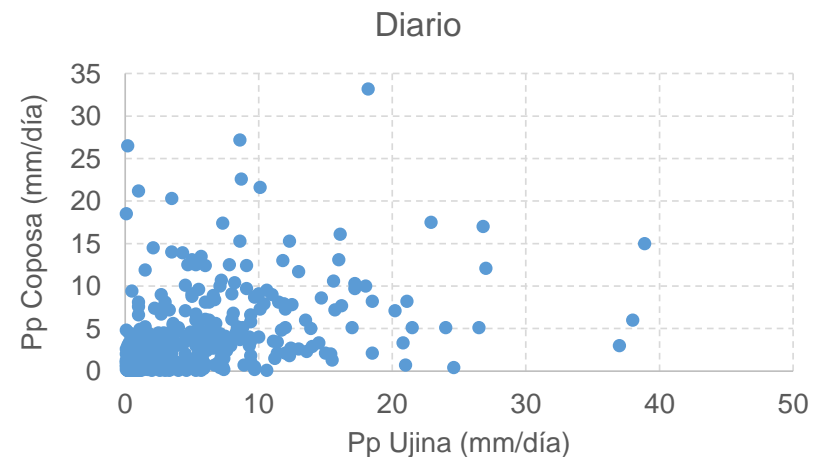
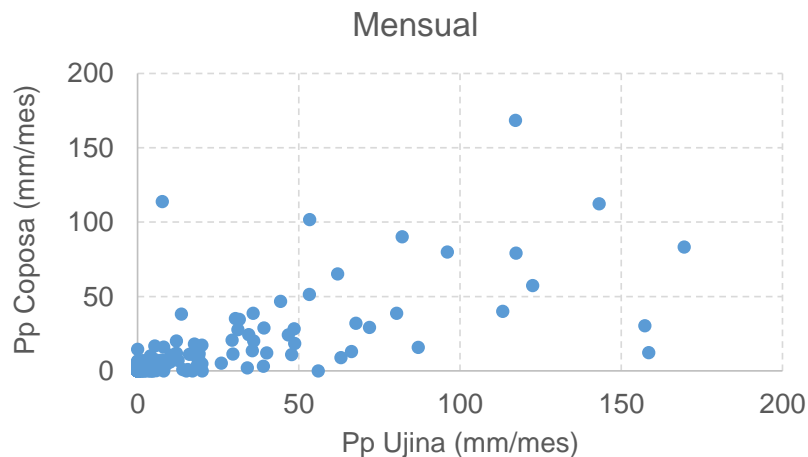
# Temporada húmeda breve e intensa

Precipitaciones estivales es el **principal aporte hídrico** en la zona altiplánica (>80% de la precipitación anual), de carácter convectivas con alta variabilidad e independencia espacial y temporal, con origen en el Océano Atlántico y transportadas por el Monzón Sudamericano ('Invierno Altiplánico').



# Bajas correlaciones

- Dificultad en la caracterización de precipitaciones en la zona de estudio, principalmente para escala de tiempo desagregada (diaria).
- Incertezas en la estimación de balance hídrico y la cuantificación de sus componentes.





# Objetivo buscado

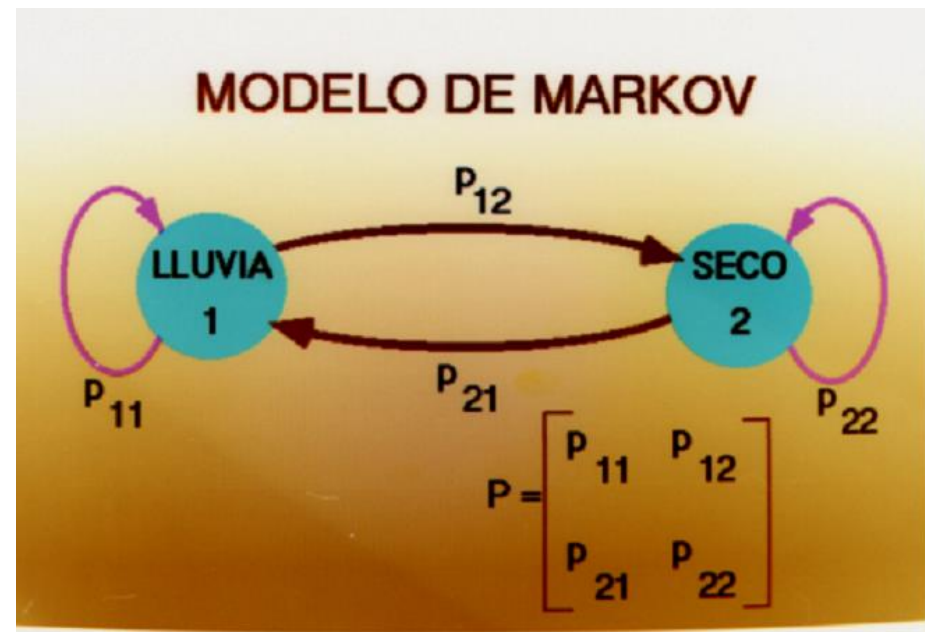
- Caracterización de precipitaciones diarias con un modelo estocástico markoviano
- Utilización en un modelo precipitación – escorrentía (MPE) para cuantificar las distintas componentes balance hídrico para un sistema árido, en particular para la zona alto-andina del norte de Chile, y su interacción con el sistema subterráneo.
- Análisis a nivel diario para estimar la precipitación efectiva, dada la fuerte influencia de la evaporación en zonas áridas

# Contenido

- Introducción: contexto y objetivos
- Metodología
- Resultados
- Conclusiones

# Metodología: Modelo de Markov

- Se propone un enfoque basado en un modelo Markov para representar los valores diarios para una tormenta de lluvia
- Permite representar un sistema que exhibe un comportamiento dinámico en el tiempo
- Conceptos claves
  - Definición de los estados del sistema
  - Probabilidad que ocurra un cambio de estado
  - Probabilidad que el estado sea S1 en la próxima transición dado que en este momento es S0



# Metodología: Modelo de Markov

- Ejemplos de sistemas dinámicos
  - Representar las temperaturas diarias
  - Representar características del clima
  - Representar características de un lugar
    - Secuencias de años: secos, normales, lluviosos
    - Anomalías: temperatura del mar: Niño, Niña

# Metodología: Serie sintética precipitación

- Ocurrencia de evento de precipitación según probabilidad de cambio de estado (probabilidad de transición)
- En caso de ocurrir una lluvia, su magnitud se obtiene a través de una función de probabilidades Gamma ( $\theta, k$ )
- Dos posibilidades:
  - Probabilidad de cambio de estado se establece a través de una estación patrón
  - Probabilidad de cambio de estado completamente aleatorio

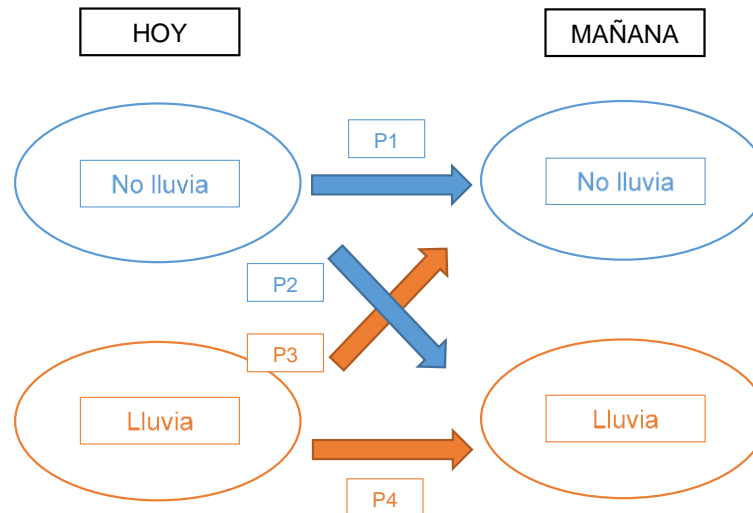
# Contenido

- Introducción: contexto y objetivos
- Metodología
- **Resultados**
- Conclusiones

# Resultados: patrones identificados

- Al calcular las probabilidades de transición de un estado seco a lluvioso se detectaron ciertos patrones:

- Niño – Niña
  - Norte – sur
  - Este – oeste
  - Menor altitud – mayor altitud
- Probabilidades de transición diferenciadas
- Índice de ubicación



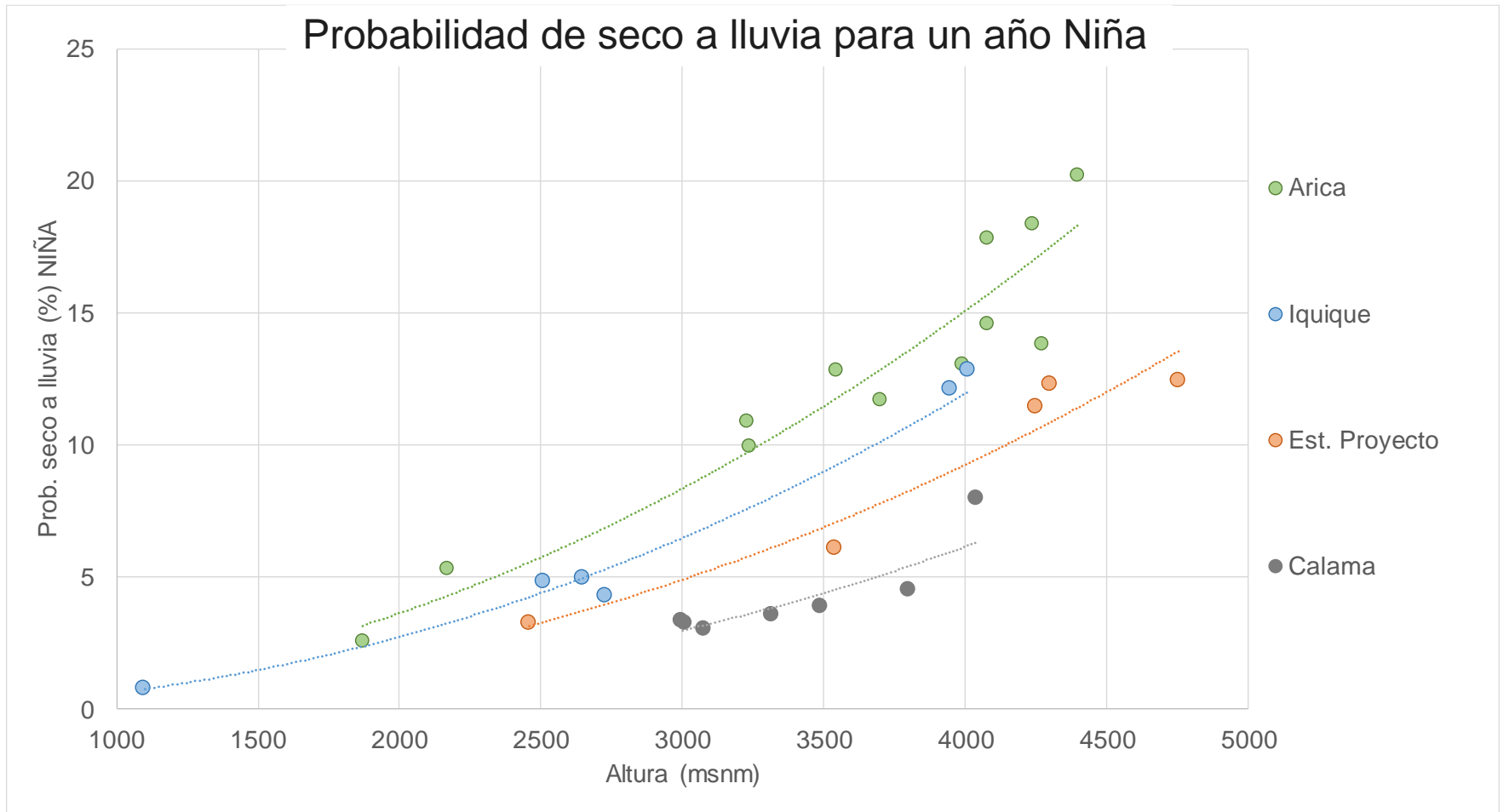


# Resultados: patrones identificados

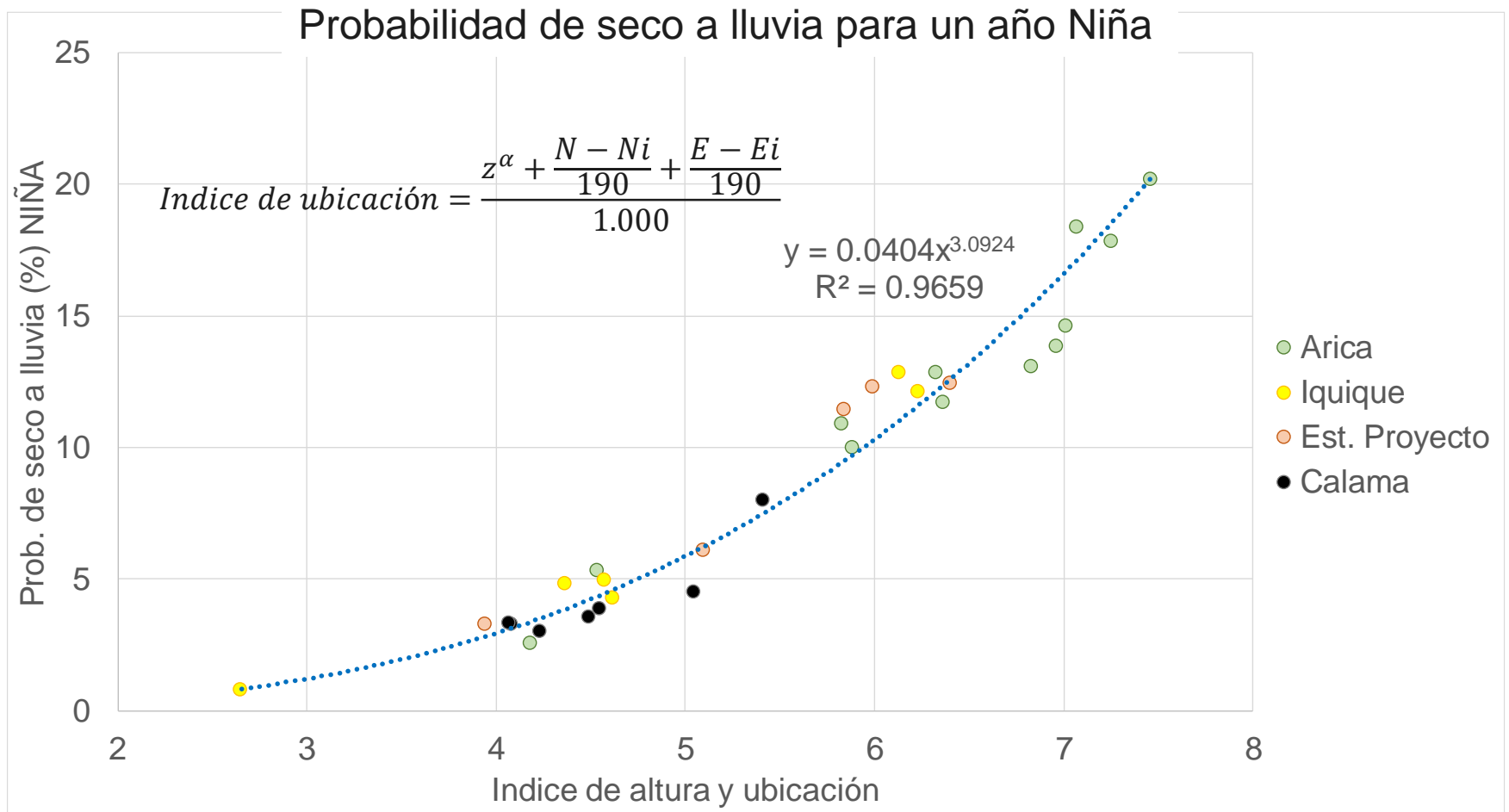
- Correlación entre índice oceánico El Niño (ONI) y las precipitaciones
  - ONI > 0 → El Niño → Período más seco en zonas altiplánicas
  - ONI < 0 → La Niña → Período más lluvioso en zonas altiplánicas
- Análisis de 3 escenarios según ubicación de la estación (x, y, z):
  - Temporada lluviosa (diciembre a marzo), ONI > 0
  - Temporada lluviosa (diciembre a marzo), ONI < 0
  - Temporada seca (abril a noviembre)

Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2000	-1.7	-1.4	-1.1	-0.8	-0.7	-0.6	-0.6	-0.5	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7
2001	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
2002	-0.1	0.0	0.1	0.2	0.4	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.3	1.1
2003	0.9	0.6	0.4	0.0	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4
2004	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7
2005	0.6	0.6	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.3	-0.6	-0.8
2006	-0.8	-0.7	-0.5	-0.3	0.0	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	0.9
2007	0.7	0.3	0.0	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5	-0.8	-1.1	-1.4	-1.5	-1.6
2008	-1.6	-1.4	-1.2	-0.9	-0.8	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.6	-0.7
2009	-0.8	-0.7	-0.5	-0.2	0.1	0.4	0.5	0.5	0.7	1.0	1.3	1.6
Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2010	1.5	1.3	0.9	0.4	-0.1	-0.6	-1.0	-1.4	-1.6	-1.7	-1.7	-1.6
2011	-1.4	-1.1	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.7	-0.9	-1.1	-1.1	-1.0
2012	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.3	0.3	0.2	0.0	-0.2
2013	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3
2014	-0.4	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.2	0.1	0.0	0.2	0.4	0.6	0.7
2015	0.6	0.6	0.6	0.8	1.0	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.5	2.6
2016	2.5	2.2	1.7	1.0	0.5	0.0	-0.3	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6
2017	-0.3	-0.1	0.1	0.3	0.4	0.4	0.2	-0.1	-0.4	-0.7	-0.9	-1.0
2018	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.7	0.9	0.8
2019	0.8	0.8	0.8	0.8								

# Resultados: patrones identificados



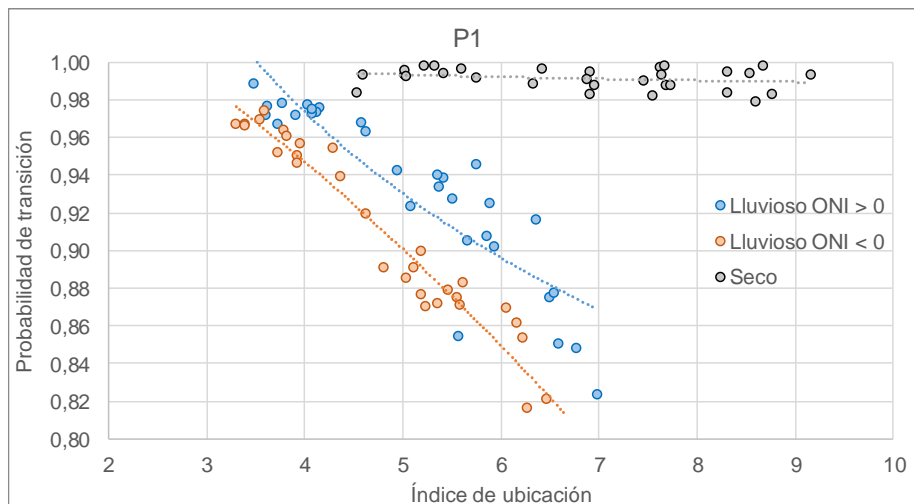
# Resultados: patrones identificados



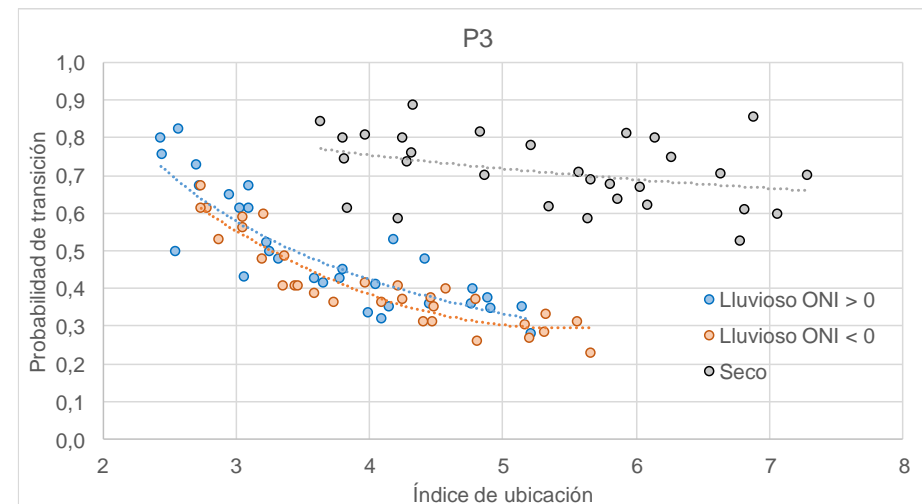
# Resultados: aplicaciones del modelo

- Modelo markoviano de primer orden, empleando probabilidades de transición puede ser utilizado para:
  - Relleno y extensión de series de precipitación a escala diaria, aleatoriamente o a través de una estación patrón
  - Generación de series sintéticas de precipitaciones para cualquier punto sin control pluviométrico
  - Particularmente en cuencas ubicadas entre 20°- 21°S

## Probabilidad de seco a seco



## Probabilidad de lluvia a seco



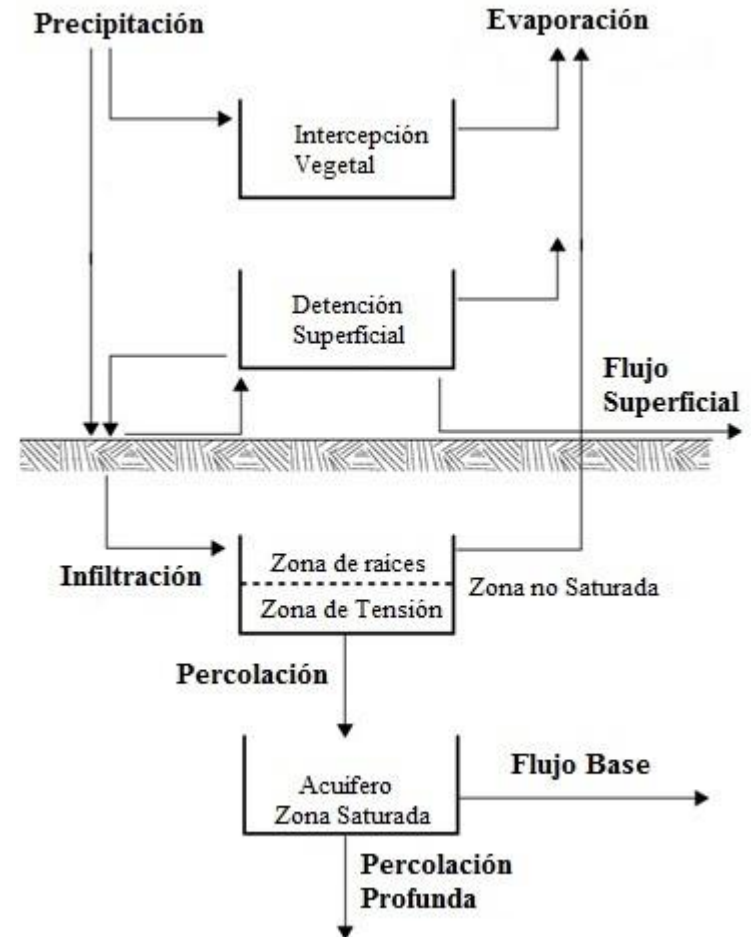
# Resultados: validación en estación DGA

- Relleno: 28% de la serie
- Generación serie sintética en ubicación de estación:
  - Patrón DGA
  - Dos variables aleatorias

		PP DGA	PP DGA rell.	PP (x,y,z) Patrón DGA	PP (x,y,z) VA 1	PP (x,y,z) VA 2
<b>Diaria</b>	Media	0,409	0,395	0,404	0,393	0,414
	D. Estándar	9,7	10,1	9,4	8,9	8,5
	Máximo	60	60	60	53	50
	Días de lluvia	785	1029	1020	978	1013
<b>Mensual</b>	Media	12,5	12,0	12,3	12,0	12,6
	D. Estándar	3,1	3,1	3,0	2,8	3,0
	Máximo	170	170	170	155	191
<b>Anual</b>	Media	131	139	142	138	146
	D. Estándar	78	77	72	67	79
	Máximo	366	366	349	255	430

# Modelo precipitación escorrentía

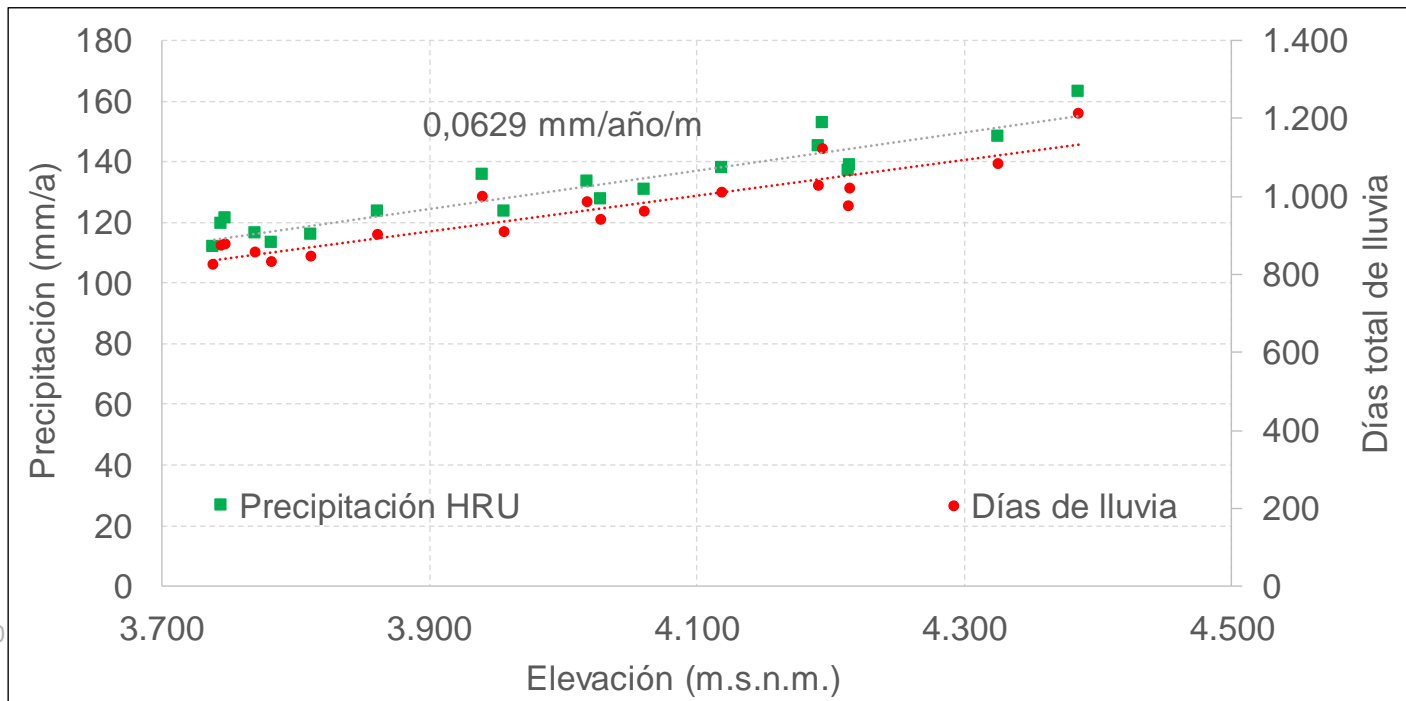
- Modelo Precipitación-Escorrentía a escala diaria, implementado en ExtendSim (HEC-HMS)
  - División de la superficie en Unidades de Respuesta hidrológicas (HRU)
  - Datos de entrada HRU: precipitación, evaporación y temperatura de estación patrón, y caudal HRU aguas arriba
  - Datos de salida HRU: precipitación, evaporación real, flujo superficial, flujo base y recarga por precipitaciones al acuífero



# Resultados

- Precipitaciones para puntos sin control pluviométrico en función de su posición (x,y,z).
- Mientras más al norte, más al este y a mayor altitud, hay más días de lluvia sin un aumento en la magnitud de las precipitaciones ocurridas

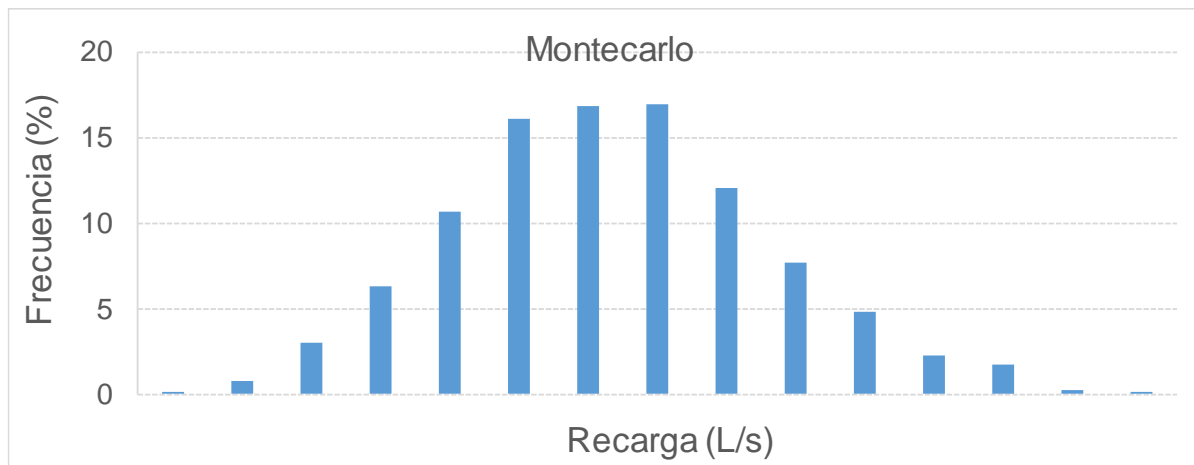
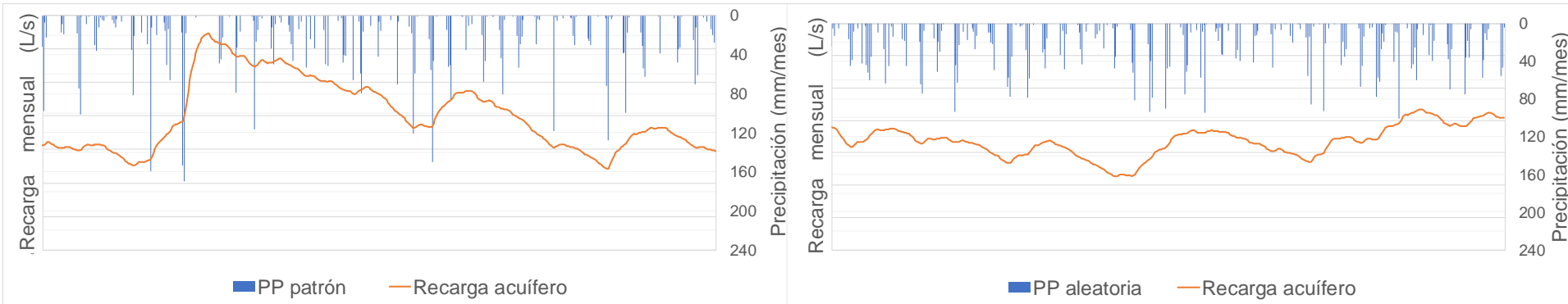
$$\frac{z^\alpha + \frac{N - Ni}{190} + \frac{E - Ei}{190}}{1.000}$$





# Resultados

- Balance de agua (modelo precipitación-escorrentía) para distintas probabilidades de ocurrencia



# Contenido

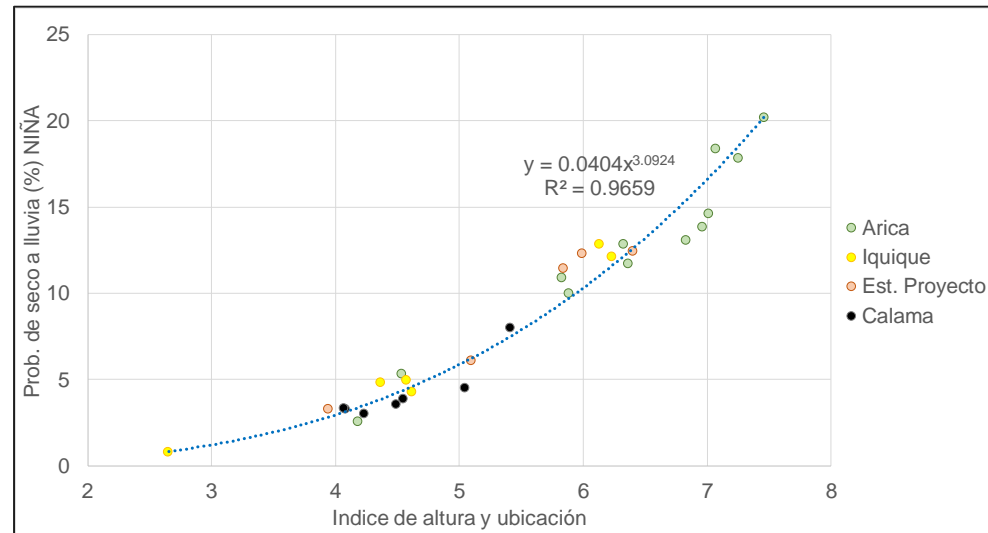
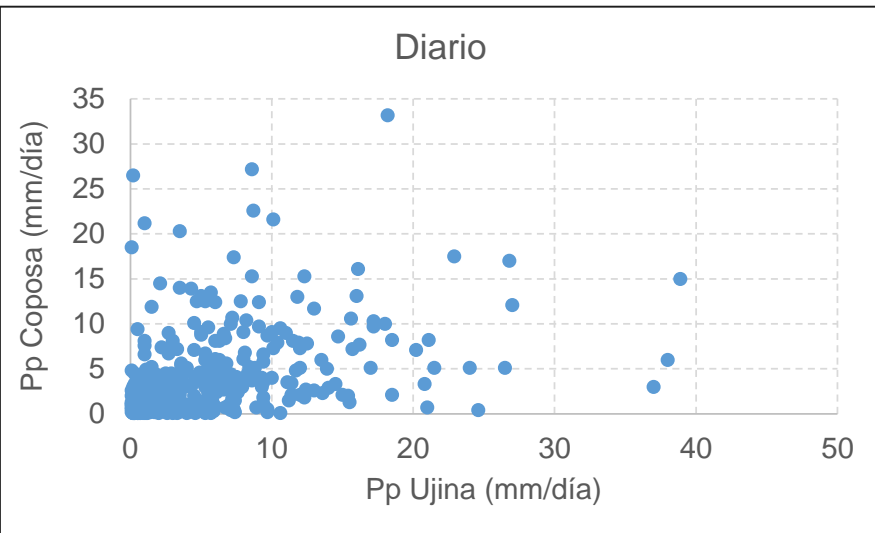
- Introducción: contexto y objetivos
- Metodología
- Resultados
- Conclusiones

# Conclusiones

- Esta metodología permite generar series sintéticas de precipitaciones a nivel diario en zonas sin registros pluviométricos
- Estas series mantienen las características de las tormentas estivales de la zona altiplánica, esto es, precipitaciones intensas que ocurren aleatoriamente
- Esta metodología genera resultados más representativos a nivel diario que extrapolar mediante gradiente de precipitación vs altura, pues lo que ocurre es que aumenta el número de días de lluvia, no la magnitud de las tormentas
- De este modo se obtienen series de precipitación que permiten calcular el balance hídrico de cuencas altiplánicas de manera más realista (recarga subterránea)
- Se logró generalizar la metodología a una amplia zona del altiplano chileno, entre el extremo norte y la cuenca alta del río Loa
- Este acercamiento probabilístico permite estudiar el balance hídrico, y en particular las recargas a los acuíferos, bajo diferentes probabilidades de excedencia

## ANTES

## AHORA



# GENERACIÓN ESTOCÁSTICA DE SERIES DIARIAS DE PRECIPITACIONES EN EL ALTIPLANO CHILENO

CUARTA JORNADA TÉCNICA ALHSUD 2019

Eduardo Varas C. (PhD)  
Javier Uribe B. (MSc)

27 de junio de 2019