

IMPACTOS EN LA AGRICULTURA DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN REGIONES CON CLIMA TEMPLADO Y FRÍO

Pablo Ramírez Granados¹ , Luis Francisco Rodríguez Soto² 

1. Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica, pablo.ramirez.granados@una.ac.cr
2. Escuela de Ciencias Geográficas, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica, francisco.rodriguez.soto@una.ac.cr

Recibido: 29/08/2025 Aceptado: 20/01/2026

RESUMEN: El cambio climático representa una amenaza creciente para la sostenibilidad de la agricultura, particularmente en regiones con climas templados y fríos, donde los sistemas productivos son altamente sensibles a las alteraciones en las variables climáticas. Este artículo presenta una revisión exhaustiva de literatura científica publicada entre 2006 y 2023, centrada en los principales impactos del cambio climático sobre los suelos agrícolas y los requerimientos hídricos, con especial atención a procesos como la salinización, la erosión, la pérdida de carbono orgánico y la mayor evapotranspiración. Los hallazgos evidencian que el calentamiento global y los cambios en los patrones de precipitación están degradando progresivamente la calidad edáfica, afectando la fertilidad del suelo, la retención de nutrientes y la capacidad de producción agrícola. A nivel hidrológico, se identifica un incremento en la demanda de riego debido a la mayor evapotranspiración y la irregularidad de las lluvias, lo que genera una presión adicional sobre los recursos hídricos, especialmente en sistemas de cultivo de secano. Asimismo, se analiza la redistribución espacial de la aptitud agrícola, con posibles beneficios en zonas nórdicas por la expansión de la temporada de crecimiento, pero también con fuertes limitaciones en regiones mediterráneas y de Europa Central, afectadas por estrés térmico e hídrico. Los efectos varían según el contexto geográfico, con estudios de caso en Europa, América, Asia y África que evidencian tanto pérdidas de productividad como cambios en los usos del suelo. Desde una perspectiva socioeconómica, el artículo destaca la vulnerabilidad de los pequeños y medianos agricultores, quienes enfrentan mayores barreras para adaptarse debido a limitaciones tecnológicas, económicas e institucionales. Se concluye que los impactos del cambio climático sobre la agricultura en estas regiones son multidimensionales y requieren respuestas integrales, que combinen innovación tecnológica, restauración ecológica, políticas públicas inclusivas y participación comunitaria, con el fin de garantizar la seguridad alimentaria y la resiliencia de los sistemas agroproductivos frente a escenarios climáticos futuros.

Palabras clave: cambio climático, agricultura, suelos agrícolas, requerimientos hídricos, regiones templadas, degradación del suelo, adaptación agrícola.

Abstract : Climate change poses an increasing threat to the sustainability of agriculture, particularly in temperate and cold climate regions, where production systems are highly sensitive to alterations in climatic variables. This article presents a comprehensive review of scientific literature published between 2006 and 2023, focusing on the main impacts of climate change on agricultural soils and water requirements. Special emphasis is given to processes such as salinization, erosion, organic carbon loss, and increased evapotranspiration. The findings show that global warming and shifts in precipitation patterns are progressively degrading soil quality, affecting fertility, nutrient retention, and overall crop productivity. From a hydrological perspective, there is growing irrigation demand due to higher evapotranspiration and irregular rainfall, placing additional stress on water resources—especially in rainfed systems. The article also analyzes the spatial redistribution of agricultural suitability, with potential benefits in northern regions from longer growing seasons, contrasted with significant limitations in Mediterranean and Central European areas due to thermal and water stress. Regional case studies from Europe, the Americas, Asia, and Africa illustrate both productivity losses and land use changes. From a socio-economic perspective, small and medium-scale farmers are identified as particularly vulnerable, facing greater challenges in adaptation due to technological, financial, and institutional constraints. The study concludes that the impacts of climate change on agriculture in these regions are multidimensional and call for integrated responses that combine technological innovation, ecological restoration, inclusive public policies, and active community participation, to safeguard food security and enhance the resilience of agroecosystems in the face of future climatic scenarios.

Keywords: climate change, agriculture, agricultural soils, water requirements, temperate regions, soil degradation, agricultural adaptation

Introducción

El cambio climático constituye uno de los fenómenos más trascendentales y disruptivos del siglo XXI, cuyas implicaciones trascienden las dimensiones ecológica, económica y social. Su principal causa radica en el aumento sostenido de las emisiones de gases de efecto invernadero, producto de la quema de combustibles fósiles, los cambios en el uso del suelo y otras actividades antropogénicas, entre ellas la agricultura y ganadería intensivas, los procesos industriales, la gestión de residuos, el transporte motorizado y la expansión urbana. Estas emisiones han generado un incremento sostenido de la temperatura media global, con impactos observables en todos los continentes y ecosistemas del planeta (Adedeji et al., 2014). Entre las consecuencias más notorias se encuentran la intensificación de eventos climáticos extremos como sequías prolongadas, inundaciones repentinas y tormentas severas y la alteración de patrones atmosféricos históricos (Stulina & Solodkiy, 2015).

Durante las últimas cinco décadas, la magnitud y frecuencia de estos eventos se ha intensificado, evidenciando que la variabilidad climática natural está siendo amplificada por forzantes de origen antrópico. A nivel global, se reportan procesos como el retroceso acelerado de glaciares, alteraciones en los regímenes de precipitación, y un aumento en la ocurrencia de fenómenos meteorológicos extremos (Miao et al., 2016; Calzadilla et al., 2013). Estas transformaciones, además de modificar los sistemas físicos, afectan de forma crítica la disponibilidad de agua dulce (Zhou et al., 2010; Gosling & Arnell, 2013) y contribuyen a la degradación progresiva de las tierras agrícolas (Dixon, 2012).

En este contexto, la agricultura se configura como una de las actividades humanas más vulnerables al cambio climático. Esta vulnerabilidad se expresa en múltiples niveles: desde la disminución en la productividad y el rendimiento de los cultivos, hasta la intensificación de plagas, enfermedades y malezas que alteran la dinámica de los sistemas agroecológicos (Kang et al., 2010; Dixon, 2012). Asimismo, las modificaciones en los patrones de evapotranspiración y en los requerimientos hídricos alteran profundamente los ciclos de cultivo, afectando la planificación agrícola y generando incertidumbre sobre la seguridad alimentaria global (Stulina & Solodkiy, 2015; Kang et al., 2009).

Los impactos del cambio climático en la agricultura no se distribuyen de forma homogénea en el espacio. Su expresión varía significativamente según factores geográficos, edafoclimáticos y socioeconómicos, lo que implica que un mismo cultivo puede experimentar efectos distintos en diferentes regiones, y viceversa: diferentes cultivos pueden responder de manera variable ante condiciones climáticas similares en una misma zona (Dixon, 2012; Calzadilla et al., 2013). Esta dimensión territorial de los impactos exige enfoques diferenciados de análisis y adaptación, con base en la especificidad ambiental y productiva de cada región. Desde el punto de vista conceptual, el presente estudio utiliza el término impacto en el sentido de afectación ambiental, entendida como el conjunto de efectos derivados de modificaciones significativas en el entorno natural. En el marco de este artículo, el impacto del cambio climático en la agricultura se abordará principalmente como una afectación negativa, aunque se reconoce que en ciertos casos pueden generarse condiciones favorables para algunos cultivos o regiones específicas.

Este trabajo tiene como objetivo principal realizar una revisión sistemática de literatura científica sobre los impactos del cambio climático en la agricultura de regiones con climas templados y fríos. A pesar de que los efectos del cambio climático sobre la agricultura son múltiples y complejos, este estudio se centra específicamente en dos grandes ámbitos: (i) los impactos sobre los suelos y las tierras agrícolas, y (ii) los cambios en los requerimientos y la disponibilidad hídrica para la producción agrícola. La elección de estas dos dimensiones responde a su papel fundamental como determinantes de la capacidad productiva, resiliencia ecológica y sostenibilidad del sistema agroalimentario en dichas regiones. Mediante esta aproximación, se pretende contribuir a una mejor comprensión científica de los desafíos y oportunidades que enfrenta la agricultura frente al cambio climático, así como generar insumos que orienten futuras estrategias de adaptación territorial, tecnológica y política en contextos vulnerables.

Materiales y Métodos

El presente estudio se fundamenta en una revisión bibliográfica de carácter cualitativo, orientada a sistematizar el conocimiento científico disponible sobre los impactos del cambio climático en la agricultura de regiones con climas templados y fríos. No se trata de una revisión sistemática en sentido estricto, sino de una revisión con criterios explícitos de búsqueda, selección y análisis de publicaciones científicas relevantes.

El análisis bibliográfico abarcó investigaciones desarrolladas en diversas regiones templadas y frías del planeta, incluyendo Europa Occidental (Italia, Francia, Reino Unido), Europa del Norte (Noruega y Finlandia), Europa Oriental (Polonia, República Checa, Hungría, Bulgaria y Grecia), Asia Central y Occidental (Turquía y Georgia), Asia Oriental (China, con énfasis en la Meseta del Loess y las llanuras del norte), Asia del Sur (Pakistán y Nepal), América del Norte (Canadá y Estados Unidos), América del Sur (Argentina) y regiones áridas y semiáridas de África (Sudáfrica). Adicionalmente, se incluyeron publicaciones de alcance global que aportan marcos conceptuales y análisis comparativos entre regiones. Esta diversidad geográfica permitió contrastar distintos contextos agroclimáticos, sistemas de producción y estrategias de adaptación frente al cambio climático.

La estrategia de búsqueda se centró en la recopilación de artículos científicos publicados entre los años 2006 y 2023, priorizando aquellos indexados en bases de datos académicas reconocidas por su rigurosidad, como SpringerLink y ScienceDirect, seleccionadas por su amplia cobertura temática en ciencias ambientales, agricultura, climatología y gestión de recursos naturales. Se utilizaron combinaciones de palabras clave en inglés y español relacionadas con “climate change”, “agriculture”, “temperate regions”, “cold climates”, “soil degradation”, “water requirements” y “agricultural adaptation”.

Para garantizar la calidad y pertinencia de las fuentes incluidas en el análisis, se establecieron criterios de inclusión específicos: (i) artículos publicados en revistas arbitradas e indexadas; (ii) estudios que abordaran explícitamente los efectos del cambio climático sobre la degradación edáfica, la disponibilidad y demanda de agua, la variabilidad climática y la productividad agrícola; y (iii) investigaciones con un enfoque territorial aplicable a regiones de climas templados y fríos, desde escalas regionales, continentales o globales. Se excluyeron trabajos con un enfoque exclusivamente tropical o aquellos que carecieran de rigurosidad metodológica.

Una vez recopiladas las publicaciones, se desarrolló una fase de organización y categorización temática, clasificando los artículos en dos ejes analíticos principales: (1) los efectos del cambio climático sobre los suelos y las tierras agrícolas, y (2) los impactos asociados a los requerimientos hídricos en los sistemas agrícolas. Esta estructura analítica permitió identificar regularidades, diferencias regionales y vínculos entre factores climáticos, edáficos e hidrológicos.

La sistematización de la información se realizó mediante matrices cualitativas, que facilitaron el contraste entre hallazgos y el reconocimiento de patrones comunes en distintas regiones del mundo. Asimismo, se incorporó un enfoque comparativo entre contextos geográficos, considerando variables como la ubicación latitudinal, la relación entre continentalidad e influencia oceánica y las características de los sistemas productivos. Este enfoque permitió evaluar cómo los impactos del cambio climático varían no solo en función de las condiciones climáticas, sino también de los modelos de uso del territorio, las prácticas agrícolas predominantes y los niveles de vulnerabilidad socioeconómica.

Con el fin de abordar los principales desafíos que enfrenta la agricultura en regiones templadas y frías ante el cambio climático, se adoptó un enfoque metodológico integrador y basado en evidencia científica. La estrategia analítica contempló la identificación sistemática de vacíos de conocimiento y de oportunidades estratégicas para

la adaptación agroambiental, considerando la aplicabilidad de los resultados en la formulación de políticas públicas, la gestión sostenible del territorio y el fortalecimiento de la resiliencia agrícola.

Para la presente investigación se emplean de manera diferenciada los términos: uso de la tierra y uso del suelo, atendiendo a sus distintos niveles de análisis y aplicaciones metodológicas. Esta distinción constituye un marco conceptual relevante para la interpretación de los resultados reportados en la literatura revisada, especialmente en relación con los procesos de transformación territorial asociados al cambio climático.

El término uso de la tierra se refiere a la función o actividad socioeconómica predominante que se desarrolla sobre una unidad territorial determinada, como agricultura, ganadería, silvicultura, actividades urbanas, industriales o de conservación. Su caracterización se basa principalmente en información de carácter normativo, socioeconómico y de planificación, derivada de instrumentos como planes de ordenamiento territorial, catastros, regulaciones sectoriales y políticas públicas (FAO, 1997; Lambin et al., 2003). Este concepto permite comprender las dinámicas socioeconómicas que impulsan las transformaciones del territorio.

Por su parte, el término uso del suelo hace referencia a la ocupación física y la cobertura superficial observable del territorio en un momento determinado. Su delimitación se realiza mediante técnicas de observación remota, fotointerpretación y el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), empleando clasificaciones estandarizadas que facilitan la comparación temporal y espacial (Anderson et al., 1976; Di Gregorio & Jansen, 2000). Este enfoque permite la generación de cartografía temática, el análisis de cambios de cobertura y la cuantificación de presiones ambientales.

Desde una perspectiva metodológica, el uso del suelo representa la expresión espacial del uso de la tierra, en tanto materializa las decisiones funcionales y normativas que determinan la ocupación del territorio. Los cambios en el uso de la tierra, derivados de procesos como la expansión urbana, la intensificación agrícola o la implementación de políticas de conservación, se manifiestan como modificaciones detectables en el uso del suelo, susceptibles de ser cuantificadas y analizadas mediante enfoques multitemporales (IPCC, 2019).

La diferenciación entre ambos conceptos permite articular análisis complementarios: mientras el uso de la tierra aporta información sobre las causas y los contextos de la transformación territorial, el uso del suelo posibilita la medición objetiva de dichas transformaciones. La integración de ambos enfoques fortalece la robustez metodológica del análisis territorial al combinar dimensiones normativas, funcionales y espaciales, facilitando una evaluación más integral de los impactos del cambio climático sobre los sistemas agrícolas.

Resultados y Discusión

Efectos en los suelos y las tierras de uso agrícola

El cambio climático y las transformaciones de usos de la tierra pueden estar entre los problemas ambientales más importantes en la actualidad (Lorencová *et al.* 2013; Latocha *et al.* 2016). El primero obedece a un cambio a nivel ambiental y es parte de la dinámica del planeta, acelerada por las acciones humanas, y el segundo, siendo causado exclusivamente por las conversiones de los espacios naturales a espacios de uso de actividades antrópicas como cultivos, pastos e infraestructura urbana.

A nivel regional, las consecuencias del cambio climático han derivado en cambios en la sostenibilidad de la tierra para uso agrícola, esto causado por las transformaciones de las condiciones naturales del suelo y del terreno (Zhang & Cai 2011). Entre las principales condiciones que afectan las tierras de uso agrícola se pueden mencionar la salinidad y la erosión de suelos (Wenyi, *et al.* 2013; Jesus *et al.* 2015), que son los mayores problemas que afectan la calidad de los suelos, desde la óptica de los impactos en las tierras agrícolas, y que causan a escala general, procesos de desertificación de tierras. Alrededor de un 40% de las tierras del mundo disponibles, están

siendo usadas para actividades agrícolas (Ramankutty *et al.* 2008) las cuales en su momento reemplazaron bosques y pastos, esto es lo que implica la transformación de coberturas naturales a usos antrópicos.

Muchos de los problemas ambientales actuales en el planeta generados por el cambio climático, tienen correspondencia directa con las actividades agrícolas, esto debido a que la agricultura es la actividad humana principal, demandante de tierra y agua (Iglesias *et al.* 2012). Algunos de estos problemas son la deforestación y la pérdida de biodiversidad, el primero por la mayor demanda de tierras, debido al agotamiento de las actuales y lo segundo, por los cambios en los ecosistemas naturales de los bosques, el cual es muy diverso, a uno mucho más sencillo, producto de la disminución de las poblaciones vegetales. Derivado de estos cambios y la intensidad de los usos, se asocian las pérdidas en los suelos por efecto de la salinización y la erosión (Wenji, *et al.* 2013; Jesus *et al.* 2015) pero también se pueden mencionar la capacidad de la tierra de producir y mantener las reservas de carbono orgánico (Olson *et al.* 2016).

Con respecto al impacto del cambio climático en las tierras de uso agrícola, la afectación del sistema del suelo será la principal, pues constituye el georecurso que sustenta las actividades en dichas tierras (Paroissien *et al.* 2015). El sistema pedológico o edafológico (el primero asociado al suelo y el paisaje y el segundo asociado a la agricultura), que constituye la base natural de los sistemas de las tierras agrícolas, responde tanto para fenómenos ambientales de corta duración, como los son las lluvias a lo largo de un año y sus efectos en los procesos erosivos (Wenji *et al.* 2013), hasta cambios de tipo más prolongado, como son los efectos por meteorización física y química, producto de factores como clima, tipo de roca, topografía y relieve, entre otros que liberan sales las cuales alcanzan el suelo (Jesus *et al.* 2015).

Entre los impactos potenciales del cambio climático en la salud del suelo se pueden mencionar la afectación en materia orgánica, los cambios en temperatura, los requerimientos hídricos y la salinidad. El suelo el material poroso, orgánico y mineral que constituye la materia de la tierra agrícola y esta, como parte de la masa terrestre, con el ascenso de la temperatura global, ha experimentado un mayor calentamiento con respecto a los océanos debido a la mayor capacidad termal de estos últimos (Kutílek 2011).

Las tierras agrícolas, debido a la actividad humana, son tendientes a sufrir algún tipo de degradación por el uso que se ha dado. A nivel mundial el 80% de la degradación del suelo ocurren en los países desarrollados, la mayoría considerados en la zona de los climas templados y fríos (St. Clair y Lynch 2010). La evaluación de los efectos del cambio climático, en el estado y la disponibilidad de los suelos de la tierra para uso agrícola, debe tratar con un sistema de clasificación de las tierras basado en múltiples criterios de elección (Audsley *et al.* 2006; Jozi y Ebadzadeh 2014) y modelos (Berry *et al.*, 2006). Esto se debe a la serie de elementos ambientales que están involucrados y que condicionan la dinámica de los usos. Se espera que, globalmente, las tierras agrícolas disminuyan arriba de un 3% (Calzadilla *et al.* 2013).

Los niveles de carbono en los suelos decrecerán debido a los procesos de erosión que degradan la condición de las tierras agrícolas (Li *et al.* 2017). Cualquier ganancia, por el incremento de la eficiencia del uso del agua en la planta, debido a un elevado CO₂, será compensada por el aumento de la mineralización del carbono luego de una lluvia y reducido por la lluvia anual y de la temporada de crecimiento (Hovenden *et al.* 2014).

El incremento en la temperatura del suelo aumentará la mineralización del nitrógeno en los suelos, pero su disponibilidad puede decrecer debido a la ampliación de las pérdidas gaseosas a través de procesos como volatilización y desnitrificación (Wang *et al.* 2006). Con mayores temperaturas, debidas al cambio climático, se podrían acrecentar la velocidad de descomposición microbiana de la materia orgánica, afectando a largo plazo la fertilidad de los suelos (Allison y Treseder 2008). Sin embargo, los incrementos en la biomasa, resultado de mayores velocidades de fotosíntesis, podrían compensar estos efectos. Las mayores temperaturas pueden acelerar el ciclo de nutrientes en el suelo y una más rápida formación de raíces que podrían promover más fijación de nitrógeno (Wang *et al.* 2006; St. Clair y Lynch 2010; Hovenden *et al.* 2014). Pero estos beneficios

podrían ser menores comparados los deterioros por los efectos de la lluvia donde un incremento de esta puede llevar al incremento de la lixiviación de los minerales, especialmente los nitratos (St. Clair y Lynch 2010).

La temperatura del suelo afecta las velocidades de descomposición de la materia orgánica y la liberación de los nutrientes. En altas temperaturas, la disponibilidad de nutrientes extenderá en el corto tiempo, mientras a largo plazo el contenido de materia orgánica reducirá, resultando en una decadencia de la fertilidad de los suelos. Las altas temperaturas del aire causarán unas mayores temperaturas en el suelo, lo cual se puede traducir en un aumento general de las velocidades de reacción de la solución química y reacciones de difusión (St. Clair y Lynch 2010). Las solubilidades de los componentes sólidos y gaseosos pueden ya sea incrementar o decrecer, pero las consecuencias debido a estos procesos pueden tomar mucho tiempo en ser significativas. Además, las altas temperaturas acelerarán el decaimiento de la materia orgánica del suelo, liberando así el CO₂ a la atmósfera y disminuyendo las tasas de carbono/nitrógeno, aunque se puede decir que estos efectos deberían ser compensados por una más grande biomasa de las raíces y los residuos de los cultivos debido a la respuesta de las plantas ante un mayor CO₂ (St. Clair y Lynch 2010; Hovenden *et al.* 2014).

Las temperaturas atmosféricas más cálidas conducirán a un ciclo hidrológico más fuerte, lo que incluye más eventos de lluvia extrema. Estos eventos de lluvia extrema tendrán influencia directa en los procesos de erosión y de degradación de suelos son más probables de ocurrir. Debido a los extremos del clima que podrían resultar, el incremento en la precipitación resultará en un mayor riesgo de erosión mientras al mismo tiempo dará al suelo una mayor hidratación según la intensidad de la precipitación (St. Clair y Lynch 2010).

La disminución de las lluvias, especialmente en el verano, podría tener efectos más serios por una mayor frecuencia de períodos de sequía lo que haría más propensa la erosión eólica. La susceptibilidad a la erosión eólica depende en parte de la cohesión del suelo, esta última está afectada por la efectividad de la precipitación, y la velocidad del viento (Genduvov y Glazunov 2009). Por otro lado, la fertilidad de los suelos también sería afectada por el calentamiento global, sin embargo, debido a que la tasa de carbono a nitrógeno es una constante, una duplicación del carbono es probable para implicar un mayor almacenamiento de nitrógeno en los suelos como los nitratos, así dando mayor fertilización para las plantas y proveyendo mejores rendimientos. Las necesidades promedio para nitrógenos podrían decrecer y darán la oportunidad de cambiar las estrategias costosas de fertilización (Li *et al.* 2017).

La salinidad es uno de los problemas más serios que reducen el crecimiento y productividad de los cultivos vegetales en áreas afectadas por sales (Jesus *et al.* 2015). Se estima que alrededor de unos 10 billones de hectáreas de suelo están afectadas, por la alta salinidad, aunque varían en el grado de severidad (Jesus *et al.* 2015). Adicionalmente, la salinización debida a deficientes prácticas de riego, son responsables de entre 25 y 60% de suelos regados bajo riego salinizados. baja precipitación, alta evaporación superficial, meteorización de rocas, riego con agua salina y prácticas inapropiadas son los mayores contribuidores del aumento de la salinidad del suelo. Algunos factores como el déficit de agua y el desbalance nutricional resultarán en una alta salinidad en las áreas de las raíces lo cual se traducirá en una reducida productividad del cultivo o una falla total del él (Aragües *et al.* 2015)

A nivel regional, se reconocen múltiples expresiones diferenciadas de las afectaciones sobre los suelos y los usos de la tierra agrícola, las cuales responden a la interacción entre condiciones biofísicas particulares, dinámicas productivas predominantes y presiones antrópicas específicas en cada territorio. Estas afectaciones no se manifiestan de manera homogénea, sino que presentan variaciones espaciales significativas asociadas a factores como el tipo de uso agrícola, los sistemas de manejo del suelo, la intensidad de la intervención humana y los procesos de cambio en el uso de la tierra. En este sentido, el análisis regional permite identificar patrones y contrastes territoriales que explican la diversidad de impactos observados, razón por la cual, en los apartados siguientes, se describen y analizan de forma diferenciada las principales características, problemáticas y

dinámicas de los suelos y los usos de la tierra agrícola en cada una de las regiones consideradas. A continuación, los datos por región son:

Europa

Los impactos causados en las tierras agrícolas, debido al cambio climático, fueron evaluados a nivel regional utilizando diversos modelos. Considerando que las tierras de uso agrícola pueden ser clasificadas en áreas de uso intensivo, uso extensivo y áreas abandonadas (Audsley et al. 2006), Berry et al., (2006) determinaron que usos agrícolas intensivos incrementan hacia latitudes mayores, es este caso los países nórdicos (Suecia, Noruega y Finlandia) y también en áreas de gran altitud como la zona alpina. Este cambio en los patrones de uso agrícola se debe a los beneficios que podrían obtenerse en estas zonas, que presentan temperaturas muy bajas, con los efectos del calentamiento global.

En el caso de la intensificación agrícola, esta ocurre hacia latitudes inferiores como los son el suroeste de Francia, España e Italia. En estos países, hay un mayor incremento de la temperatura y un incremento en la aridez (Berry et al., 2006). En las latitudes medias, como en el caso del sureste del Reino Unido, Bélgica, Luxemburgo y algunas partes de Alemania, también habrá un incremento en la intensificación de las tierras agrícolas (Berry et al., 2006).

Algunos autores elaboran un análisis más profundo desde un punto de vista más local, por ejemplo, Rounsevell & Reay (2009) señalan que entre 1961 al 2005, las tierras de uso agrícola en el Reino Unido disminuyeron un 14% más por el efecto de factores socioeconómicos que por efecto del cambio climático, sin embargo los impactos del cambio climático, relacionando a los gases de efecto invernadero, será más directos en los usos de la tierra agrícola. Algunos de los impactos proyectados en las tierras de uso agrícola son la relación de aumento de temperatura con el rango de patógenos, limitantes en el acceso de la maquinaria por contenido de humedad del suelo, incremento de la compactación de suelos y anegamientos en zonas de cultivos (St. Clair y Lynch 2010).

Özdoğan (2011) investigó los efectos del aumento de la temperatura del aire durante la temporada de crecimiento en el cultivo de trigo, en el noroeste de Turquía. Aplicando diversos modelos, se concluyó que existirán condiciones más secas y por lo tanto una reducción en los rendimientos del cultivo en las tierras agrícolas.

En República Checa, Lorencová *et al.* (2013) encontraron que ha habido una disminución histórica de la tierra arable en las fronteras, con el reemplazo de pastos, lo cual, en conjunto con los cambios climáticos, afectan los servicios agroecosistémicos como lo son producción de alimentos, el rendimiento de cultivos, la fertilidad del suelo y la variabilidad genética.

Höglind *et al.* (2013) evaluaron el impacto del cambio climático en la agricultura en las dos especies principales de pastos, el *timothy* (*Phleum pratense*) y *riagrás* (*Lolium*) en Islandia, Escandinavia y los países bálticos (Lituania, Estonia y Letonia) las cuales constituyen las más importantes especies de pasto forrajero de Europa del Norte.

En las regiones del mar Mediterráneo, (Tanasišević *et al.* 2014) afirman que las tierras de uso agrícola dedicadas al cultivo de olivo se moverán al norte y hacia el interior y hacia mayores elevaciones que las actuales. Esto implicará un aumento en el área relativa de Italia y Francia, y en menor medida en España. Los mayores impactos serán en las tierras balcánicas, en Serbia y Croacia, donde las tierras agrícolas podrían ser indisponibles para usos de cultivo de olivo.

Huttunen *et al.* (2015) a partir de datos modelados, afirman que, en Finlandia, las condiciones climáticas serán más cálidas y húmedas con respecto al sur europeo. Los impactos esperados están en relación con la cantidad de fertilización y los niveles resultantes de rendimientos y balance de nutrientes en las tierras usadas para el cultivo de cebada.

En el caso de Hungría, en Europa Central, Gaál *et al.* (2014) mencionan como la expansión de las áreas urbanas y los eventos climáticos extremos han ocasionado un decrecimiento en la producción agrícola. Se evaluaron los efectos del cambio climático y problemas relacionados al agua en la productividad de cultivos, concluyendo que, por ejemplo en el maíz, este será solo posible utilizando riego, lo que lleva a considerar la necesidad de tener especies más resistentes a las sequías.

En Bulgaria, Popova *et al.* (2014) indican que las tierras agrícolas destinadas a maíz de secano están llegando a ser más vulnerables a las sequías, especialmente en la parte sur. Renée y Thach (2014) repasan los efectos en la producción global de vino con respecto a la disponibilidad de tierras agrícolas en Europa, donde varios países mediterráneos pueden tener tierras agrícolas del todo inaptas para la producción de uvas.

Tanasijevic *et al.* (2014) mencionan los impactos ocurridos en las tierras de cultivo de olivo, en los países del Mediterráneo Debido a la evapotranspiración del cultivo, los requerimientos de riego y los impactos por estrés hídrico, los efectos más fuertes están concentrados en el tiempo de floración y las áreas agrícolas disponibles para el cultivo.

América

En el Canadá, Brassard y Singh (2008) se refieren que el incremento en la temperatura del aire puede llevar a la aceleración de las diferentes fases de crecimiento y desarrollo de cultivos en las tierras agrícolas. Para el trigo y la papa las temperaturas serían más altas que las óptimas, sin embargo en el caso del maíz y la soya, ambos estarían en condiciones termales ideales.

En lo que respecta a Argentina, Pol y Binyamin (2014) analizaron las variaciones de la temperatura y la precipitación en Buenos Aires. Para ambas ha habido un mayor calentamiento y una mayor cantidad de lluvia, lo cual ha afectado la producción del maíz y el trigo.

En el caso de Estados Unidos, Renée y Thach (2014) indican la pérdida de tierras agrícolas disponibles para viñedos en la parte sur y la posibilidad de nuevas regiones con especies tolerantes al calor de menor calidad. En Sudamérica, el acortamiento de la temporada de crecimiento puede llevar a la movilización de viñedos hacia las zonas montañosas.

Asia

Malla (2008) detalló los impactos del cambio climático en las tierras agrícolas de Nepal. En este trabajo señala como las tierras agrícolas de Nepal, con el incremento de la temperatura, habrá un mayor daño en la región de Terai y por el contrario, condiciones más favorables en las colinas y las montañas.

En China, Ju *et al.* (2013) mencionan que el calentamiento climático ha intensificado la evaporación de la humedad del suelo, llevando a un mayor movimiento de la salinidad hacia la capa superior del mismo, reduciendo su productividad y aumentando la desertificación.

África

Con respecto a Sudáfrica, Calzadilla *et al.* (2014) relacionando varios modelos de simulación, indican que habrá un decrecimiento de las áreas de cultivos y producción producto del aumento de la temperatura y condiciones muy secas afectando las áreas de cultivo de secano y bajo riego.

Efectos relacionados a requerimientos de agua

Los efectos del cambio climático, relacionados a requerimientos hídricos, involucran, no solo los efectos generados en las condiciones hidrológicas de los suelos, como la humedad del suelo, sino también los procesos hidrológicos asociados (Mimikou y Baltas 2013) y que están en relación más o menos directa con la agricultura, por ejemplo, se pueden mencionar la precipitación y la evapotranspiración (Altin *et al.* 2012). La agricultura es una actividad humana que requiere cantidades considerables de agua para riego y en general las actividades relacionadas a la producción de alimentos (Bocchiola *et al.* 2013).

Los cambios de temperatura, producto del cambio climático, tendrían un efecto directo en la disponibilidad de humedad para el crecimiento de los cultivos (Altin *et al.* 2012). De esta manera, en condiciones sin precipitación, el incremento de la temperatura aumentaría la cantidad de evapotranspiración, la cual podría causar un déficit de humedad en el suelo en la temporada de crecimiento del cultivo y por lo tanto un incremento en la necesidad de riego (Zhou *et al.* 2010).

Conforme aumenta la temperatura, se incrementará la demanda de agua para evapotranspiración por los cultivos y la vegetación natural, llevando a un mayor agotamiento de la humedad del suelo (Bora *et al.* 2014). De la misma manera, los cambios en los patrones de lluvia, pueden llevar a un mayor fallo en los cultivos, especialmente a los de secano (Calzadilla *et al.* 2014). Los impactos de los requerimientos de agua en la agricultura incluyen, además de la demanda en evaporación, los cambios en la cantidad de precipitación y por lo tanto variaciones en la escorrentía de los ríos (Gosling y Arnell 2013) y la recarga de las aguas subterráneas, estas últimas las dos fuentes de agua para riego de cultivos (Wu *et al.* 2010).

El agua es vital en el crecimiento de las plantas, por lo que una variación en los patrones de precipitación, tienen un impacto significativo en la agricultura. Debido a que mucha de la agricultura es de secano, las proyecciones de precipitación futura influyen en magnitud y dirección los impactos climáticos en la producción de cultivos. Los impactos del calentamiento global en la precipitación regional son difíciles de predecir debido a fuertes dependencias en los cambios de la circulación atmosférica, sin embargo, modificará no solo la precipitación (Uleberg *et al.* 2014) sino también la evaporación, la escorrentía y el almacenaje de agua en el suelo (Wu *et al.* 2010). Algunos modelos han señalado un incremento en la precipitación hacia latitudes superiores, especialmente en invierno.

La precipitación no solo influencia la disponibilidad de agua, pues esta incrementa la demanda de evaporación, debido a un aumento de la temperatura y por ello, alargarían las temporadas de crecimiento de cultivos, incrementando los requerimientos de los cultivos bajo riego (Tanasijevic *et al.* 2014). La precipitación en la principal fuente de humedad del suelo, el principal contribuidor de la variabilidad de los rendimientos de los cultivos y probablemente el factor más determinante de la productividad de los cultivos (Calzadilla *et al.* 2014). Muchos de los modelos climáticos globales predicen un incremento en global promedio de la precipitación, sus resultados muestran también cambios en los regímenes hidrológicos, en este caso más seco o húmedo, en muchos lugares.

Una modificación en el clima puede causar cambios en la precipitación estacional, su patrón estacional y su variabilidad estacional (Calzadilla *et al.* 2014). Para la productividad del cultivo un cambio en los patrones de lluvia puede ser aún más importante que un cambio en la precipitación anual. El régimen de agua de los cultivos es también vulnerable a un ascenso potencial en la velocidad diaria y en el patrón estacional de la evapotranspiración, provocado por la temperatura más cálida, aire más seco y condiciones más ventosas (Popova *et al.* 2014). Los episodios de alta humedad relativa, escarcha y granizo pueden también afectar el rendimiento y la calidad del maíz y de otros granos, frutas y vegetales.

La variabilidad interanual de la precipitación es la mayor causa de la variación en los rendimientos de los cultivos y la calidad de los rendimientos (Mo *et al.* 2013). La reducción de la cubierta vegetativa condiciona el viento y la erosión hídrica, afectando así la productividad futura de los cultivos (Gendugov y Glazunov 2008). Los rendimientos de los cultivos son más probables a sufrir períodos secos durante sus estados de desarrollo crítico, tal como la reproducción. En muchos cultivos de grano, florecimiento, polinización y llenado del grano son especialmente sensibles al estrés hídrico. Las prácticas de manejo ofrecen estrategias para el crecimiento de los cultivos en condiciones de escasez de agua (Tanasijevic *et al.* 2014)

El estrés por calor y sequía ocurren frecuentemente, contribuyendo uno al otro. Estas condiciones son frecuentemente acompañadas por una alta radiación solar y fuertes vientos (Popova 2014). Cuando los cultivos están sujetos a estrés por sequía, sus estomas se cierran, reduciendo la transpiración y consecuentemente aumentando la temperatura de la planta.

Los años excesivamente húmedos, por otro lado, pueden causar que el rendimiento decline debido a anegamiento y se incrementa la infestación por plagas. Una alta humedad del suelo, en zonas húmedas, puede también impedir las operaciones en campo (Uleberg 2014). Las intensas ráfagas de lluvia pueden dañar plantas jóvenes y promover anegamientos, en cultivos con grano de maduración, como también erosión de suelos.

La extensión del daño en los cultivos depende de la duración de la precipitación y la inundación, el estado de desarrollo del cultivo y la temperatura del suelo y del aire. De esta manera los costos de secar el maíz son más altos bajo regímenes climáticos donde hay una mayor humedad (Stulina y Solodkiy 2015).

La cantidad de agua transpirada por el cultivo está también determinada por la humedad del aire, por lo general con menos materia seca producida en una atmósfera más seca. Así, los cambios en la lluvia y en la humedad del aire, tendrían probablemente efectos significativos en los rendimientos de los cultivos. En latitudes medias y altas, por ejemplo en los países nórdicos de Europa, una baja precipitación puede restringir el crecimiento de los cultivos de cereales durante el verano, cuando la evapotranspiración supera a la lluvia. En estas regiones, la cantidad de materia seca producida por un cultivo es aproximadamente proporcional a la cantidad de agua que transpira. Esta relación está influenciada por la cantidad de precipitación, aunque no de manera lineal, ya que depende en gran medida de la fracción de lluvia que es efectivamente retenida en el suelo. Cuando la precipitación es elevada, una parte significativa del agua puede perderse por evaporación directa desde la superficie del suelo o quedar retenida en capas profundas, fuera del alcance del sistema radicular, y por tanto no disponible para el cultivo (Stulina y Solodkiy, 2015). En consecuencia, los cambios en la precipitación y en la humedad del aire probablemente tengan efectos significativos sobre los rendimientos agrícolas. Existe una relación positiva y fuerte entre la precipitación y los rendimientos de los cultivos en las latitudes medias, donde se concentran las principales regiones productoras de cereales (Yang *et al.*, 2013).

El impacto del cambio climático con respecto a los requerimientos hídricos en la agricultura, deben ser considerados en el contexto de los rápidos incrementos en los abatimientos de agua, la degradación de la calidad del agua y la competencia del agua en todos los niveles (Tanasijevic 2014). Los cambios en la distribución de la precipitación con períodos más prolongados entre los eventos de lluvia y más intensa precipitación, son esperados en todo lado. Esto puede llevar a incrementar la ocurrencia de eventos climáticos incluyendo inundaciones y sequías. Las ráfagas secas, los períodos cortos de déficit de lluvia durante la temporada de cultivo, son esperadas a incrementar en duración y frecuencia. Esto afectará directamente la humedad del suelo y la productividad de los cultivos de secano (García *et al.* 2007).

Los regímenes hidrológicos en los cuales los cultivos crecen seguramente cambiarán con el cambio climático. Varios modelos predicen incrementos en la precipitación promedio global, esto debido a una atmósfera más caliente que puede sostener más vapor de agua, lo cual no será uniformemente distribuida y disminuciones se pronostican en algunas regiones. El régimen hídrico de los cultivos puede además estar afectado por los cambios en la precipitación estacional y la variación interanual de la precipitación (Mo *et al.* 2013). Demasiada

precipitación puede causar enfermedades en los cultivos, mientras que muy poca puede ser perjudicial para los rendimientos de los cultivos, especialmente si períodos secos ocurren durante estados de desarrollo crítico.

La cantidad y disponibilidad de agua almacenada en el suelo, lo cual es una entrada crucial para el crecimiento de los cultivos, estos serán afectados por cambios en la precipitación y los regímenes de evapotranspiración anual (Tanasijevic *et al.* 2014). El cambio climático probablemente incrementará la demanda de agua para riego. Regionalmente varios autores describen los impactos el cambio climático relacionándolos a los requerimientos hídricos:

Europa

Altin *et al.* (2012) encontraron que en un período de unos 30 años aproximadamente, la temperatura y la precipitación disminuyeron en Anatolia Central, Turquía, concluyendo que el clima llegará a ser más seco. Debido a esto, se evidencia que los tiempos de siembra y la plantación de cultivos fundamentales como trigo y maíz serán modificados.

En el valle de Po, Italia, Bocchiola *et al.* (2013) describen que existe una gran dependencia del sistema de reservorios y lagos los cuales proveen de agua para los cultivos de trigo, maíz, cebada y arroz. A través de modelos ellos evalúan como serán los escenarios considerando las variables del cambio climático como precipitación, temperatura y CO₂, concluyendo que habrá menos lluvia en la temporada de crecimiento.

Uleberg *et al.* (2014) estudian los efectos del cambio climático en la parte norte de Noruega, donde impera el clima frío. El principal efecto del ascenso de la temperatura, en el norte noruego, será una mayor extensión en la temporada de crecimiento de los cultivos. De esta manera el incremento de la precipitación, combinada con altas temperaturas, determina que el cambio climático sería visto en términos positivos, en las partes más nórdicas, por traer condiciones más favorables para cultivos, aunque esto implica condiciones igualmente favorables para arvenses, pestes y enfermedades. Para la región del mar Mediterráneo, Tanasijevic *et al.* (2014) estudiaron los efectos del cambio climático en el cultivo de olivo. Concluyen que los efectos combinados de incremento de la temperatura y disminución de la precipitación influirán en una disminución de la cantidad de agua disponible en la zona de raíces. El estrés hídrico afectará también el cultivo de secano del olivo, por lo que el riego de los cultivos de olivo será más accesible si hay un desplazamiento de hacia nuevas áreas.

En Bulgaria, Popova *et al.* (2014) consideraron la vulnerabilidad a las sequías de los sistemas de cultivo de maíz de secano. A partir de análisis climáticos se concluyó que las condiciones serán más secas para el maíz de secano y se incrementará la demanda de agua para sobreponer el estrés hídrico.

África

Con respecto a Sudáfrica, Calzadilla *et al.* (2014) mencionan como unas mayores temperaturas y menores lluvias resultarán en cambios de la humedad del suelo y las dotaciones hídricas las cuales afectarán la producción de cultivos. Dos ejemplos de afectación serían el cultivo a pequeña escala de rooibos (*Aspalathus linearis*) en los agricultores de la zona semiárida oeste (Archer *et al.* 2008) y la introducción de especies de uvas más tolerantes al aumento de temperatura en el caso del vino (Renée y Thach 2014).

América

Bora *et al.* (2014) evaluaron el impacto de la variabilidad en el rendimiento en Dakota del Norte, Estados Unidos, de diferentes factores climáticos con el propósito de asociar los efectos climáticos y las condiciones hídricas del suelo que afectan el rendimiento del cultivo de trigo y por lo tanto la economía. Los mayores efectos se darán en la evapotranspiración por el aumento de la temperatura, la humedad en el suelo y la cantidad de lluvia.

Asia

En Nepal, Malla (2008) afirma que se dará una mayor evapotranspiración debido al incremento de la temperatura, o cual demandará más agua para reducir la sequía. Otros factores relacionados a procesos

hidrológicos que afectarán serán las inundaciones de cultivos permanentes, crecidas y disminución del nivel freático.

En la región de Huang-Huai-Hai de China, Yang *et al.* (2013) realizaron un análisis de las variaciones de la evapotranspiración y su impacto en el cultivo de maíz. Debido a esta situación se pueden dar cambios en la humedad del suelo, causado por los cambios climáticos, que alterarán la cantidad de agua disponible para las raíces de las plantas y de esta manera influir en la cantidad de agua que puede ser transpirada.

Yang *et al.* (2013) analizaron las variaciones espacio-temporales de la evapotranspiración de cultivo, agua y precipitación efectiva en el maíz durante la estación de verano en el este de China. Los cambios en la humedad del suelo, debido al aumento de las temperaturas por el cambio climático, alterarán el agua disponible para las raíces de las plantas y de esta manera también el agua que pueden transpirar.

Stulina y Solodkiy (2015) hicieron, a partir de pruebas de evapotranspiración potencial, un análisis de los déficits de humedad en la temporada de crecimiento de las fases del desarrollo del cultivo del algodón en Uzbekistán en Asia Central. Entre las conclusiones se puede mencionar que se dará un bajo rendimiento en los cultivos debido a la disponibilidad del agua en la zona que es crítica. Se afirma que la disminución será de más de 100 mm. Los efectos del cambio climático en la agricultura de regiones con climas templados y fríos, tal como se ha documentado en la presente revisión, no pueden entenderse de forma aislada. El fenómeno implica una red compleja de interacciones entre factores climáticos, edáficos, hidrológicos y socioeconómicos que repercuten directamente en la capacidad de estas regiones para mantener una producción agrícola sostenible.

Cuadro 1. Síntesis de efectos en tierras agrícolas y requerimientos hídricos por cambio climático

Región o País	Impactos en tierras agrícolas	Impactos en requerimientos hídricos
Europa - Anatolia Central, Turquía	Reducción de temperatura y precipitación; clima más seco modifica calendarios de siembra	Condiciones más secas reducen rendimiento del trigo
Europa - Valle del Po, Italia	Dependencia de reservorios para riego; menor lluvia en temporada de crecimiento	Desplazamiento de cultivo de olivo hacia áreas más húmedas y elevadas
Europa - Norte de Noruega	Mayor duración de temporada de cultivo; condiciones también favorables para arvenses y plagas	Cambio climático visto como favorable en regiones frías para ciertos cultivos
Europa - Mediterráneo	Estrés hídrico en cultivo de olivo; necesidad de riego en nuevas áreas	Reducción de viñedos en zonas cálidas; pérdida de tierras aptas
Europa - Bulgaria	Maíz de secano más vulnerable a sequías; aumento de demanda hídrica	Condiciones más secas exigen riego suplementario
Europa - Finlandia	Aumento de humedad y temperatura; efectos en fertilización y rendimiento de cebada	Condiciones climáticas más húmedas pueden beneficiar algunos cultivos
América - Canadá	Trigo y papa expuestos a estrés térmico; maíz y soya en condiciones ideales	Cambio climático puede favorecer ciertos cultivos con requerimientos térmicos altos
América - EE.UU. (Dakota del Norte)	Evapotranspiración y humedad del suelo afectan rendimiento del trigo	Variabilidad en el agua disponible condiciona productividad económica
América - Argentina	Mayor temperatura y lluvia afectan maíz y trigo	Efectos combinados sobre rendimiento agrícola en cultivos de clima templado
Asia - Nepal	Mayor evapotranspiración por incremento térmico; afectación por crecidas e inundaciones	Condiciones más favorables en colinas y montañas; daño en tierras bajas (Terai)
Asia - China (Huang-Huai-Hai)	Cambios en humedad del suelo alteran agua disponible para raíces	Evapotranspiración impacta productividad del maíz durante verano
Asia - Uzbekistán	Déficit hídrico >100 mm afecta rendimiento del algodón	Zona crítica por disponibilidad de agua en temporada de crecimiento
África - Sudáfrica	Aumento térmico y menor lluvia afectan cultivos de secano y riego	Rooibos y uvas requieren adaptación varietal

Los impactos identificados son tanto directos como indirectos, a corto, mediano y largo plazo, y pueden manifestarse de maneras diversas según las condiciones locales. Desde el punto de vista edafológico, los suelos agrícolas son especialmente sensibles al cambio climático. Las modificaciones en los regímenes de temperatura y precipitación pueden inducir procesos de degradación como la salinización, la erosión y la pérdida de carbono orgánico. Esta pérdida compromete la capacidad del suelo para retener nutrientes y agua, afectando la fertilidad y, por ende, la productividad agrícola. Se ha evidenciado que el cambio climático intensifica la mineralización del nitrógeno y acelera la descomposición de la materia orgánica, alterando los ciclos de nutrientes y limitando la capacidad del suelo para sostener cultivos a largo plazo.

En términos hidrológicos, la variabilidad en la disponibilidad de agua es uno de los principales factores de vulnerabilidad en estas regiones. El aumento de la evapotranspiración, combinado con una distribución más errática de la precipitación, genera mayores necesidades de riego, particularmente en sistemas de cultivo de secano. Esto no solo eleva los costos de producción, sino que también tensiona los sistemas hídricos locales y regionales. Los cambios en la escorrentía, la recarga de acuíferos y la frecuencia de eventos extremos como sequías e inundaciones, afectan la planificación del uso del agua en la agricultura. Otro punto relevante es la redistribución espacial de la aptitud agrícola. Mientras que algunas zonas nórdicas podrían beneficiarse por un alargamiento de la temporada de cultivo, otras regiones, como las del Mediterráneo o Europa central, enfrentan una reducción en la productividad por el aumento del estrés térmico e hídrico. Esta redistribución no solo afecta qué cultivos pueden cultivarse y dónde, sino que también influye en las dinámicas económicas y sociales de las regiones productoras.

Las migraciones de cultivos y la presión sobre nuevas tierras agrícolas podrían inducir cambios en el uso del suelo con consecuencias ambientales adicionales, como la deforestación o la pérdida de biodiversidad. Desde una perspectiva socioeconómica, los pequeños y medianos agricultores, que dependen de prácticas tradicionales o que carecen de acceso a tecnologías adaptativas, son los más vulnerables a los efectos del cambio climático. Esto implica que las estrategias de adaptación deben ser inclusivas, considerando no solo soluciones técnicas, sino también marcos institucionales que promuevan la equidad y el acceso a recursos e información.

La investigación también ha demostrado que los beneficios potenciales, como el aumento de la productividad por la fertilización con CO₂ o el incremento de biomasa, podrían no ser suficientes para compensar las pérdidas por degradación de suelo, estrés hídrico o la expansión de plagas y enfermedades. En síntesis, el impacto del cambio climático sobre la agricultura en estas regiones constituye un fenómeno multifacético, cuyas repercusiones se intensifican por la sinergia entre factores climáticos, edáficos y de manejo agrícola. La adaptación a estos cambios exigirá enfoques integrados, que combinen el conocimiento científico con las prácticas locales, para mitigar los efectos negativos y aprovechar las oportunidades emergentes.

Referencias

- Adedeji, O., Reuben, O., & Olatoye, O. (2014). Global climate change. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 2, 114–122. <https://doi.org/10.4236/gep.2014.22016>
- Allison, S. D., & Treseder, K. K. (2008). Warming and drying suppress microbial activity and carbon cycling in boreal forest soils. *Global Change Biology*, 14(12), 2898–2909. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01716.x>
- Altin, T., Barak, B., & Altin, B. (2012). Change in precipitation and temperature amounts over three decades in Central Anatolia, Turkey. *Atmospheric and Climate Sciences*, 2(1), 107–125. <https://doi.org/10.4236/acs.2012.21012>
- Aragües, R., Medina, E., Zribi, W., Clavería, I., Álvaro-Fuentes, J., & Faci, J. (2015). Soil salinization as a threat to the sustainability of deficit irrigation under present and expected climate change scenarios. *Irrigation Science*, 33(1), 67–79. <https://doi.org/10.1007/s00271-014-0445-1>

- Archer, E., Oettlé, N., Louw, R., & Tadross, M. (2008). Farming on the edge in arid western South Africa: Climate change and agriculture in marginal environments. *Geography*, 93(2), 98–107.
- Berry, P. M., Rounsevell, M. D. A., Harrison, P. A., & Audsley, E. (2006). Assessing the vulnerability of agricultural land use and species to climate change and the role of policy in facilitating adaptation. *Environmental Science & Policy*, 9(2), 189–204. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2005.11.011>
- Bocchiola, D., Nana, E., & Soncini, A. (2013). Impact of climate change scenarios on crop yield and water footprint of maize in the Po Valley of Italy. *Agricultural Water Management*, 116, 50–61. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.10.009>
- Bora, G. C., Bali, S., & Mistry, P. (2014). Impact of climate variability on yield of spring wheat in North Dakota. *American Journal of Climate Change*, 3(4), 366–377. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2014.34033>
- Brassard, J.-P., & Singh, B. (2008). Impacts of climate change and CO₂ increase on agricultural production and adaptation options for Southern Québec, Canada. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 13(3), 241–265. <https://doi.org/10.1007/s11027-007-9105-6>
- Calzadilla, A., Zhu, T., Rehdanz, K., Tol, R. S. J., & Ringler, C. (2014). Climate change and agriculture: Impacts and adaptation options in South Africa. *Water Resources and Economics*, 5, 24–48. <https://doi.org/10.1016/j.wre.2014.10.001>
- Di Gregorio, A., & Jansen, L. J. M. (2000). Land cover classification system (LCCS): Classification concepts and user manual. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Dixon, J. R. (2012). Climate change impact in crop growth and food production, and plant pathogens. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 34(3), 362–379. <https://doi.org/10.1080/07060661.2012.707330>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1997). Land use definitions.
- Gaál, M., Quiroga, S., & Fernández-Haddad, Z. (2014). Potential impacts of climate change on agricultural land use suitability of the Hungarian counties. *Regional Environmental Change*, 14(2), 587–610. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0514-7>
- García, I., Mendoza, R., & Pomar, M. C. (2007). Deficit and excess of soil water impact on plant growth of *Lotus tenuis* by affecting nutrient uptake and arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Plant and Soil*, 304(1–2), 117–131. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9531-y>
- Gendugov, V. M., & Glazunov, G. P. (2009). Unity of mechanisms of water and wind erosion of soils. *Eurasian Soil Science*, 42(5), 553–560. <https://doi.org/10.1134/S1064229309050128>
- Gosling, S. N., & Arnell, N. W. (2013). A global assessment of the impact of climate change on water scarcity. *Climatic Change*, 134(3), 371–385. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0853-x>
- Höglind, M., Thorsen, S. M., & Semenov, M. A. (2013). Assessing uncertainties in the impact of climate change on grass production in Northern Europe using ensembles of global climate models. *Agricultural and Forest Meteorology*, 170, 103–113. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.02.010>
- Hovenden, M. J., Newton, P. C. D., & Wills, K. E. (2014). Seasonal, not annual, rainfall determines grassland biomass response to carbon dioxide. *Nature*, 511(7511), 583–586. <https://doi.org/10.1038/nature13281>
- Huttunen, I., Lehtonen, H., Huttunen, M., Piirainen, V., Korppoo, M., Veijalainen, N., Viitasalo, M., & Vehviläinen, B. (2015). Effects of climate change and agricultural adaptation on nutrient loading from Finnish catchments to the Baltic Sea. *Science of the Total Environment*, 529, 168–181. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.055>
- Iglesias, A., Garrote, L., Quiroga, S., & Moneo, M. (2012). A regional comparison of the effects of climate change on agricultural crops in Europe. *Climatic Change*, 112(1), 29–46. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0338-8>

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.

Jesus, J., Castro, F., Niemelä, A., Borges, M. T., & Danko, A. (2015). Evaluation of the impact of different soil salinization processes on organic and mineral soils. *Water, Air, & Soil Pollution*, 226, Article 102. <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2362-1>

Ju, H., van der Velde, M., Lin, E., Xiong, W., & Li, Y. (2013). The impacts of climate change on agricultural production systems in China. *Climatic Change*, 120(1–2), 313–324. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0803-7>

Kang, Y., Khan, S., & Ma, X. (2009). Climate change impacts on crop yield, crop water productivity and food security – A review. *Progress in Natural Science*, 19(12), 1665–1674. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2009.08.001>

Kiprutto, N., Riithu, L. N., & Riungu, G. K. (2015). Agriculture, climate change and food security. *Open Access Library Journal*, 2(3), Article e1472. <https://doi.org/10.4236/oalib.1101472>

Körner, C. (2006). Significance of temperature in plant life. In J. I. L. Morison & M. D. Morecroft (Eds.), *Plant growth and climate change* (pp. 48–66). Blackwell Publishing. <https://doi.org/10.1002/9780470988695.ch3>

Latocha, A., Szymanowski, M., Jeziorska, J., Stec, M., & Roszczewska, M. (2016). Effects of land abandonment and climate change on soil erosion – An example from depopulated agricultural lands in the Sudety Mts., SW Poland. *Catena*, 145, 128–141. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.05.027>

Li, Z., Liu, C., Dong, Y., Chang, X., Nie, X., Liu, L., Xiao, H., & Zeng, G. (2017). Response of soil organic carbon and nitrogen stocks to soil erosion and land use types in the Loess hilly–gully region of China. *Soil and Tillage Research*, 166, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.10.004>

Lorencová, E., Frélichová, J., Nelson, E., & Vačkář, D. (2013). Past and future impacts of land use and climate change on agricultural ecosystem services in the Czech Republic. *Land Use Policy*, 33, 183–194. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2013.01.005>

Luis, A. J. (2013). Past, present and future climate of Antarctica. *International Journal of Geosciences*, 4(8), 959–977. <https://doi.org/10.4236/ijg.2013.48090>

Malik, K. M., Mahmood, A., Kazmi, D. H., & Khan, J. U. (2012). Impact of climate change on agriculture during winter season over Pakistan. *Agricultural Sciences*, 3(2), 1007–1018. <https://doi.org/10.4236/as.2012.32012>

Malla, G. (2008). Climate change and its impact on Nepalese agriculture. *Journal of Agriculture and Environment*, 9, 62–71. <https://doi.org/10.3126/aej.v9i0.2119>

Miao, C., Sun, Q., Duan, Q., & Wang, Y. (2016). Joint analysis of changes in temperature and precipitation on the Loess Plateau during the period 1961–2011. *Climate Dynamics*, 47(9–10), 3221–3234. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3022-x>

Mimikou, M. A., & Baltas, E. A. (2013). Assessment of climate change impacts in Greece: A general overview. *American Journal of Climate Change*, 2(1), 46–56. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2013.21005>

Mo, X., Guo, R., Liu, S., Lin, Z., & Hu, S. (2013). Impacts of climate change on crop evapotranspiration with ensemble GCM projections in the North China Plain. *Climatic Change*, 120(1–2), 299–312. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0823-3>

Olson, K. R., Al-Kaisi, M. M., Lal, R., & Cihacek, L. J. (2016). Impact of soil erosion on soil organic carbon stocks. *Journal of Soil and Water Conservation*, 71(3), 61A–67A. <https://doi.org/10.2489/jswc.71.3.61A>

- Özdoğan, M. (2011). Modeling the impacts of climate change on wheat yields in Northwestern Turkey. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 141(1–2), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.02.001>
- Paroissien, J.-B., Darboux, F., Couturier, A., Devillers, B., Mouillot, F., Raclot, D., & Le Bissonnais, Y. (2015). A method for modeling the effects of climate and land use changes on erosion and sustainability of soil in a Mediterranean watershed (Languedoc, France). *Journal of Environmental Management*, 150, 57–68. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.10.034>
- Pol, M., & Binyamin, J. (2014). Impact of climate change and variability on wheat and corn production in the Texas High Plains. *American Journal of Climate Change*, 3(2), 145–152. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2014.32014>
- Popova, Z., Ivanova, M., Martins, D., Pereira, L. S., Doneva, K., Alexandrov, V., & Kercheva, M. (2014). Vulnerability of Bulgarian agriculture to drought and climate variability with focus on rainfed maize systems. *Natural Hazards*, 74(2), 865–886. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1216-2>
- Renée, M., & Thach, L. (2014). The impact of climate change on the global wine industry: Challenges and solutions. *Wine Economics and Policy*, 3(2), 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.wep.2014.11.001>
- Rounsevell, M. D. A., & Reay, D. S. (2009). Land use and climate change in the UK. *Land Use Policy*, 26, S160–S169. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2009.08.007>
- St. Clair, S. B., & Lynch, J. P. (2010). The opening of Pandora's Box: Climate change impacts on soil fertility and crop nutrition in developing countries. *Plant and Soil*, 335(1–2), 101–115. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0328-z>
- Stulina, G., & Solodkiy, G. (2015). The effect of climate change on land and water use in the Aral Sea Basin. *Agricultural Sciences*, 6(8), 834–847. <https://doi.org/10.4236/as.2015.68080>
- Tanasijevic, L., Todorovic, M., Pereira, L. S., Pizzigalli, C., & Lionello, P. (2014). Impacts of climate change on olive crop evapotranspiration and irrigation requirements in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management*, 144, 54–68. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.05.019>
- Tielidze, L. G., Kumladze, R., & Asanidze, L. (2015). Glaciers reduction and climate change impact over the last one century in the Mulkhura River Basin, Caucasus Mountains, Georgia. *International Journal of Geosciences*, 6(4), 465–472. <https://doi.org/10.4236/ijg.2015.64036>
- Uleberg, E., Hanssen-Bauer, I., van Oort, B., & Dalmannsdottir, S. (2014). Impact of climate change on agriculture in Northern Norway and potential strategies for adaptation. *Climatic Change*, 122(1–2), 27–39. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0983-1>
- Wang, C., Wan, S., Xing, X., Zhang, L., & Han, X. (2006). Temperature and soil moisture interactively affected soil net N mineralization in temperate grassland in Northern China. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(5), 1101–1110. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.09.009>
- Wu, P., Jin, J., & Zhao, X. (2010). Impact of climate change and irrigation technology advancement on agricultural water use in China. *Climatic Change*, 100(3–4), 797–805. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9861-2>
- Yang, X., Gao, W., Shi, Q., Chen, F., & Chu, Q. (2013). Impact of climate change on the water requirement of summer maize in the Huang-Huai-Hai farming region. *Agricultural Water Management*, 124, 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.03.017>
- Zhang, X., & Cai, X. (2011). Climate change impacts on global agricultural land availability. *Environmental Research Letters*, 6(1), Article 014014. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/1/014014>
- Zhou, Y., Zwahlen, F., Wang, Y., & Li, Y. (2010). Impact of climate change on irrigation requirements in terms of groundwater resources. *Hydrogeology Journal*, 18(7), 1571–1582. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0627-8>