



Scientia Agropecuaria

Web page: <http://revistas.unitru.edu.pe/index.php/scientiaagrop>

Facultad de Ciencias
Agropecuarias

Universidad Nacional de
Trujillo

RESEARCH ARTICLE



Agricultural zoning of climatic risks for quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) cultivation in the Peruvian Altiplano

Zonificación agrícola de riesgos climáticos para el cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) en el Altiplano Peruano

Wilfredo Julián Yzarra-Tito^{1*} ; Oscar Machaca¹ ; Angela Peña¹ ; Angelo Zolezzi¹
Cinthia Ancori¹ ; Hugo Ramos¹ ; Sixto Flores¹ ; Balbino Antonio Evangelista²

¹ Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología-SENAMHI, Sede Central Jr. Cahuide 785, Jesús María, Lima.

² Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria, Parque Estação Biológica - PqEB, S/Nº, Brasília, DF CEP 70770-901, Brasil.

* Corresponding author: wyzarra@senamhi.gob.pe (W. J. Yzarra-Tito).

Received: 8 April 2025. Accepted: 2 September 2025. Published: 5 October 2025.

Abstract

The objective of this study was to conduct agricultural zoning of climate risk for quinoa cultivation. Data from 38 meteorological stations of the National Meteorology and Hydrology Service in Puno region were used. The zoning was based on the development of the water balance model, applying the water requirement satisfaction index (ISNA), for two levels of soil available water capacity (115 mm/m and 145 mm/m). Spatial analysis of the ETr/ETm ratio, obtained from the SARRAZON model, was carried out for each phenological stage through frequency analysis of ISNA values. These data were processed in ArcGIS10.0, using the ordinary kriging interpolation method. Once the maps were generated, they were clipped to the quinoa production zones of the region and classified as follows: for Phase I: low risk (ISNA ≥ 0.65); medium risk ($0.55 < \text{ISNA} < 0.65$) and high risk (ISNA ≤ 0.55), considered for the emergency stage; and for phase III the following ranges were considered: low risk (ISNA ≥ 0.55); medium risk ($0.45 < \text{ISNA} < 0.55$) and high risk (ISNA ≤ 0.45) during flowering and grain filling. September was identified as the month with the highest exposure to climate risk; October presented intermediate conditions; and November was the safest month, showing a predominance of low-risk zones. However, late sowing may expose the crop to critical water deficits during the final phases of quinoa cultivation.

Keywords: quinoa; spatial analysis; agricultural zoning; water balance; climate risk.

Resumen

El objetivo de este estudio fue realizar la zonificación agrícola del riesgo climático para el cultivo de quinua. Se utilizaron datos de 38 estaciones meteorológicas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología en Puno. La zonificación se basó en el desarrollo del balance hídrico, usando el índice de satisfacción de las necesidades hídricas (ISNA), para dos niveles de capacidad hídrica disponible de los suelos (115 mm/m y 145 mm/m). Posteriormente, se realizó el análisis espacial de la relación entre ETr/ETm obtenido mediante el modelo SARRAZON para cada fase fenológica del cultivo, a través de un análisis de frecuencia de ocurrencia de los valores de ISNA. Estos datos fueron procesados en ArcGIS10.0, con el uso del método de interpolación kriging ordinario. Una vez generados los mapas, se recortaron a las zonas de producción de quinua en la región y se clasificaron de acuerdo con los siguientes rangos: para la Fase I (emergencia): riesgo bajo (ISNA $\geq 0,65$); riesgo medio ($0,55 < \text{ISNA} < 0,65$) y riesgo alto (ISNA $\leq 0,55$); y para la fase III (floración y llenado de grano): riesgo bajo (ISNA $\geq 0,55$); riesgo medio ($0,45 < \text{ISNA} < 0,55$) y riesgo alto (ISNA $\leq 0,45$). Setiembre se identificó con mayor exposición al riesgo climático; octubre presenta una opción intermedia; y noviembre es el mes más seguro, con predominancia de riesgo bajo; sin embargo, la siembra tardía puede exponer al cultivo a déficits hídricos críticos durante las fases finales del cultivo de quinua.

Palabras clave: quinua; análisis espacial; zonificación agrícola; balance hídrico; riesgo climático.

DOI: <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2026.001>

Cite this article:

Yzarra-Tito, W., Machaca, O., Peña, A., Zolezzi, A., Ancori, C., Ramos, H., Flores, S., & Evangelista, B. A. (2026). Zonificación agrícola de riesgos climáticos para el cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) en el Altiplano Peruano. *Scientia Agropecuaria*, 17(1), 7-20.

1. Introducción

La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) es un cultivo ancestral de alto valor nutricional y tolerancia al estrés abiótico, fundamental en la alimentación andina y actualmente cultivado en más de 120 países (Gaur et al., 2025). Según la **Gerencia Regional de Desarrollo Agrario (2025)**, en Perú la quinua es el tercer cultivo más extenso en Puno, con una superficie de 36 868 ha. En el Perú, la quinua constituye el segundo cultivo en importancia en Puno, con 33 133 ha sembradas en la campaña 2024–2025. Sin embargo, entre enero y abril de 2025 su aporte económico disminuyó, representando solo el 10,13 % del PBI agrícola departamental (MIDAGRI, 2025). Su producción en el Altiplano, basada en sistemas de secano, es altamente vulnerable a precipitaciones intensas y heladas (DRAP, 2023). La tolerancia a la sequía varía según el genotipo, afectando rendimiento y fotosíntesis; algunos muestran alta adaptabilidad, mientras que otros reducen su desempeño, aunque la recuperación es posible tras el riego (Lupa-Condo et al., 2024; Saddiq et al., 2021; Manaa et al., 2021).

La agricultura altiplánica requiere estudios agrometeorológicos para definir zonas y épocas de siembra en función del riesgo climático. La zonificación agroclimática, basada en el Índice de Satisfacción de las Necesidades de Agua (ISNA), integra balance hídrico y fases fenológicas para evaluar requerimientos hídricos (Gonçalves et al., 2020) y ha sido aplicada en trigo (Aparecido et al., 2023), yuca (De Oliveira et al., 2020), soja (Melo et al., 2020), mango y papaya (Caldana et al., 2020) y maracuyá (Martelócio et al., 2020). Estos estudios permiten delimitar áreas con distintos niveles de riesgo productivo mediante información agroclimática, edáfica y fenológica integrada a modelos agrometeorológicos y Sistemas de Información Geográfica (SIG). La zonificación agrícola de riesgos climáticos es clave para la planificación territorial y la sostenibilidad productiva. En el caso de la quinua, pese a su importancia socioeconómica y tolerancia a condiciones extremas, existe un déficit de estudios que integren datos climáticos y modelos agrometeorológicos para delimitar zonas de riesgo, limitando la anticipación de impactos y el diseño de estrategias de adaptación.

Este estudio aborda dicha brecha mediante una zonificación basada en información climática y modelamiento agrometeorológico, ofreciendo una herramienta para optimizar la planificación de siembras, mejorar la gestión del riesgo y fortalecer la resiliencia del cultivo en el Altiplano peruano.

2. Metodología

2.1. Datos meteorológicos

Se analizaron datos de 38 estaciones del SENAMHI en Puno (1990–2023). Se realizó un análisis exploratorio para detectar valores atípicos e información incompleta. La calidad de las series climáticas se garantizó con RClimDex (Kalita et al., 2021) y la homogeneización de datos con Climatol, corrigiendo inhomogeneidades y estimando valores faltantes (Gujjarro, 2024).

2.2 Evapotranspiración potencial o de referencia (ET_o)

La evapotranspiración de referencia (ET_o) se estimó con el ET_o Calculator v3.2 de la FAO, aplicando el método de Penman-Monteith (Allen et al., 2006) estimado a partir de datos de temperatura y radiación solar de cada estación meteorológica (Figura 1). Este método, adoptado como estándar por su base física y precisión para superficies sin limitaciones hídricas, es ampliamente recomendado (Rajavel et al., 2022).

2.3 Capacidad de Agua Disponible (CAD)

Las propiedades físico-hídricas del suelo en el altiplano peruano se obtuvieron de la base de datos SoilGrids250m (<http://soilgrids.org>), definiéndose dos clases de suelo (Tabla 1). La reserva máxima de agua disponible en la zona radicular del cultivo de quinua se estimó como el producto entre la profundidad efectiva del sistema radicular y el agua disponible (Pulvento et al., 2015), correspondiendo a valores promedios espaciales derivados del modelo. Esta información se vinculó a nivel de estación meteorológica para calcular el balance hídrico mediante el Índice de Satisfacción de la Necesidad de Agua (ISNA), y se procesó en ArcGIS 10,0 mediante interpolación kriging para elaborar los mapas de zonificación agrícola de riesgo climático.

Tabla 1

Características físico-hídricas del suelo

Suelo	Agua disponible (AD) /almacenamiento (mm/m)	Profundidad de raíz efectiva (m)	CAD (mm) Quinua
Tipo 1	115	0,60	69
Tipo 2	145	0,60	87

2.4 Duración del ciclo y fases fenológicas

Las evaluaciones fenológicas se realizaron siguiendo la escala BBCH para quinua propuesta por Sosa-Zúñiga et al. (2017), registrando desde la emergencia hasta la maduración fisiológica (Figura 2 y Tabla 2). Los datos se agruparon en cuatro etapas de desarrollo: crecimiento inicial (I), desarrollo vegetativo (II), periodo intermedio (III) y fin del ciclo (IV).

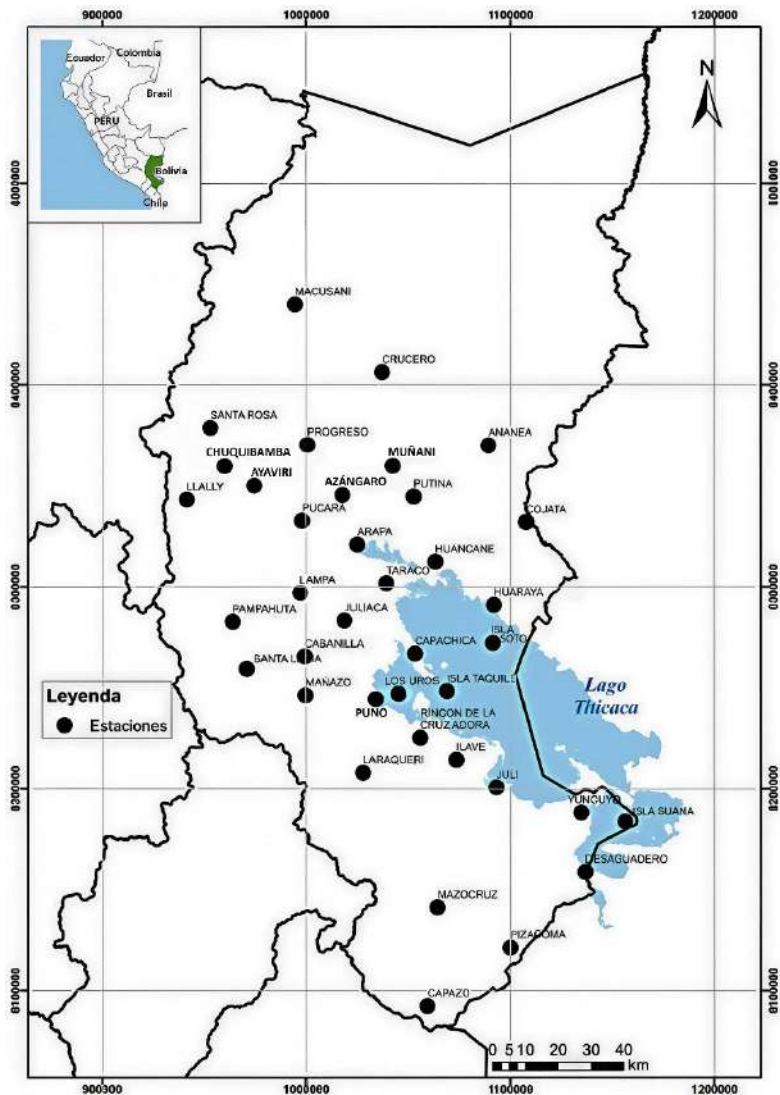


Figura 1. Red de estaciones meteorológicas del Senamhi-Puno.



Figura 2. Fases fenológicas del cultivo de quinua (var. Salcedo INIA).

Tabla 2
Duración promedio del ciclo y fases del cultivo de quinua

Grupos/Varietades	Ciclo promedio (días)	Variación del ciclo (días)	Fase I	Fase II	Fase III	Fase IV
Grupo 1: Pasankalla, Salcedo INIA	145	≤ 145	10	75	30	30
Grupo 2: Blanca de Juli	160	>145	10	60	40	50

2.5 Coeficiente del cultivo (Kc)

El coeficiente de cultivo (Kc) de la quinua se determinó en el Altiplano mediante lisímetro, registrando la evapotranspiración del cultivo (ETc) y datos fenológicos en cuatro etapas y periodos de 10 días. El Kc se calculó como $Kc = ETc/ETo$, siendo la ETo estimada con el método Penman-Monteith (Falcón, 2020). Los resultados se presentan en la **Tabla 3**.

Tabla 3
Duración promedio del ciclo y Kc del cultivo de quinua

Etapas de desarrollo del cultivo	Kc	
	Grupo 1: variedad precoz (145 días)	Grupo 2: variedad tardía (160 días)
Etapas I: Crecimiento inicial	0,60	0,60
Etapas II: Desarrollo del cultivo	0,65 – 0,82	0,65 – 0,79
Etapas III: Periodo intermedio	1,01 – 1,06	0,82 – 1,06
Etapas IV: Fin del ciclo	1,11 – 0,98	1,18 – 0,91

2.6 Análisis de riesgos por deficiencia hídrica

Se utilizó el modelo de balance hídrico climático SARRAZON (Lavarenne et al., 2025; Baron et al., 1996) para estimar el Índice de Satisfacción de las Necesidades de Agua (ISNA) en dos etapas fenológicas críticas de la quinua: siembra-emergencia (Fase I) y floración-llenado inicial de grano (Fase III), identificadas como las más sensibles al estrés hídrico (**Tabla 4**). El ISNA se calculó como la relación entre la ETc y ETo, considerando dos tipos de suelo y dos variedades con ciclos de 145 y 160 días. Se establecieron umbrales mínimos de ISNA de 0,65 para la Fase I y de 0,55 para la Fase II, a fin de determinar el nivel de riesgo climático.

Tabla 4
Clasificación del riesgo climático en base al índice de Satisfacción de la necesidad de agua (ISNA) para el cultivo de quinua

Fase fenológica	Índice de Satisfacción de la Necesidad de Agua (ISNA)	Tipo de riesgo
Fase I: emergencia	ISNA ≥ 0,65	Riesgo bajo
	0,65 > ISNA > 0,55	Riesgo medio
	ISNA ≤ 0,55	Riesgo alto
Fase III: Floración e inicio de llenado de grano	ISNA ≥ 0,55	Riesgo bajo
	0,55 > ISNA > 0,45	Riesgo medio
	ISNA ≤ 0,45	Riesgo alto

Se simularon periodos de 30 días antes de la siembra y después de la cosecha, evaluando decenios y tipos de suelo con fechas representativas los días 5, 15 y 25 de cada mes (**Tabla 5**). Los balances hídricos, generados para estaciones meteorológicas entre 1990 y 2023, se procesaron en ArcGIS 10,0 mediante interpolación kriging para elaborar mapas de riesgo climático según zonas productoras de quinua. La integración de resultados de las fases I y III permitió desarrollar mapas de zonificación agrícola a escala distrital para la región de Puno, identificando las épocas óptimas de siembra.

Tabla 5
Fechas de siembra y cosecha utilizadas en la simulación del balance hídrico para el cultivo de quinua

Decenio	Ciclo 145 días		Ciclo 160 días	
	Siembra	Cosecha	Siembra	Cosecha
25	05/09	28/01	05/09	12/02
26	15/09	07/02	15/09	22/02
27	25/09	17/02	25/09	04/03
28	05/10	27/02	05/10	14/03
29	15/10	09/03	15/10	24/03
30	25/10	19/03	25/10	02/04
31	05/11	30/03	05/11	14/04
32	15/11	09/04	15/11	24/04
33	25/11	19/04	25/11	04/05

3. Resultados y discusión

3.1 Zonificación agrícola de riesgos por deficiencia hídrica

La distribución espacial del ISNA se ha interpolado en función a la cobertura de la zona de producción de la quinua y evidencia patrones similares en los dos niveles de reserva evaluados (**Figuras 3, 4, 5 y 6**), reflejo de la topografía homogénea del centro y sur de Puno y la complejidad geográfica al norte. La precipitación, concentrada entre enero y marzo debido a procesos convectivos sobre los Andes centrales, condiciona la dinámica hídrica del cultivo de quinua en la región (**Gutierrez-Villarreal et al., 2024**). Los mapas generados mostraron áreas favorables o de bajo riesgo climático en áreas verdes, desfavorables o alto riesgo climático de color rojo; y, en zonas de riesgo intermedio, de color amarillo. En setiembre, bajo un escenario del 20% de probabilidad, se identifican zonas de bajo riesgo en áreas circunlacustres; sin embargo, al 50% y 80% de probabilidad, el riesgo alto predomina ampliamente.

Octubre representa una mejora significativa, con mayor extensión de zonas favorables, especialmente al 20%. En noviembre, el riesgo bajo se intensifica, particularmente en el Altiplano, aunque con una ligera reaparición de zonas de riesgo alto al 80% de probabilidad.

Tal como se observa en las **Figuras 3, 4, 5 y 6**, el análisis por épocas de siembra evidencia que la primera fecha (día 5 de cada mes), correspondiente a siembras tempranas, presenta el mayor riesgo climático, asociado principalmente a la ocurrencia de heladas y a la limitada disponibilidad hídrica (**Maturana, 2021; Canedo-Rosso et al., 2021**).

Diversos estudios señalan que la exposición temprana del cultivo de quinua a estas condiciones adversas puede reducir significativamente el rendimiento, y que la adaptación al cambio climático requiere ajustes estratégicos en el calendario de siembra (**Ballesteros & Isaza, 2021**).

La segunda fecha de siembra (día 15 de cada mes) muestra una ligera disminución del riesgo, especialmente en noviembre, lo que concuerda con investigaciones que indican que siembras intermedias permiten un balance más favorable entre estabilidad climática y disponibilidad de recursos hídricos. Finalmente, la tercera fecha (día 25 de cada mes), particularmente en noviembre, presenta los escenarios más favorables para el cultivo, debido a una mayor estabilidad climática y disponibilidad de agua; no obstante, debe considerarse el riesgo potencial de precipitaciones excesivas hacia el final del ciclo fenológico, las cuales podrían afectar la calidad y cantidad de la producción (**Taaimé et al., 2023**).

La **Figura 7** muestra las recomendaciones de siembra para quinua de ciclo temprano (145 días) en suelos con CAD de 115 mm/m, lo que indica disponibilidad hídrica moderada. Aunque la especie es tolerante a la sequía, la humedad insuficiente puede afectar el rendimiento. En un escenario de riesgo del 20%, distritos del norte del Lago Titicaca y provincias como Azángaro presentan alta vulnerabilidad en setiembre, mientras que las zonas circunlacustres permiten siembras tempranas limitadas entre el 1 y 21 de dicho mes. Sin embargo, la baja acumulación de precipitaciones inicial y el retraso de las lluvias en campañas recientes (**DRAP, 2023**) incrementan el riesgo de estrés hídrico, especialmente crítico en etapas tempranas (**Maturana, 2021**), afectando producción y parámetros fisiológicos (**Saddiq et al., 2021; Valdivia et al., 2021**). Octubre y noviembre constituyen las ventanas de siembra más favorables para la quinua en Puno. Octubre coincide con el inicio de las lluvias, optimizando la disponibilidad hídrica y reduciendo el déficit en fases iniciales (**SENAMHI, 2023**). En noviembre,

aunque la mayor precipitación disminuye el riesgo inicial, la siembra tardía puede prolongar el ciclo hacia la temporada seca, generando déficits en llenado y maduración.

La estacionalidad de lluvias respalda siembras entre setiembre y noviembre (**MIDAGRI, 2019**), y experiencias internacionales confirman beneficios de la siembra en temporada lluviosa (**Taaimé et al., 2022**). Sin embargo, se han registrado reducciones de rendimiento bajo sequía terminal (**Lupa-Condo et al., 2024**), aunque mecanismos de regulación hídrica permiten mantener rendimiento y calidad del grano incluso con riego limitado (**Valdivia et al., 2021**).

Para quinua tipo 1 (145 días) en suelos con CAD de 145 mm/m, las recomendaciones de siembra para riesgos del 20% y 50% muestran patrones similares a los de suelos con CAD de 115 mm/m (**Tabla 6**). En setiembre, con riesgo del 20%, las áreas aptas se concentran cerca del Lago Titicaca; con riesgo del 50%, la superficie apta se amplía, pero aumenta la exposición al déficit en zonas más alejadas o con suelos de baja retención. En octubre, la ventana de siembra se extiende a la mayor parte de la región, aunque los suelos de menor CAD siguen siendo vulnerables. En noviembre, las áreas aptas se amplían aún más, pero se incrementa el riesgo de déficit hídrico.

Para quinua tipo 2 (160 días) en suelos con CAD de 115 mm/m, octubre y noviembre son los periodos óptimos bajo un escenario de riesgo del 20% (**Figura 8**). En setiembre, predomina el riesgo alto, limitando la siembra a zonas circunlacustres del Lago Titicaca. Con riesgo del 50%, la superficie apta se amplía, pero con mayor exposición al déficit hídrico en la fase inicial. En octubre, bajo riesgo del 20%, gran parte del Altiplano presenta condiciones óptimas; con riesgo del 50%, casi toda la región es apta, aunque las áreas más alejadas muestran vulnerabilidad. En noviembre, con riesgo del 20%, la superficie apta se reduce ligeramente por la menor probabilidad de completar el ciclo de 160 días, lo que puede comprometer el rendimiento final; con riesgo del 50%, las zonas más vulnerables enfrentan riesgo de estrés hídrico ante precipitaciones insuficientes o tardías (**Tabla 7**). En suelos con CAD de 145 mm/m, los resultados confirman que las fechas óptimas de siembra bajo riesgo del 20% corresponden a octubre y noviembre en la mayoría de los distritos de Puno. Con riesgo del 50%, el patrón es similar al de CAD de 115 mm/m, aunque con tendencia a concentrar la siembra en noviembre para aprovechar la mayor disponibilidad hídrica en la fase inicial del cultivo.

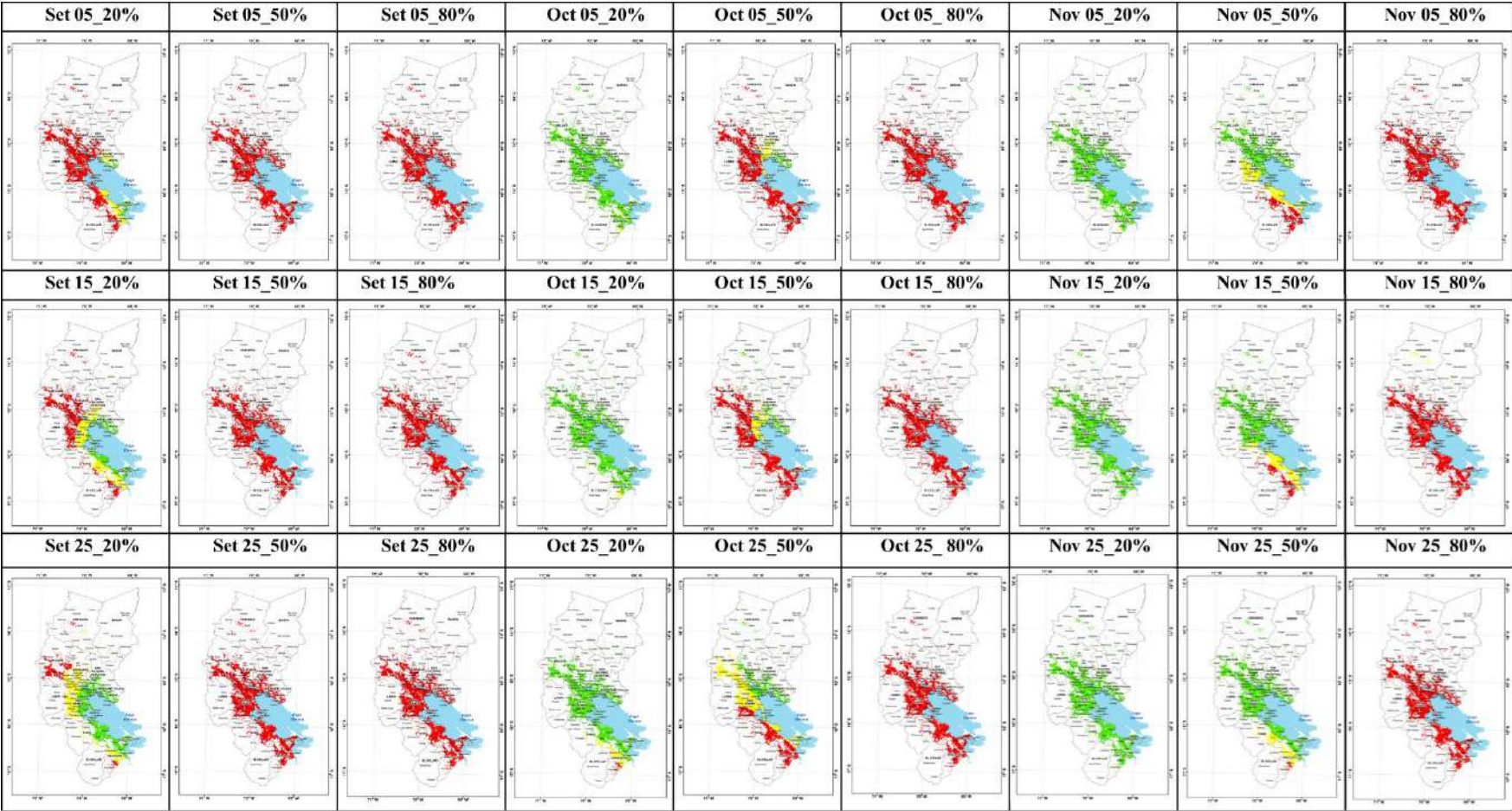


Figura 3. Evaluación del riesgo climático para el cultivo de quinua de ciclo temprano (145 días) en el Altiplano Peruano, basada en el Índice de Satisfacción de Necesidades Hídricas (ISNA) y una reserva útil de agua de 115 mm/m. Se representan escenarios de riesgo hídrico del 20%, 50% y 80% para tres fechas de siembra (5, 15 y 25 de setiembre, octubre y noviembre). [■ Riesgo Alto; ■ Riesgo Medio; ■ Riesgo Bajo].

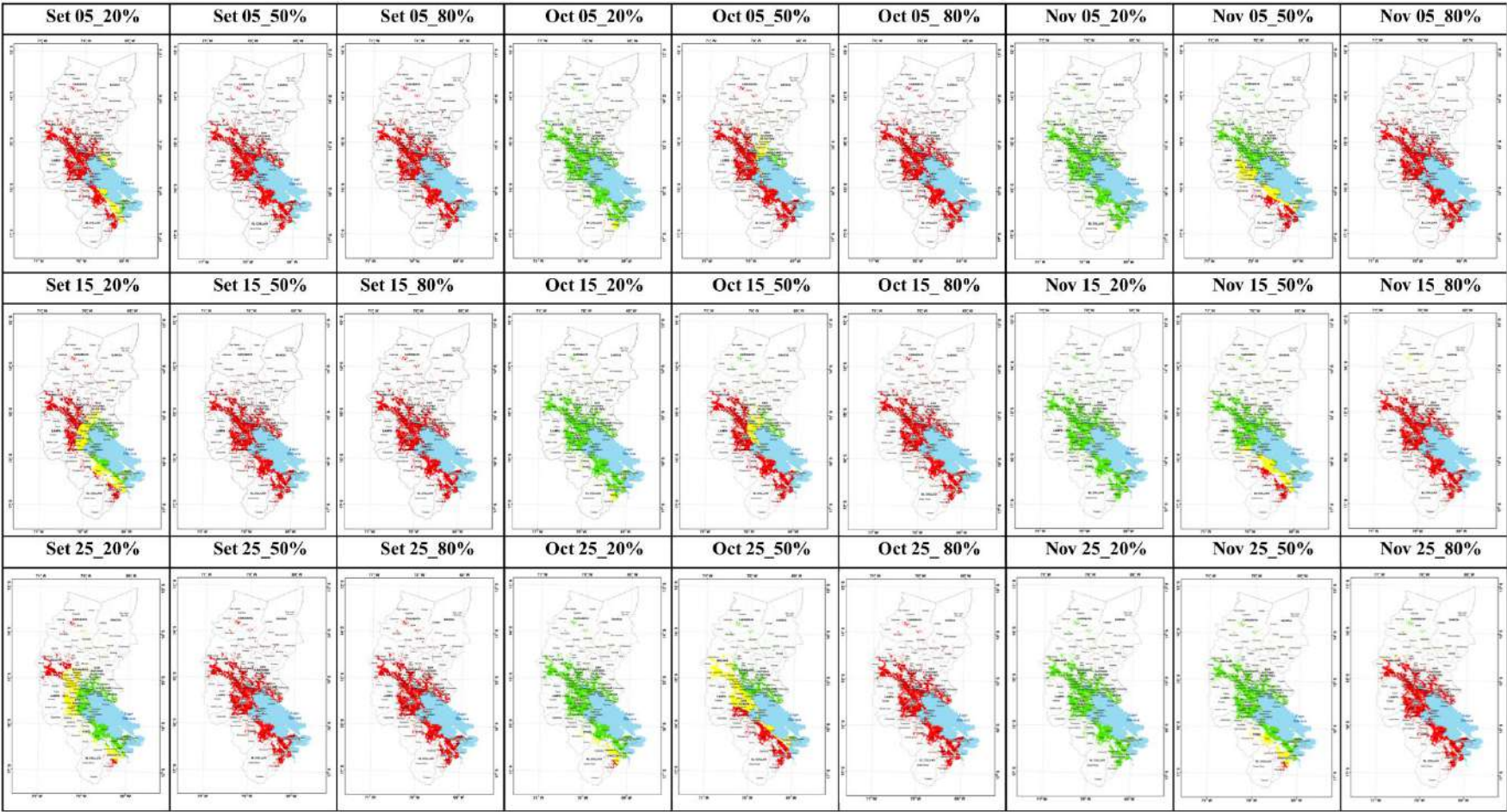


Figura 4. Evaluación del riesgo climático para el cultivo de quinua de ciclo temprano (145 días) en el Altiplano Peruano, basada en el Índice de Satisfacción de Necesidades Hídricas (ISNA) y una reserva útil de agua de 145 mm/m. Se representan escenarios de riesgo hídrico del 20%, 50% y 80% para tres fechas de siembra (5, 15 y 25 de setiembre, octubre y noviembre). [■ Riesgo Alto; ■ Riesgo Medio; ■ Riesgo Bajo].

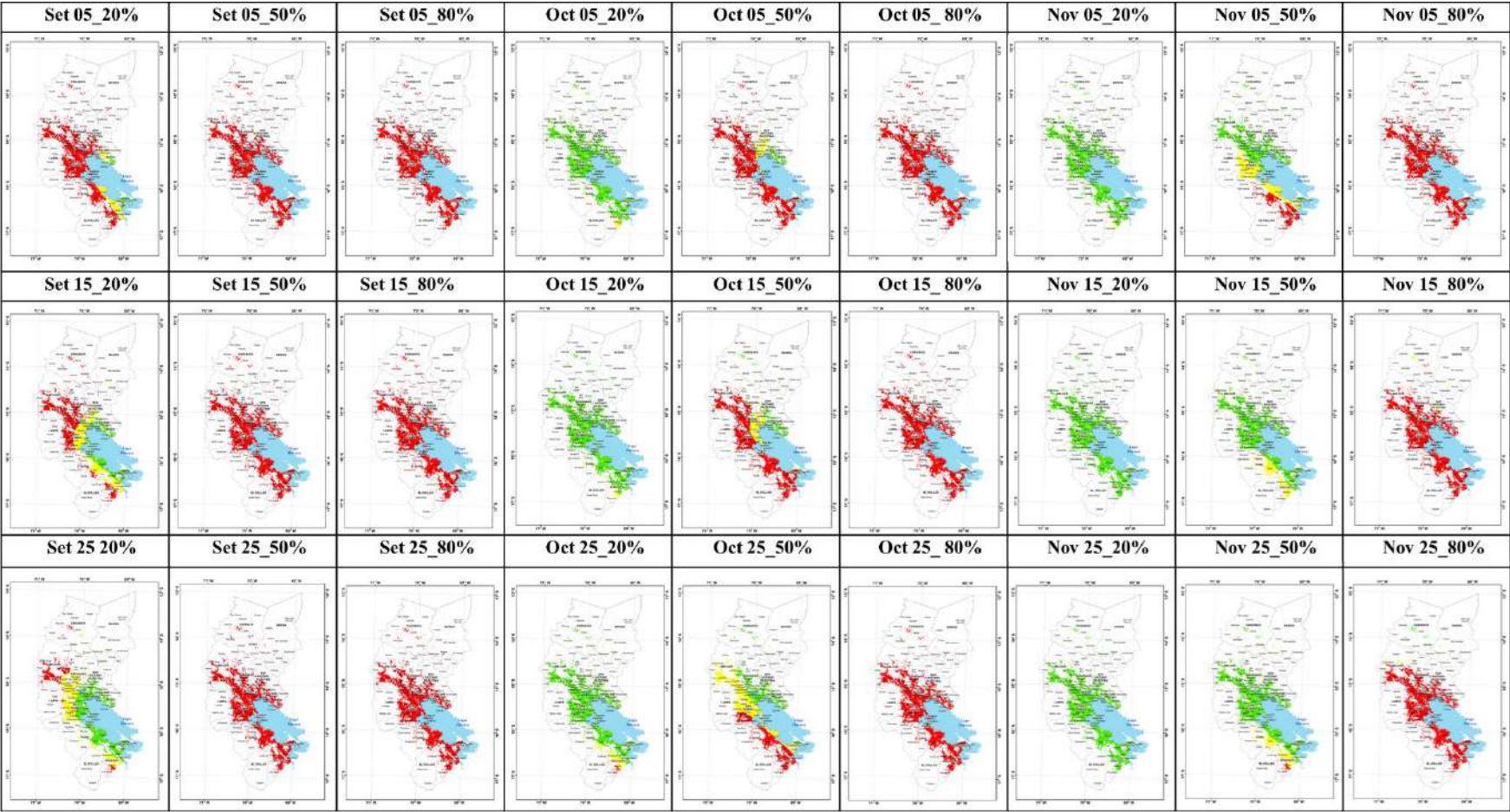


Figura 5. Evaluación del riesgo climático para el cultivo de quinua de ciclo temprano (160 días) en el Altiplano Peruano, basada en el Índice de Satisfacción de Necesidades Hídricas (ISNA) y una reserva útil de agua de 115 mm/m. Se representan escenarios de riesgo hídrico del 20%, 50% y 80% para tres fechas de siembra (5, 15 y 25 de setiembre, octubre y noviembre). [Red] Riesgo Alto; [Yellow] Riesgo Medio; [Green] Riesgo Bajo].

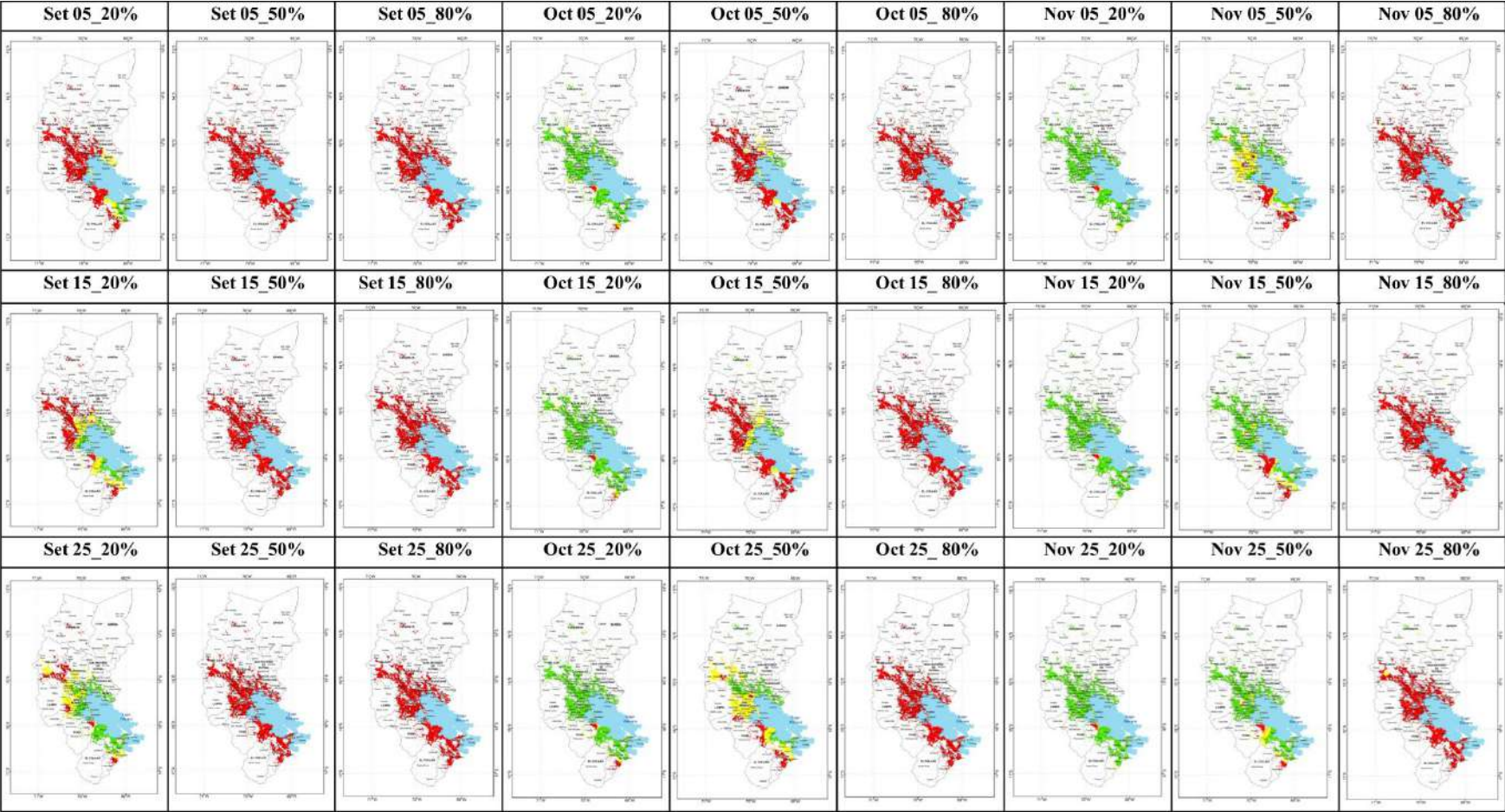


Figura 6. Evaluación del riesgo climático para el cultivo de quinua de ciclo temprano (160 días) en el Altiplano Peruano, basada en el Índice de Satisfacción de Necesidades Hídricas (ISNA) y una reserva útil de agua de 145 mm/m. Se representan escenarios de riesgo hídrico del 20%, 50% y 80% para tres fechas de siembra (5, 15 y 25 de setiembre, octubre y noviembre). [■ Riesgo Alto; ■ Riesgo Medio; ■ Riesgo Bajo].

Tabla 6

Porcentaje de áreas de riesgo para el cultivo de quinua de tipo 1 (145 días), considerando una capacidad de agua disponible (CAD) de 115 mm/m y 145 mm/m, para la campaña agrícola de siembras simuladas en condiciones bajo secano adaptado para la zonificación agrícola del riesgo climático

Agua disponible (mm/m)	Clases de riesgo	Mes	Primera época de siembra			Segunda época de siembra			Tercera época de siembra		
			AnF_20%	AnF_50%	AnF_80%	AnF_20%	AnF_50%	AnF_80%	AnF_20%	AnF_50%	AnF_80%
115	Alto	Setiembre	79,8	100	100	45,3	100	100	14,7	100	100
	Medio		13,2	0	0	32,5	0	0	34,0	0	0
	Bajo		6,9	0	0	22,1	0	0	51,1	0	0
	Alto		80,5	100	100	45,3	100	100	14,7	100	100
	Medio		14,2	0	0	32,5	0	0	34,0	0	0
	Bajo		5,2	0	0	22,1	0	0	51,1	0	0
145	Alto	Octubre	0,1	84,2	100	0	74,6	100	1,4	31,7	100
	Medio		2,0	8,5	0	2,7	14,2	0	8,0	40,8	0
	Bajo		97,9	7,3	0	97,2	11,1	0	89,3	27,4	0
	Alto		0	84,6	100	0	74,6	100	1,3	31,7	100
	Medio		2,9	8,3	0	2,7	14,2	0	8,0	40,8	0
	Bajo		97,1	7,1	0	97,2	11,1	0	90,7	27,4	0
115	Alto	Noviembre	0,0	18,6	100	0	12,0	98,2	0	1,8	100
	Medio		1,0	27,3	0	0	20,2	1,6	0	12,4	0
	Bajo		99,0	54,0	0	100	67,8	0,3	100	85,8	0
	Alto		0,0	18,6	100	0	12,0	98,2	0	1,8	97
	Medio		1,0	27,3	0	0	20,2	1,6	0	12,3	1
	Bajo		99,0	54,0	0	100	67,8	0,3	100	85,8	2

Tabla 7

Porcentaje de áreas de riesgo para el cultivo de quinua de tipo 2 (160 días), considerando una capacidad de agua disponible (CAD) de 115 mm/m y 145 mm/m, para la campaña agrícola de siembras simuladas en condiciones bajo secano adaptado para la zonificación agrícola del riesgo climático

Agua disponible (mm/m)	Clases de riesgo	Mes	Primera época de siembra			Segunda época de siembra			Tercera época de siembra		
			AnF_20%	AnF_50%	AnF_80%	AnF_20%	AnF_50%	AnF_80%	AnF_20%	AnF_50%	AnF_80%
115	Alto	Setiembre	82,0	100	100	46,7	100	100	14,7	100	100
	Medio		13,3	0	0	32,3	0	0	34,4	0	0
	Bajo		4,6	0	0	20,8	0	0	50,7	0	0
	Alto		79,2	100	100	47,3	100	100	17,1	100	100
	Medio		12,7	0	0	29,1	0	0	31,9	0	0
	Bajo		6,7	0	0	22,1	0	0	49,5	0	0
145	Alto	Octubre	0	84,6	100	0	74,6	100	1,3	31,7	100
	Medio		2,9	8,3	0	2,7	14,2	0	8,0	40,8	0
	Bajo		97,1	7,1	0	97,2	11,1	0	90,7	27,4	0
	Alto		2,9	82,9	100	3	70,4	100	3,7	17,4	100
	Medio		3,6	10,9	0	3,1	19,3	0	3,0	48,9	0
	Bajo		92,2	4,9	0	93,0	8,9	0	92,0	32,2	0
115	Alto	Noviembre	0	18,8	100	0	0,3	98,2	0	2,1	97
	Medio		1,3	31,2	0	0	14,8	1,7	0	12,5	1
	Bajo		98,7	50,0	0	100	84,9	0,1	100	85,4	2
	Alto		1,9	21,5	98	1	14,8	98,3	1	4,8	96
	Medio		2,1	36,2	0	1	14,6	0,5	1	11,9	2
	Bajo		94,6	40,9	0	96	69,2	0,0	96	81,9	1

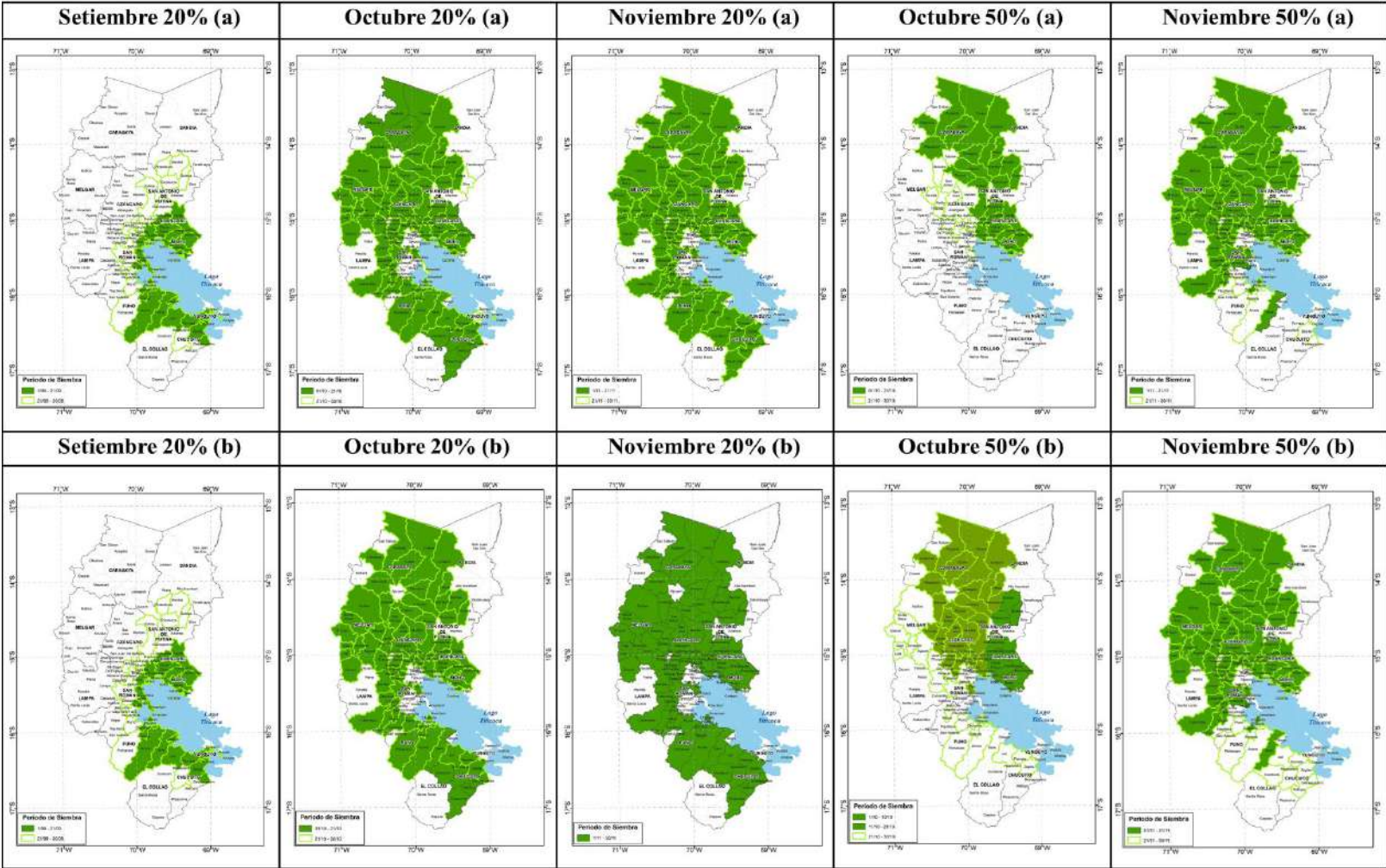


Figura 7. Época de siembra recomendada para la quinua (145 días) para el suelo con CAD de 115 mm/m (a) y 145 mm/m (b) para un nivel de riesgo 20% y 50% para setiembre, octubre y noviembre en la región del Altiplano Peruano.

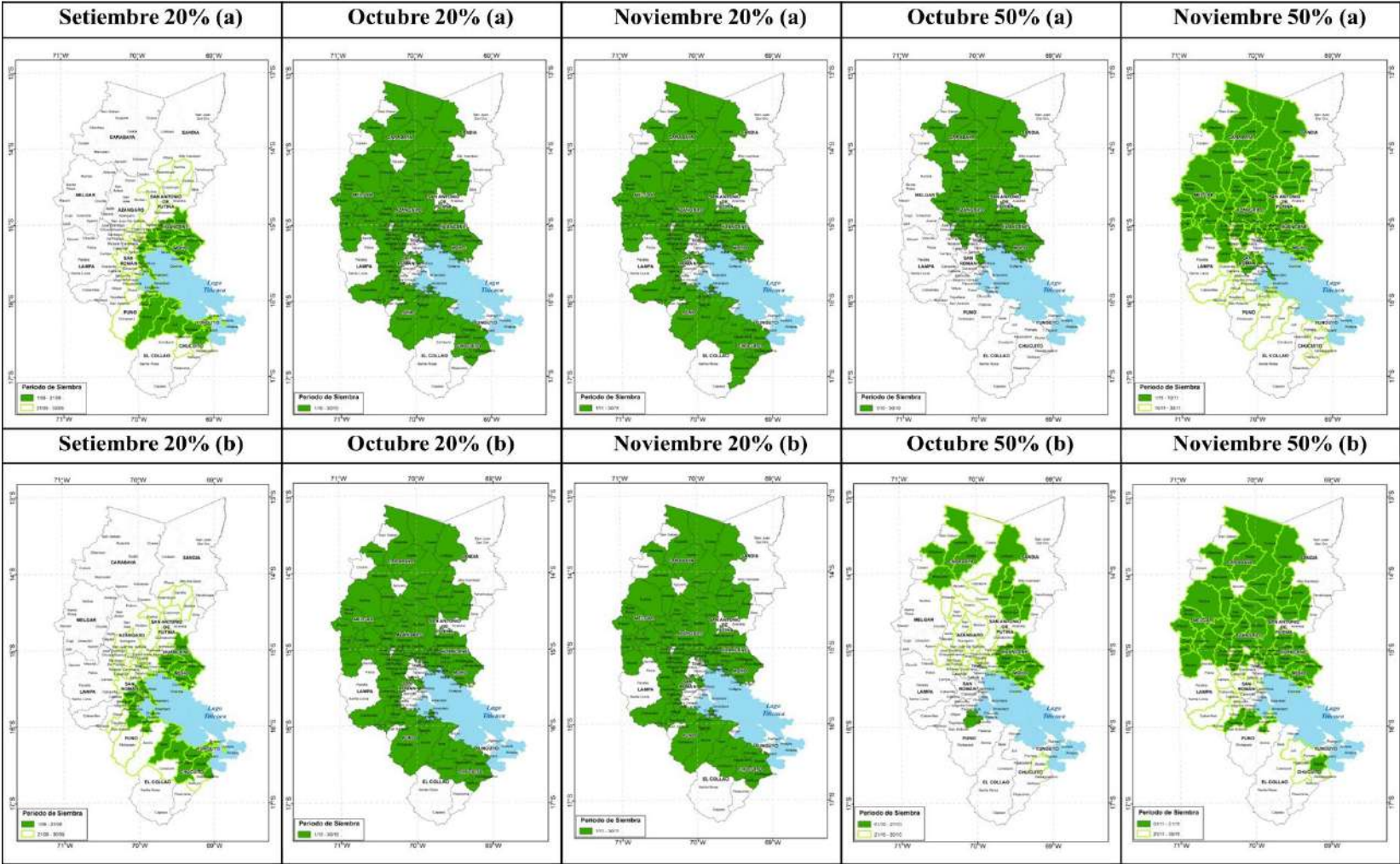


Figura 8. Época de siembra recomendada para la quinua (160 días) para el suelo con CAD de 115 mm/m (a) y 145 mm/m (b) para un nivel de riesgo 20% y 50% para setiembre, octubre y noviembre en la región del Altiplano Peruano.

4. Conclusiones

Setiembre presenta la mayor exposición al riesgo climático (50% y 80%), limitando las áreas aptas a zonas cercanas al lago Titicaca, donde se recomienda implementar manejo hídrico. Octubre es una opción intermedia, con menor riesgo (20%) y coincidencia con el inicio de las lluvias, favoreciendo el desarrollo del cultivo. Noviembre es el mes más seguro, con predominio de riesgo bajo incluso en escenarios adversos. Se recomienda la siembra de variedades de quinua de ciclo corto que alcancen la maduración entre marzo y abril, coincidiendo con la fase final del periodo lluvioso y reduciendo la exposición a heladas tempranas. Este estudio proporciona una base técnico-científica para optimizar calendarios de siembra y orientar la gestión del riesgo climático, con aplicaciones directas en políticas de adaptación, estrategias productivas sostenibles y criterios técnicos para seguros agropecuarios. Se recomienda como línea futura integrar proyecciones climáticas de mediano y largo plazo con modelos de rendimiento, a fin de mejorar la precisión de la zonificación y anticipar impactos bajo escenarios de cambio climático.

Contribución de los autores

W.J. Yzarra-Tito: administración de proyectos, conceptualización, metodología, investigación, análisis formal, validación, escritura-borrador. **O.W. Machaca-Maquera:** metodología, investigación, escritura-revisión y edición. **A. M. Peña-Lozano:** metodología, investigación, escritura-revisión. **A. Martín. Zolezzi-Monzen:** metodología, investigación. **C. M. Ancorí-Quispe:** metodología, investigación, validación. **B. Antonio-Evangelista:** supervisión, software. **H. O. Ramos-Inca Roca:** supervisión, recursos, redacción. **S. Flores Sancho:** supervisión, validación.

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés que pudiera influir en el trabajo presentado en este artículo.

ORCID

W. J. Yzarra-Tito  <https://orcid.org/0000-0002-7357-5943>
O. W. Machaca-Maquera  <https://orcid.org/0000-0003-1124-1187>
A. M. Peña-Lozano  <https://orcid.org/0009-0009-2533-0157>
A. Martín. Zolezzi-Monzen  <https://orcid.org/0009-0009-9649-7886>
C. M. Ancorí-Quispe  <https://orcid.org/0009-0005-9206-7628>
B. Antonio-Evangelista  <https://orcid.org/0000-0001-7865-4459>
H. O. Ramos-Inca Roca  <https://orcid.org/0000-0002-8592-8208>
S. Flores Sancho  <https://orcid.org/0009-0008-6699-8324>

Referencias bibliográficas

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (Estudio FAO Riego y Drenaje, nº56). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf>
- Aparecido, L. E. D. O., Padua, J. M. V., Torsoni, G. B., Barboza, T. O. C., Viol, L. E. S., da Silva Cabral de Moraes, J. R., & dos Santos, A. F. (2024). Climate risk zoning for wheat crops in the southeastern region of Brazil. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104(1), 456–467. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12943>
- Ballesteros, J., & Isaza, C. (2021). Adaptation measures to climate change as perceived by smallholder farmers in the Andes. *Journal of Ethnobiology*, 41(3), 428–446. <https://doi.org/10.2993/0278-0771-41.3.428>
- Baron, C., Perez, P., & Maraun, F. (1996). SARRA: Système d'Analyse Régionale des Risques Agroclimatiques. Module SARRAZON: bilan hydrique appliqué au zonage. Bilan hydrique de réseaux pluviométriques et synoptiques pour des applications de zonages annuels ou pluriannuels d'analyse de risques climatiques. Guide d'utilisation.
- Caldana, N. F. D. S., Nitsche, P. R., Ferreira, L. G. B., Martelócio, A. C., Zaccheo, P. V. C., & Martins, J. A. (2020). Agroclimatic risk zoning of papaya (*Carica papaya* L.) in the hydrographic basin of Paraná River III, Brazil. *Revista Agrogeoambiental*, 12(3), e1514. <https://doi.org/10.18406/2316-1817v12n320201514>
- Canedo-Rosso, C., Hochrainer-Stigler, S., Pflug, G., Condori, B., & Berndtsson, R. (2021). Drought impact in the Bolivian Altiplano agriculture associated with the El Niño–Southern Oscillation using satellite imagery data. *Natural Hazards and Earth System Science*, 21, 995–1012. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-995-2021>
- De Oliveira Aparecido, L. E., da Silva Cabral de Moraes, J. R., de Meneses, K. C., Lorençone, P. A., Lorençone, J. A., de Olanda Souza, G. H., & Torsoni, G. B. (2020). Agricultural zoning as tool for expansion of cassava in climate change scenarios. *Theoretical and Applied Climatology*, 142(3), 1085–1095. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03367-1>
- Dirección Regional de Agricultura de Puno – DRAP. (2023). Estadística agrícola. <https://www.agropuno.gob.pe/informacion-estadistica/estadistica-agricola/>
- Falcón Cáceres, S. C. (2020). *Determinación de la demanda hídrica y parámetros biométricos para la aplicación del riego del maíz amarillo DK7088 (Zea mays L.) en La Molina* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/4437>
- Gaur, M., Yadav, S., Soni, A., Tomar, D., Jangra, A., Joia, S., Kumar, A., Mehra, R., & Petkoska, A. T. (2025). Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd): Nutritional profile, health benefits, and sustainability considerations. *Discover Food*, 5(1), 172. <https://doi.org/10.1007/s44187-025-00470-y>
- Gerencia Regional de Desarrollo Agrario. *Serie histórica de producción agrícola de Puno*. Recuperado el 15 de agosto de 2025, de <https://www.agropuno.gob.pe/estadistica-agraria-informatica/agricola/>
- Gonçalves, S. L., & Wrege, M. S. (2020). Considerações sobre metodologias para zoneamento agrícola em escala regionalizada. *Agrometeoros*, 26(2). <https://doi.org/10.31062/agrom.v26i2.26426>
- Gujarro, J. A. (2024). *Guía de uso del paquete de R climatol* (versión 4.1.2). <https://www.climatol.eu/climatol4.1.2-es.pdf>
- Gutierrez-Villarreal, R. A., Espinoza, J.-C., Lavado-Casimiro, W., Junquas, C., Molina-Carpio, J., Condom, T., & Marengo, J. A. (2024). The 2022–23 drought in the South American Altiplano: ENSO effects on moisture flux in the western Amazon during the pre-wet season. *Weather and Climate Extremes*, 41, 100710. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2024.100710>
- Kalita, R., Kalita, D., & Saxena, A. (2023). Trends in extreme climate indices in Cherrapunji for the period 1979 to 2020. *Journal of Earth System Science*, 132(2), 74. <https://doi.org/10.1007/s12040-023-02087-0>
- Lavarenne, J., Vaksman, M., Affholder, F., Ferré, M., Nunes, K., Dingkuhn, M., & Baron, C. (2025). SARRA, histoire d'un modèle de simulation des cultures pour les zones intertropicales. *Cahiers Agricoles*, 34, 020203. <https://doi.org/10.1051/cagri/2024023>

- Lupa-Condo, N. E., Lope-Ccasa, F. C., Salazar-Joyo, A. A., Gutiérrez-Rosales, R. O., Jellen, E. N., et al. (2024). Phenotyping for Effects of Drought Levels in Quinoa Using Remote Sensing Tools. *Agronomy*, 14(9), 1938. <https://doi.org/10.3390/agronomy14091938>
- Manaa, A., Goussi, R., Derbali, W., Cantamessa, S., Essemine, J., & Barbato, R. (2021). Photosynthetic performance of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) after exposure to a gradual drought stress followed by a recovery period. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics*, 1862(5), 148383. <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2021.148383>
- Martelócio, A. C., Caldana, N. F. S., Ferreira, L. G. B., Nitsche, P. R., & Martins, J. A. (2020). Agroclimatic risk zoning of passion fruit (*Passiflora edulis* Sims) in the hydrographic basin of Paraná river III, Brazil. *Caminhos de Geografia*, 21(77), 283–297. <https://doi.org/10.14393/rcg217751951>
- Maturana, G. I. (2021). *Efecto de la fecha de siembra en los componentes de rendimiento en genotipos contrastantes de quinoa (Chenopodium quinoa Willd)* [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica de Chile]. <https://doi.org/10.7764/tesisUC/AGR/59542>
- Melo, A. D., Nobre Júnior, A. D. A., Silva, F. D., & Abreu, L. D. (2020). Zoneamento de risco climático para cultivo da soja no Cerrado. *Nativa*, 8(1), 26–36. <https://doi.org/10.31413/nativa.v8i1.8249>
- Ministerio de Agricultura y Riego - MIDAGRI. (2019). *Plan nacional de cultivos: Campaña agrícola 2019-2020* (323 pp.). <https://repositorio.midagri.gob.pe/handle/20.500.13036/565>
- Ministerio de Agricultura y Riego - MIDAGRI. (2025). *Sistema Integrado de Estadística Agraria*. Recuperado el 18 de agosto 2025, de <https://siea.midagri.gob.pe/portal/>
- Pulvento, C., Riccardi, M., Lavini, A., d'Andria, R., & Ragab, R. (2015). Parameterization and field validation of SALTMED Model for grain amaranth tested in South Italy. *Irrigation and Drainage*, 64(1), 59–68. <https://doi.org/10.1002/ird.1905>
- Rajavel, M., Guhan, V., Vakeswaran, V., Bhuvaneshwari, K., Gowtham, R., & Priyanka, S. (2022). Estimation of reference evapotranspiration in Bhavanisagar Block of Tamil Nadu using FAO ET0 calculator. *International Journal of Plant & Soil Science*, 34(18), 871–879. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2022/v34i1831172>
- Saddiq, M. S., Wang, X., Iqbal, S., Hafeez, M. B., Khan, S., Raza, A., Zahid, M. A., Yasin, G., & Gulshan, A. B. (2021). Effect of water stress on grain yield and physiological characters of quinoa genotypes. *Agronomy*, 11(10), 1934. <https://doi.org/10.3390/agronomy11101934>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI. (2023). *Boletín pronóstico agrometeorológico de rendimiento: Cultivo de quinua*. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/0296SENA-2.pdf>
- Sosa-Zuñiga, V., Brito, V., Fuentes, F., & Steinfort, U. (2017). Phenological growth stages of quinoa (*Chenopodium quinoa*) based on the BBCH scale. *Annals of Applied Biology*, 171(1), 117–124. <https://doi.org/10.1111/aab.12358>
- Taaime, N., Rafik, S., El Mejahed, K., Oukarroum, A., Choukr-Allah, R., Bouabid, R., & El Gharous, M. (2023). Worldwide development of agronomic management practices for quinoa cultivation: A systematic review. *Frontiers in Agronomy*, 5, 1215441. <https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1215441>
- Taaime, N., El Mejahed, K., Moussafir, M., Bouabid, R., Oukarroum, A., Choukr-Allah, R., & El Gharous, M. (2022). Early sowing of quinoa cultivars benefits from rainy season and enhances quinoa development, growth, and yield under arid condition in Morocco. *Sustainability*, 14(7), 4010. <https://doi.org/10.3390/su14074010>
- Valdivia-Cea, W., Bustamante, L., Jara, J., Fischer, S., Holzapfel, E., & Wilckens, R. (2021). Effect of soil water availability on physiological parameters, yield, and seed quality in four quinoa genotypes (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Agronomy*, 11(5), 1012. <https://doi.org/10.3390/agronomy11051012>