

# Capítulo 4. Clima de las zonas productoras de arroz en el mundo

Gabriel Donoso Ñ., Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gonzalo Carracelas G., Claudia Marchesi G.

La distribución de los organismos vivos, como plantas y animales, es influenciada fuertemente por las condiciones climáticas (Aguirre-Gutiérrez et al., 2015). En el caso específico del arroz (*Oryza sativa* L.), éste ha logrado adaptarse a una gran cantidad de ambientes, con diferentes condiciones climáticas. Las principales restricciones climáticas asociadas a la productividad del cultivo del arroz en el mundo son la temperatura y la radiación solar (Fahad et al., 2019). El arroz es un cultivo de origen tropical y, por ello, normalmente requiere de temperaturas que varíen entre 20 y 35 °C durante gran parte de su desarrollo (Cuadro 1) (Yoshida, 1981). Sin embargo, existen excepciones en donde la planta de arroz ha logrado adaptarse a condiciones de bajas temperaturas en diversas regiones del planeta. De las dos principales subespecies de arroz existentes, la subespecie *japonica* logra desarrollarse exitosamente en climas templados como el norte de China, Japón, Corea y Chile, permitiendo que el cultivo se desarrolle fuera de zonas tropicales o subtropicales, donde se desarrolla comúnmente el arroz de la subespecie *indica* (Takahashi, 1984).

Temperaturas inferiores a 15 °C tienen efectos negativos para el cultivo del arroz. El nivel de daño causado por este estrés depende del tiempo de exposición, intensidad del estrés y de la etapa del desarrollo en que se encuentre el arroz (Howarth y Ougham, 1993; Fujino et al., 2004; Díaz et al., 2006). Posterior a la siembra, las bajas temperaturas pueden causar una menor tasa de germinación (da Cruz et al., 2006), una disminución del contenido de clorofila en la etapa de plántula (Aghaee et al., 2011) e inhibición de la fotosíntesis (Allen y Ort, 2001; Díaz et al., 2006; Suzuki et al., 2008), induciendo un estrés oxidativo. Lo anterior afecta el vigor de las plantas (da Cruz et al., 2006), produciéndose, en algunos casos, clorosis y lesiones irreversibles en las hojas (Andaya y Mackill, 2003; Suzuki et al., 2008). Durante la etapa reproductiva, las bajas temperaturas pueden generar esterilidad floral en la panícula, lo que resulta en una menor producción y rendimiento de grano (Shimono et al., 2007).

**Cuadro 1.** Temperaturas críticas y óptimas para el desarrollo del cultivo del arroz.

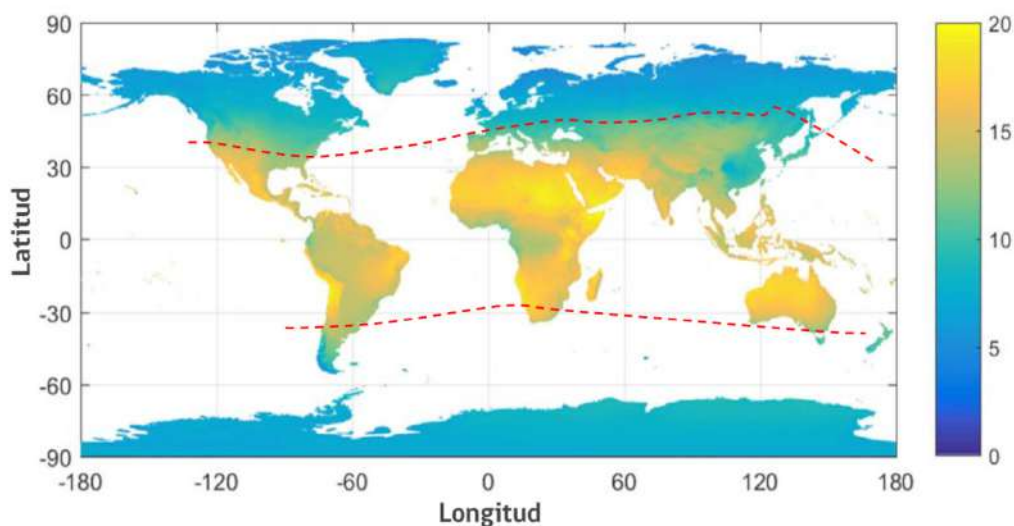
Estado de desarrollo	Temperatura media crítica (°C)		Temperatura media óptima (°C)
	Baja	Alta	
Germinación	10	45	20-35
Plántula	12-13	35	25-30
Macolla	9-16	33	25-31
Iniciación de panícula	15	-	-
Diferenciación de panícula	15-20	38	-
Antesis	22	35	30-33
Madurez	12-18	30	20-25

Fuente: adaptado de Yoshida (1981).

Otra restricción importante para el cultivo del arroz en el mundo es la radiación solar. En general, las plantas tienen la capacidad de utilizar sólo parte del total del espectro electromagnético que entrega el sol, la que corresponde a la radiación fotosintéticamente activa (Mottus et al., 2013). Esta radiación (400 y 700 nm) contribuye al crecimiento y desarrollo adecuado de las plantas y es absorbida por la clorofila a, b y carotenoides presentes en la planta (McCree, 1972a; 1972b). La

radiación fotosintéticamente activa es expresada en términos de densidad de flujo de fotones fotosintéticos ( $\mu\text{mol fotones s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ). Por otro lado, la cantidad de radiación absorbida depende de la especie, estado de desarrollo, lugar geográfico, disponibilidad de agua, nutrición, ángulo de incidencia de la radiación, entre otras (Campillo et al., 2012; Gautam et al., 2019). En el caso específico del arroz, la cantidad de radiación disponible para los procesos fotosintéticos depende, principalmente, de la ubicación geográfica del cultivo y se asocia con la presencia de nubes que limitan el acceso a esta radiación, en especial en zonas húmedas. Los requerimientos de radiación solar para el cultivo del arroz son mayores en la medida que la planta avanza en su estado de desarrollo. De esta manera, en términos de radiación total, una planta de arroz en estado vegetativo necesita diariamente entre 100 y 400  $\text{cal cm}^{-2}$ . En cambio, una planta en etapa reproductiva y llenado de grano, necesita entre 500 y 600  $\text{cal cm}^{-2}$  por día para lograr rendimientos en grano óptimos (Yoshida, 1981).

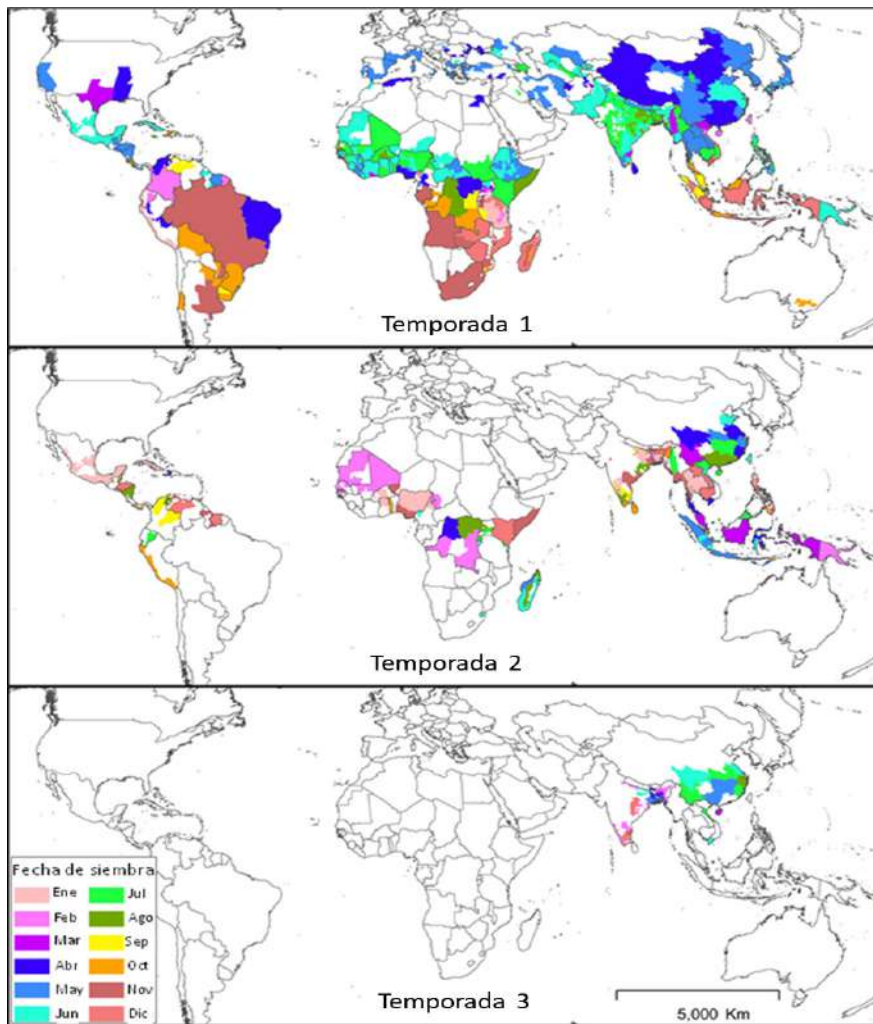
En general, las zonas agroclimáticas donde el arroz se desarrolla presentan los mejores niveles de radiación fotosintéticamente activa con valores entre 10 y 20  $\text{kmol de fotones m}^{-2} \text{año}^{-1}$  (Figura 1). Considerando la radiación total, se ha reportado que la radiación promedio diaria disponible en los países con clima mediterráneo como Chile, Australia y U.S.A., es 100  $\text{cal cm}^{-2}$  por día, mayor que en países con clima monzónico tropical (FAO, 1998).



Fuente: Ryu et al., 2000.

**Figura 1.** Radiación fotosintéticamente activa anual. Los colores corresponden a la escala en  $\text{kmol fotones m}^{-2} \text{año}^{-1}$ . Las líneas rojas discontinuas corresponden a los límites latitudinales norte y sur, en donde el cultivo del arroz se desarrolla.

Considerando los diferentes climas presentes en nuestro planeta, se ha relacionado las fechas de siembra y diferentes temporadas con los niveles de producción de arroz en el mundo (Laborte et al., 2017). De esta manera, la temporada 1 representa la mayor producción de arroz, la temporada 2 una producción intermedia y la temporada 3, una producción baja (Figura 2). De la figura también se puede deducir que existen regiones con más de una producción de arroz al año y otras que solamente tienen una sola temporada como Australia, Uruguay, Argentina, U.S.A. y Chile.



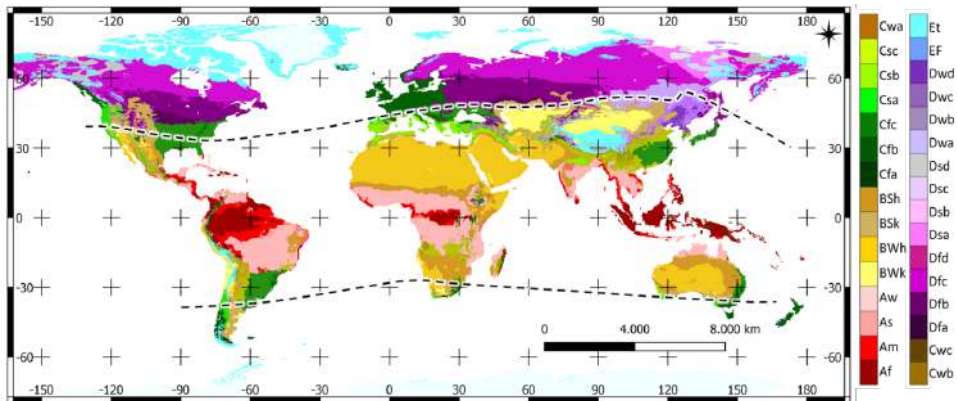
Fuente: Laborte et al., 2017.

**Figura 2.** Temporadas del cultivo de arroz con diferentes niveles de rendimiento en grano. Los colores en la figura representan el mes en el cual se desarrollan las labores relacionadas con el inicio del cultivo del arroz en las diferentes regiones del mundo. La temporada de mayor rendimiento corresponde a la 1 y la de menor rendimiento a la 3.

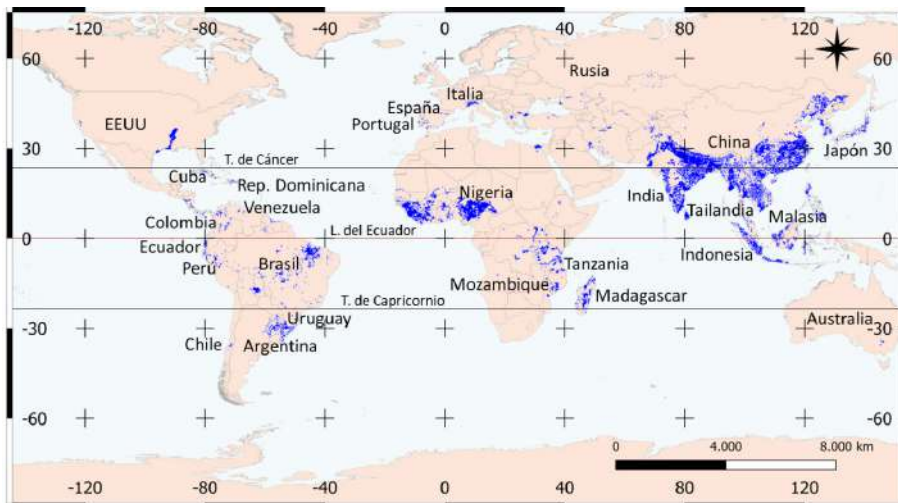
Si bien, más del 75 % del arroz cultivado proviene de regiones con clima tropical (entre Trópico de Cáncer y Capricornio), también puede ser cultivado en climas secos, templados y templados fríos. En el mundo, el cultivo del arroz se realiza entre el río Amur, en la frontera entre Rusia y China (53 ° N; Patra et al., 2016) y la localidad de San Nicolás, en la zona central de Chile (36 ° S; Donoso et al., 2014), cuya clasificación climática está bien caracterizada (Figura 3). En ese contexto, se han realizado diversos esfuerzos para fijar la ubicación agroclimática del cultivo del arroz. Es así como una herramienta desarrollada por la Universidad de Wageningen, el Instituto Water for Food de la Universidad de Nebraska y la Universidad de Nebraska, denominada Global Yield Gap Atlas (GYGA), ha permitido determinar las brechas asociadas a la producción de arroz, ubicándolas geográficamente, además de zonificarla para conocer el contexto climático en el cual se desarrolla este cultivo en el mundo (de Groot, 2015). Fruto de ello, se generaron mapas que consideran la producción mundial de arroz y su ubicación (Figura 4).

Es importante destacar que, del total de la superficie mundial dedicada al cultivo del arroz, sólo una pequeña fracción se desarrolla fuera de los trópicos de cáncer y capricornio, como en el caso

del norte de China, Japón, Corea, Italia, Rusia y Kazajistán por el norte, y Chile, Sur de Brasil, Uruguay, Argentina, y Australia por el sur.



**Figura 3.** Clasificación de climas según Köppen-Geiger. La línea discontinua de color negro corresponde al límite sur y norte donde se cultiva el arroz en el mundo, respectivamente. **Clima A:** Tropical (Af: Ecuatorial; Am: Monzónico; As: Sabana (verano seco); Aw: Sabana (invierno seco)), **Clima B:** Seco (Árido y Semiárido)(BS: Estepario; BSh: Estepario cálido; BSk: Estepario frío; BW: Desértico; BWh: Desértico cálido; BWk: Desértico frío), **Clima C:** Templado/Mesotermal (Cf: Precipitaciones constantes (Cfa: Verano cálido; Cfb: Verano suave; Cfc: Verano frío); Cs: Verano seco (Csa: Verano cálido; Csb: Verano suave; Csc: Verano frío); Cw: Invierno seco (Cwa: Verano cálido; Cwb: Verano suave; Cwc: Verano frío)), **Clima D:** Templado frío/Continental/Microtermal (Df: Precipitaciones constantes (Dfa: Verano cálido; Dfb: Verano suave; Dfc: Verano frío; Dfd: Invierno muy frío); Ds: Verano seco (Dsa: Verano cálido; Dsb: Verano suave; Dsc: Verano frío; Dsd: Verano muy frío); Dw: Invierno seco; Dwa: Verano cálido; Dwb: Verano suave; Dwc: Verano frío; Dwd: Verano muy frío)), **Clima E:** Polar y de alta montaña (ET: Tundra; EF: Hielo; EB: Alta montaña) (Adaptado: Kottek et al., 2006).



**Figura 4.** Distribución del cultivo del arroz en el mundo. En color azul se muestran los países productores. Se reunió en una sola imagen, la presencia de arroz de riego y seco en el mundo. En el mapa se indican algunos de los países que producen arroz en el mundo. Además, se representan como líneas continuas, el Trópico de Cáncer (T. de Cáncer), Línea del Ecuador (L. del Ecuador) y Trópico de Capricornio (T. de Capricornio) (Adaptado: de Groot, 2015).

## Diferentes regiones agroclimáticas del mundo

A nivel mundial, el arroz es cultivado bajo diversas condiciones climáticas, donde las principales restricciones para su desarrollo son las altas o bajas temperaturas y la radiación solar. A continuación, se describe gran parte de la variabilidad climática en la que el arroz se desarrolla.

### Asia

En el continente asiático, el arroz está distribuido en el este, sur, sudeste y centro de Asia. Los principales países productores de arroz en este continente, en orden de relevancia, son China (28 %), India (22 %), Indonesia (10 %), Bangladesh (7 %), Vietnam (6 %), Tailandia (5 %), Myanmar (4 %), Filipinas (2,5 %), Japón (1,5 %), Camboya (1,3 %) y Pakistán (1 %) (Bandumula, 2018), en donde se cultiva el arroz en condiciones de riego y de secano. Los once países asiáticos contribuyen, en un 88 %, a la producción mundial de arroz, mientras que ocho de esos países aportan el 35 % del total de exportaciones de arroz en el planeta. Considerando que el 37 % de la población mundial se concentra en China e India, ellos contribuyen con cerca del 50 % de la producción global de arroz.

### Este de Asia

#### China

En China la producción de arroz corresponde a una parte importante de su actividad económica, lo que también representa el 28 % de la producción mundial. Los principales climas presentes en China corresponden a templado de tierras altas (sobre 1000 ms.n.m.), templado continental, subtropical húmedo, templado estepa y semiárido, templado desértico y árido, y tropical húmedo. En China, el cultivo del arroz se extiende desde Mohe (53°27' N), provincia de Heilongjiang en el norte, con altitud de hasta 2695 ms.n.m, hasta Sanya (18°09' N) provincia de Hainan en el sur. En general, se siembra arroz *japonica* en el norte y arroz tipo *indica* en el sur, además de otros tipos de arroces como los aromáticos y glutinosos (FAO, 2002).

**Región noreste.** Es la zona de producción del arroz ubicada al extremo norte del mundo, precisamente en Mohe (53°27' N), provincia de Heilongjiang. Incluye a las provincias de Heilongjiang, Jilin y parte de Liaoning y del interior Mongolia. Es la zona más importante en producción de arroz *japonica* de China, caracterizada por una acumulación anual de temperaturas que oscila entre los 2.000 y 3.700 °C (base 10 °C); 2.200 a 3.100 horas de luz solar por año y 350 a 1.100 mm de precipitaciones durante el desarrollo del cultivo (Tang et al., 2010). La zona produce sólo una cosecha al año, correspondiente a un arroz de período corto de desarrollo. Es un cultivo de verano que es trasplantado entre abril y junio, y cosechado entre septiembre y octubre (7 % de la producción). Esta zona es la más afectada por las bajas temperaturas de China, al pertenecer a un clima templado y frío. Los veranos son más lluviosos que los inviernos. En la Figura 5A se representa el climograma de la ciudad de Jamusi, ubicada en la provincia de Heilongjiang. Esta localidad presenta un clima, según Koppen Geirger, templado frío y con verano seco y cálido (Dwa). Se puede observar que, debido a temperaturas bajas durante el invierno, cercanas a -20 °C, la única ventana para el establecimiento del cultivo en esta zona, está entre mayo y septiembre.

**Región noroeste.** En ella se practica el cultivo de arroz de secano y una cosecha al año. Incluye a las provincias de Xinjiang, Ningxia, parte de Gansu y del interior de Mongolia, además del norte de Qinghai, Shanxi, Hebei y Liaoning. Es la zona más seca de China, debido a las bajas precipitaciones (150-200 mm al año). El arroz se siembra alrededor de los ríos y en pequeñas superficies (Tang et al., 2010).

**Región norte.** Se practica el cultivo de arroz *japonica* de riego, el que es provisto por ríos y bombas de riego, con algunas siembras de secano, donde no hay disponibilidad de agua. Se trata de una zona delimitada por la montaña Qinling, el río Amarillo en el sur, la Gran Muralla por el norte y la provincia de Shaanxi por el oeste. Incluye a las provincias de Beijing, Tianjing y Shandong y partes de Henan, Hebei, Shanxi, Shaanxi, Jiansu y Anhui. Zona de altas temperaturas y humedad en el verano producto de los monzones, y de bajas temperaturas en la primavera y otoño. Posee una acumulación anual de temperaturas de 4.000 a 5.000 °C (base 10 °C), con 2.000 a 3.000 horas de sol anuales y 580 a 1.000 mm de precipitaciones por año (Tang et al., 2010). El periodo del cultivo en la zona norte se extiende desde mayo-junio a agosto-septiembre (FAO, 2002).

**Región central.** Esta región es la más importante en producción de arroz, pudiendo obtenerse una o dos cosechas al año. Se extiende desde la costa este hasta las planicies de Chengdu en el oeste, y desde la montaña Nanling en el sur hasta el río Huai en el norte. Incluye las provincias de Jiangsu, Zhejiang, Anhui, Jianmgxi, Hunan, Hubei, Sichuan y los alrededores de Shanghai y Chongqing a lo largo del río Yangtze (Tang et al., 2010). Esta zona posee un clima subtropical, caluroso y húmedo, con presencia de monzones. El cultivo puede durar entre 210 a 260 d, con presencia de 4.500 a 6.500 °C acumulados por año, 700 a 1.500 horas de sol y 700 a 1.600 mm de precipitaciones. Se cultiva arroz tipo *indica*, *japonica* y glutinoso, con una alta presencia de híbridos tipo *indica*.

**Región sur (este).** Es una región donde se pueden obtener dos cosechas de arroz tipo *indica* al año. Incluye el sur de Guangdong, Guangxi, Fujian y Guizhou, además de Taiwán y Hainan. Posee un largo período de crecimiento de la planta, con acumulación anual de temperaturas de entre 5.800 y 9.300 °C, 1.000 a 1.800 horas de sol anual y 700 a 2.000 mm de precipitaciones anuales (Tang et al., 2010). El período de siembra a cosecha se extiende desde marzo-julio a junio- noviembre (FAO, 2002). Entre la zona centro sur de China, la ciudad de Guigang en la provincia de Guangxi (Figura 5B) y la Isla de Hainan (Figura 5C), poseen un clima templado con precipitaciones constantes y veranos cálidos (Cfa). En ambas localidades, no existen grandes diferencias en precipitaciones, aunque sí tienen diferencias en las temperaturas medias durante el período del cultivo.

**Región suroeste.** En esta región se pueden obtener uno o dos cultivos al año. Incluye a las provincias de Hunan, Guizhou, Guangxi, Qinghai, Yunnan, Sichuan y Tibet, incluyendo las planicies de Yungui y Quinzang. En la planicie de Yungui se produce arroz *indica* bajo 1.400 m s.n.m. y arroz *japonica* sobre 1.800 m s.n.m. En la zona intermedia, entre 1.800 y 1.400 m s.n.m. se cultivan arroces *indica* y *japonica*, y arroz de secano en las zonas montañosas y pendientes de las colinas. En la región se puede producir un cultivo en las zonas más templadas y dos cultivos en las zonas bajas que son calurosas y húmedas (Tang et al., 2010). Debido a las diferencias de altura de los campos de arroz, las temperaturas diurnas y nocturnas presentan una amplia variabilidad. El clima es principalmente subtropical, caluroso y húmedo en las partes bajas. El período disponible para el cultivo es de 180 a 210 d, con una acumulación anual de temperaturas de 2.900 a 8.000 °C, 800 a 1.500 horas de sol al año y 500 a 1.400 mm de precipitaciones anuales (Tang et al., 2010). En Yunnan, el periodo del cultivo se extiende desde marzo a septiembre (FAO, 2002). La producción de arroz comienza en febrero a lo largo del río Yangtze y en las provincias del sur se trasplanta entre febrero y abril. La cosecha se presenta entre junio y julio. Posteriormente, se realiza un trasplante entre marzo y junio en el sureste y a lo largo del río Yangtze, y se cosecha entre octubre y noviembre. Un trasplante tardío es realizado posterior a la cosecha de la siembra de principios de año, dando origen a una cosecha entre octubre y noviembre.

## Japón

Japón cuenta con un clima con las cuatro estaciones bien marcadas (primavera, verano, otoño e invierno) (Washio, 2013), con áreas principalmente subtropicales y templadas (Ricepedia, 2020).

El período de siembra a cosecha en el norte de Japón varía desde mayo-junio a septiembre-octubre; en la zona central desde abril-mayo a agosto-octubre y en la zona sur de abril-mayo a agosto-septiembre (FAO, 2002). La principal metodología de cultivo del arroz es el trasplante. El arroz se cultiva en todo el país, con la mayor producción concentrada en la isla de Hokkaido. Una de las principales ciudades productoras en Hokkaido es Sapporo, la cual cuenta con un clima frío y templado. Según Köppen y Geiger, su clima se clasifica como Dfa. La temperatura media de esta ciudad es de 8,2 °C y la precipitación anual es de 1.153 mm (Figura 5D). Mayo es el mes más seco, con cerca de 58 mm de precipitaciones, mientras que el mes más lluvioso es agosto con cerca de 160 mm.

## Sur de Asia

### India

El arroz es uno de los principales granos producidos en India. Este país tiene una gran superficie cultivada, principalmente bajo climas cálidos y húmedos, en sectores que tienen gran aporte de precipitaciones anuales (> 1.000 mm), por lo que el cultivo se desarrolla sin riego. Hay otros sectores con menos precipitaciones donde el arroz es irrigado. La principal metodología para el cultivo del arroz en la India es el trasplante.

El arroz es cultivado en tierras altas (menor disponibilidad de agua) o tierras bajas (alta disponibilidad de agua). Se presentan tres períodos de cultivo: marzo-mayo a junio-octubre; junio-octubre a noviembre-febrero; noviembre febrero a marzo-junio (FAO, 2002).

El arroz se cultiva en los estados de Uttar Pradesh, West Bengal, Andhra Pradesh, Punjab, Orissa, Bihar, Madhya Pradesh, Tamil Nadu, Haryana y Assam (Mahajan et al., 2017). Los climogramas representan climas característicos de la zona arroceras de India (Figura 5E y 5F), con temperaturas promedio que pueden superar 30 °C y precipitaciones más abundantes en Kumbakonam en el estado de Tamil Nadu (Clima Tropical; Aw) que en la ciudad de Gohana en el estado de Haryana (Clima Seco; BSk).

## Sudeste de Asia

### Tailandia

En Tailandia el arroz se cultiva en todo el país. Sin embargo, el 50 % se concentra en la zona norte, aunque es en la zona central donde se producen los mayores excedentes. El principal sistema de cultivo es el trasplante en el arroz de riego y secano en suelos bajos. En la zona central se usa principalmente el sistema inundado con de semilla pre-germinada (FAO, 2002). El clima es principalmente tropical, con menores incidencias de precipitaciones en invierno en comparación con el verano (Figura 5G). Según la clasificación de Köppen Geiger el clima corresponde a Aw, con temperaturas promedio de 27,1 °C y precipitaciones anuales de 1.582 mm. El mes más seco es enero con 1 mm, mientras que la mayor parte de las precipitaciones ocurren en agosto con un promedio de 320 mm.

## Asia Central

### Kazajistán

Una de las localidades productoras de arroz en Kazajistán es Kyzylorda. Esta localidad presenta escasas precipitaciones anuales (151 mm; Figura 5H). De acuerdo con Köppen y Geiger el clima se clasifica como seco y desértico frío (BWk). El mes más seco es septiembre con sólo 3 mm de precipitación. En abril, la precipitación alcanza su máximo, con un promedio de 20 mm. Las temperaturas promedio están entre -8 °C en el mes de enero y 27,7 °C en el mes de julio.

## América

Si bien América no corresponde a uno de los principales productores de arroz en el mundo, la diversidad de climas presentes hace interesante su mención en este trabajo. Con ello, se pretende conocer y contrastar los diferentes climas en los que este cultivo se desarrolla. La superficie arroceras de América corresponde a 7,2 millones de ha en diferentes condiciones edafoclimáticas (Haefele et al., 2014), con presencia de arroz irrigado y de secano. Brasil y U.S.A. concentran más del 60 % de la producción en el continente, con una producción de 12 y 10 millones de toneladas, respectivamente. Le siguen Perú con 2,8 millones t, Colombia con 2 millones, Argentina con 1,6 millones, Uruguay con 1,4 millones y Ecuador con 1,1 millones. Bajo 1 millón t están Guyana, Paraguay, Venezuela, Nicaragua, Bolivia, México, Panamá, Surinam, Costa Rica, Chile, Honduras, Guatemala y El Salvador.

## América del Sur

### Uruguay

Uruguay se encuentra entre los 30° y 35° de latitud sur, con un clima subtropical a templado, sin grandes fluctuaciones de temperatura y precipitaciones durante el año. La precipitación media anual oscila entre 1.200 mm (suroeste) y 1.600 mm (noreste). La temperatura media es de 17,7 °C que oscila entre 19,8 °C (norte) y 16,6 °C (sur). Las temperaturas medias mínimas y máximas alcanzan los 12,9 °C y 22,6 °C, respectivamente. Los registros de temperaturas más altas corresponden a enero y los más bajos a julio (Castaño et al., 2011). El arroz se cultiva mayoritariamente mediante siembra mecanizada, directa y al voleo. La fecha de siembra es entre fines de septiembre y noviembre, siendo la época óptima de siembra a principios de octubre. La fecha de cosecha es en marzo- abril.

La localidad arroceras de Bella Unión, al norte de Uruguay, tiene un clima cálido y templado (Figura 5I). De acuerdo con Köppen y Geiger su clima se clasifica como Cfa. La temperatura media anual es de 19,6 °C y las precipitaciones anuales son de 1.366 mm. El mes más seco es agosto con 66 mm y el más lluvioso es abril con 147 mm. El mes de enero es el más cálido con un promedio de 26,2 °C y julio es el mes más frío con temperaturas que promedian 13,7 °C. En el caso de la localidad de Treinta y tres, en la zona este de Uruguay, tiene un clima cálido y templado (Figura 5J), y según la clasificación de Köppen y Geiger, su clima también corresponde a una clasificación Cfa. La temperatura promedio anual es de 17,3 °C y la precipitación anual es de 1.241 mm. El mes más seco corresponde a diciembre con 88 mm y la mayor cantidad de precipitaciones ocurre en abril con 119 mm. Enero es el mes más cálido con temperaturas promedio de 23,7 °C. Por otro lado, las temperaturas más bajas ocurren en julio con un promedio de 11,7 °C.



## Brasil

La variedad de climas presente en Brasil permite realizar el cultivo del arroz en diferentes fechas dependiendo de la localidad. En el sur se realiza entre agosto y diciembre, cosechándose entre marzo y abril. En cambio, en el noreste se siembra entre marzo y mayo y se cosecha entre agosto y noviembre. Por otro lado, en el norte se siembra entre noviembre y diciembre y se cosecha entre abril y junio. En la zona norte el clima es cálido y húmedo con promedios de temperatura de 26 °C y entre 1.500 y 3.000 mm de precipitaciones. En el sur hay clima subtropical (Rio Grande do Sul) con inviernos secos y fríos y veranos húmedos y lluviosos. El sureste se caracteriza por inviernos suaves y veranos lluviosos con 18 a 24 °C de temperatura media y 900 a 4.400 mm de precipitaciones. Por ejemplo, en la localidad de Pelotas en Rio Grande del Sur el mes más seco es noviembre, con 70 mm (Figura 5K), mientras que la mayor parte de la precipitación cae en septiembre, promediando 139 mm. Según la clasificación de Köppen y Geiger, es un clima templado con veranos cálidos y precipitaciones constantes durante todo el año (Cfa). El mes más caluroso del año es enero con un promedio de 23,4 °C. El mes de julio es el más frío, con temperaturas que promedian 12,7 °C. La diferencia en precipitación entre el mes más seco y el más lluvioso es de 69 mm. A lo largo del año, las temperaturas varían en 10,7 °C. En otro ejemplo, en la ciudad de Formoso do Araguaia del Estado de Tocantis, la precipitación más baja ocurre en julio, con un promedio cercano a 0 mm, mientras que diciembre tiene las mayores precipitaciones del año (334 mm) (Figura 5L). Según la clasificación de Köppen y Geiger el clima es Tropical con inviernos secos (Aw). Las temperaturas medias varían durante el año en apenas 2,5 °C. En el caso de la ciudad de Vitoria do Mearim en Maranhao, el mes más seco es septiembre con 29 mm en promedio (Figura 5LL). Según la clasificación de Köppen y Geiger, este clima es similar al anterior (Aw). Gran parte de las precipitaciones se concentran entre enero y mayo. El mes más cálido es octubre con un promedio de 28 °C y junio presenta la temperatura más baja con 26,9 °C.

## Chile

El cultivo del arroz en Chile se realiza principalmente mediante siembra de semilla pregerminada (80 %) y siembra directa (20 %). La fecha de siembra va desde fines de septiembre hasta noviembre, siendo ideal sembrar a mediados de octubre. La cosecha se realiza entre fines de marzo y mayo. El clima es principalmente mediterráneo de verano cálido (Csb) con una marcada estacionalidad. La temperatura media no sobrepasa 20 °C (Figura 5M) y las precipitaciones no exceden los 110 mm durante la temporada del cultivo.

## América del Norte, Centro América y El Caribe

### Estados Unidos

El arroz en U.S.A. es producido en dos sectores principalmente. En primer lugar y con la mayor producción están los estados de Arkansas, Louisiana, Mississippi y Texas, donde el arroz es sembrado entre abril y junio y cosechado entre agosto y septiembre. En segundo lugar se encuentra California, donde se siembra entre septiembre y noviembre y se cosecha entre abril y junio. La totalidad del arroz cultivado en U.S.A. corresponde a riego y los métodos de siembra se basan en el uso de semilla pre-germinada y siembra directa. A modo de ejemplo, la ciudad de Jonesboro del estado de Arkansas tiene un clima templado con veranos cálidos (Cfa), y la menor cantidad de lluvia ocurre en julio (Figura 5N), con un promedio de 78 mm. La mayor parte de la precipitación cae en mayo, promediando 130 mm. Las temperaturas son más altas en julio, con alrededor de 27,3 °C. Enero es el mes más frío, promediando 2,6 °C. La variación en precipitación entre los meses más seco y más húmedo es de 52 mm. A lo largo del año las

temperaturas varían en 24,7 °C. En el estado de Louisiana, la ciudad de Lake Charles posee un clima similar al anterior (Cfa). La menor cantidad de lluvia ocurre en marzo con 89 mm (Figura 5O) y la mayor en julio con 155 mm. Las temperaturas son más altas en promedio durante julio con alrededor de 27,8 °C. Las temperaturas medias más bajas del año se producen en enero, cuando está alrededor de 10,1 °C. Hay una variación en precipitaciones de 66 mm entre los meses más secos y el más húmedo. Por otro lado, se observa una variación de 17,7 °C entre el mes más cálido y el más frío. En el estado de California la menor cantidad de lluvia ocurre en julio con un promedio de 1 mm (Figura 5P). Según la clasificación de Köppen y Geiger, el clima de esta zona arrocera corresponde a templado con veranos cálidos (Csa). La mayor cantidad de precipitación se aprecia en enero, con un promedio de 106 mm. Las temperaturas son más altas en julio, con un promedio de 23,8 °C. Las temperaturas medias más bajas del año se producen en enero con 7,3 °C. La variación en precipitación entre el mes más seco y húmedo es de 105 mm y la variación en temperaturas durante todo el año es de 16,5 °C.

## Centroamérica

### Costa Rica

La principal zona arrocera de Costa Rica (Región de Chorotega) tiene un clima tropical (Köppen-Geiger: Aw), con inviernos más secos que en verano. La temperatura promedio es de 25,8 °C y las precipitaciones anuales alcanzan los 1.744 mm (Figura 5Q). El mes más seco es febrero, con 1 mm, mientras que durante el mes de agosto hay mayor presencia de precipitaciones, con 375 mm. Por otro lado, abril es el mes más caluroso, con una temperatura media de 27,4 °C y el más frío es diciembre con 24,7 °C.

## Caribe

### Cuba

Cuba posee un clima tropical (Köppen-Geiger: Aw), con dos fechas de siembra donde la principal forma de producir arroz es mediante trasplante y siembra directa. Los veranos son mucho más lluviosos que los inviernos. La temperatura media anual es 25,7 °C y las precipitaciones medias son de 1.148 mm anuales (Figura 5R).

## África

En África, el arroz se cultiva en 40 países en una superficie cercana a los 10 millones de hectáreas. Dentro de los cinco principales países productores de arroz están Nigeria (1.895.697 ha), Madagascar (1.183.614 ha), Guinea (1.005.822 ha), Costa de Marfil (968.271 ha) y Tanzania (942.438 ha) (Diagne et al., 2013). Debido a diversas restricciones bióticas y abióticas, la producción de arroz de África sólo permite abastecer al 60 % de la demanda de la población, importando el resto (Zenna et al., 2017). La distribución del área cultivada del arroz africano se encuentra principalmente en África Occidental (Semon et al., 2005). *Oryza glaberrima* crece en una zona que se extiende desde el delta del río Senegal en el oeste, hasta el Lago Chad en el este. Hacia el sureste bordea las cuencas de los ríos Benue, Logone y Chari, y en las islas de Pemba y Zanzíbar en Tanzania (Agnoun et al., 2012). La producción del arroz africano se realiza en cuatro sistemas de cultivo: suelos bajos y altos de secano, suelo regado, y en aguas profundas. Sin embargo, las mayores áreas de cultivo se ubican en los suelos planos inundados del norte de Nigeria, al interior del delta del río Níger en Mali, en partes de Sierra Leona y en las colinas del área limítrofe de Gana y Togo. Su cosecha es reducida y no se comercializa en el mercado internacional (Agnoun et al., 2012).

Según la topografía el manejo del cultivo está dividido en tierras bajas de secano (33 %), aguas profundas, secano en tierras altas (30 %), regado (26 %) y manglar (4 %) (Sié et al., 2012). También existe un pequeño porcentaje del cultivo (7 %) que se realiza en tierras altas (> 1.200 m s.n.m.) (Saito et al., 2013). En el caso de Madagascar, el cultivo se realiza mediante el trasplante, en un clima tropical en la costa, templado al interior y árido en el sur. El trasplante se realiza dependiendo de la ubicación geográfica. En el este se trasplanta en octubre-noviembre y se cosecha entre abril y julio. En la costa este se trasplanta entre abril y junio y se cosecha entre octubre y noviembre. En la costa oeste se trasplanta en noviembre, febrero o julio, dependiendo de la variedad, y se cosecha en enero, mayo u octubre, respectivamente. Ciudades como Antananarivo y Amparihy, tienen una descripción climática basada en Köppen y Geiger de inviernos secos con veranos suaves (Cwb; Figura 5S) y tropical (Af; Figura 5), respectivamente. El cultivo del arroz se desarrolla gracias a las precipitaciones, que pueden superar 300 mm en un mes, lo cual está asociado a altas temperaturas medias de 20 a 25 °C promedio.

## Europa

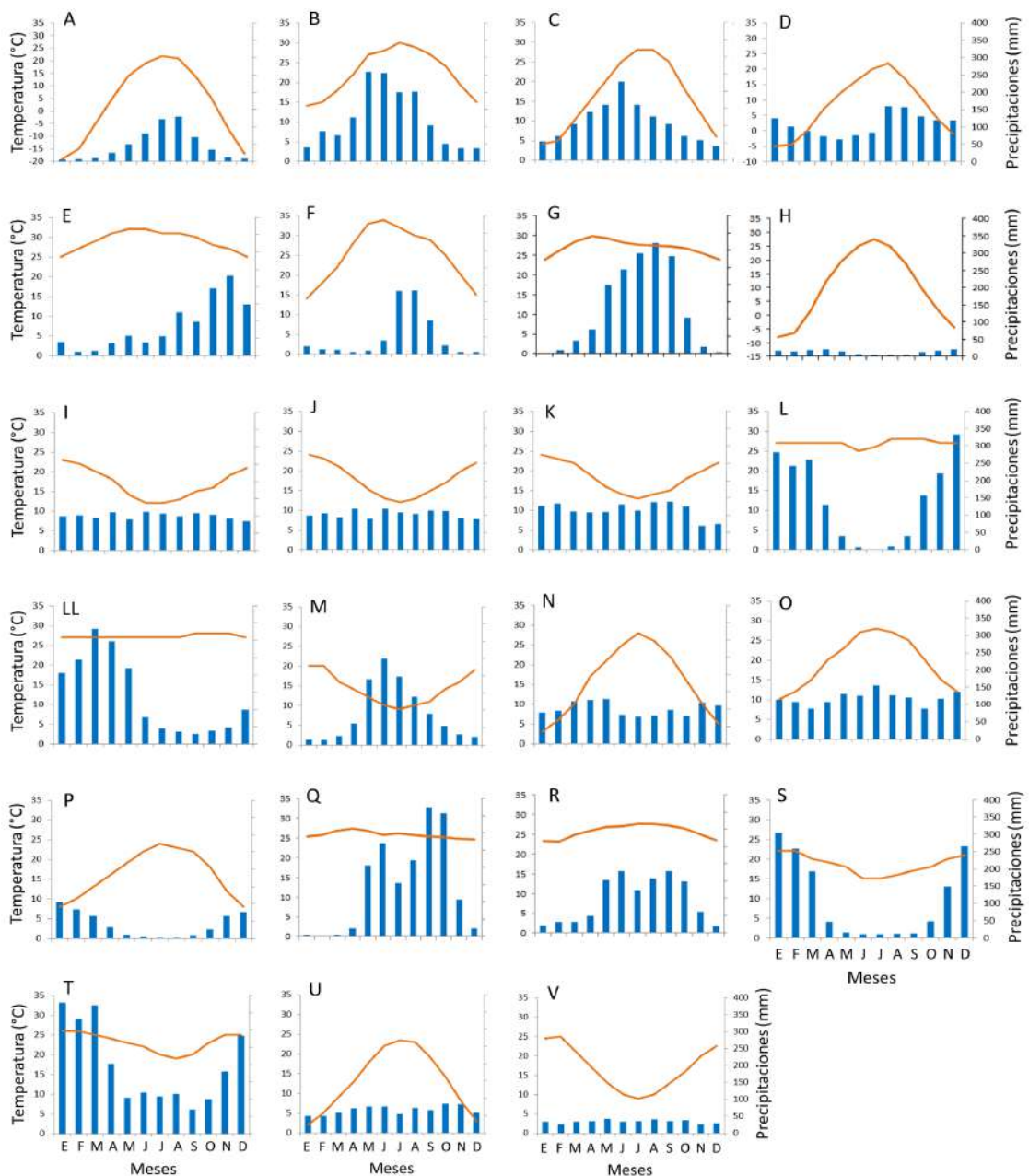
En Europa la producción de arroz se concentra en Italia (212.500 ha), España (113.200 ha), Portugal (31.200 ha), Grecia (29.200 ha), Francia (20.300 ha), Rumania (11.579 ha), Bulgaria (10.000 ha) y Hungría (2.500 ha), con una producción aproximada a los 2,7 millones de toneladas anuales, lo que corresponde a 0,4 % de la producción global de este cultivo (Hansjoerg y Vidotto, 2017). La producción corresponde a un cultivo de secano y riego.

## Italia

Italia es el principal productor de arroz de Europa y el cultivo se desarrolla en el valle del río Po. Este valle abarca las provincias de Vercelli, Novara, Alessandria, Milano y Pavia en el sector oeste y en las provincias de Mantova y Verona por el sector central, y en la provincia de Ferrara en el este. También se puede observar cultivo de arroz en la zona central de Italia en la provincia de Siena y en Sardeña. El clima del valle del Po es, según Köppen y Geiger, templado con veranos cálidos (Cfa). Esta localidad tiene un promedio de temperatura anual de 12 a 14 °C, con temperaturas mínimas en enero cercanas a 2 °C y temperaturas promedio mayores a 20 °C entre junio y agosto. El promedio de precipitaciones está entre 600 y 1.400 mm por año (Figura 5U). El arroz es cultivado entre abril y octubre en condiciones de riego, en predios altamente mecanizados. La cosecha se realiza entre septiembre y octubre (Hill y Hardy, 1999).

## Australia

El arroz en Australia está ubicado, principalmente, en los estados de Nueva Gales del Sur y, en menor medida, en el sur del Estado de Victoria. Los sistemas de siembra de arroz utilizados en Australia son siembra directa con maquinaria y siembra de arroz pre-germinado utilizando avión. La fecha de siembra recomendada es octubre. La zona arrocera corresponde a un clima semiárido frío (Köppen-Geiger: BSk), donde el mes más seco es febrero con 27 mm de precipitaciones (Figura 5V). En mayo la precipitación alcanza su máximo, con un promedio de 42 mm. El mes más cálido es febrero con un promedio de 24,7 °C y julio el mes más frío con 8,6 °C. La precipitación varía 15 mm entre el mes más seco y el más húmedo, y la variación en la temperatura anual alcanza los 16,1 °C.



**Figura 5.** Climograma de las diferentes zonas climáticas donde se desarrolla el cultivo del arroz en el mundo. **Asia:** A. Ciudad de Jiamusi en la provincia de Heilongjiang, China. B. Ciudad de Guigang en la provincia de Guangxi, China. C. Isla de Hainan, China. D. Ciudad de Sapporo, Isla de Hokkaido, Japón. E. Ciudad de Kumbakonam, Tamil Nadu, India sureste. F. Ciudad de Gohana, Haryana, India norte. G. Ciudad de Ubon Ratchathani, Tailandia. H. Ciudad de Kyzylorda, Kazajistán. **América:** I. Ciudad de Bella Unión al norte de Uruguay. J. Ciudad de Treinta y Tres en Uruguay. K. Ciudad de Pelotas en Rio Grande del Sur, Brasil. L. Ciudad de Formoso Do Araguaia del estado de Tocantis, Brasil. LL. Ciudad Vitoria do Mearim en Maranhao, Brasil. M. Ciudad de Parral en Chile. N. Ciudad de Jonesboro, Arkansas, U.S.A. O. Ciudad de Lake Charles, Louisiana, U.S.A. P. Ciudad de Davis, California, U.S.A., Q. Región de Chorotega, ciudad de Liberia, Costa Rica. R. Ciudad de las Tunas, Cuba. **África:** S. Ciudad de Antananarivo, Madagascar central. T. Ciudad de Amparihy Madagascar norte. **Europa:** U. Mantua norte de Italia (valle del Po), Italia. **Oceanía:** V. Ciudad de Griffith, Nueva Gales del Sur, Australia. La línea naranja corresponde a la temperatura media y las barras de color azul corresponden a las precipitaciones mensuales (Adaptado: Zepner et al., 2020).

## Determinación del potencial y brecha de rendimiento para el cultivo del arroz en el mundo

Con el fin de contar con mayor conocimiento respecto a los diferentes aspectos relacionados con el rendimiento en el cultivo del arroz, se generó la herramienta denominada atlas GYGA ([www.yield-gap.org](http://www.yield-gap.org)). Esta herramienta contiene información relacionada con la zonificación del cultivo del arroz en el mundo, asociando el clima, suelo y sistemas de producción, lo que permite contar con información valiosa para la toma de decisiones y realización de transferencia de tecnología. Además, esta plataforma permite la monitorización del impacto a largo plazo, evaluando además el impacto del cambio climático.

Las estimaciones de las brechas de los rendimientos están basadas en la ubicación espacial de la producción de arroz, zonas climáticas, grados día, estacionalidad en la temperatura e índice de aridez, además de datos de promedios nacionales obtenidos en cada país estudiado. La estimación del rendimiento potencial se realiza mediante la simulación basada en datos meteorológicos de al menos 10 años, información de suelo y sistema de cultivo (Van Ittersum et al., 2013; Van Wart et al., 2013a; 2013b; Van Bussel et al., 2015). La calibración utiliza modelos previamente evaluados experimentalmente en las condiciones simuladas. Estos modelos pueden ser diferentes dependiendo del sitio de estudio. Para ello, se cuenta con experimentos previos donde se realiza un cultivo sin limitantes de nutrientes, enfermedades, malezas o clima. La calibración fenológica se basa en datos meteorológicos, fechas de siembra y madurez entregada por agrónomos de los países estudiados. Hasta ahora no todos los países arroceros han sido estudiados. Sin embargo, aquí se muestran los principales resultados.

Estudios realizados en China, basados en GYGA, muestran un potencial de rendimiento promedio de  $9,5 \text{ t ha}^{-1}$  en arroz de riego. Considerando que el rendimiento actual es de  $6,9 \text{ t ha}^{-1}$ , la brecha explotable de rendimiento en este país es sólo de  $0,7 \text{ t ha}^{-1}$ , ya que en condiciones comerciales sería posible alcanzar el 80% del rendimiento potencial estimado. Los rendimientos promedio agrícolas a menudo comienzan a estancarse cuando alcanzan entre el 75 % y el 85 % del potencial de rendimiento (Cassman et al., 2003; Lobell et al., 2009). Por otro lado, India tiene un promedio de rendimiento de  $4,4 \text{ t ha}^{-1}$ , con un potencial de rendimiento de  $9,0 \text{ t ha}^{-1}$ . En el caso del arroz de secano, estudios realizados en la India demuestran que existe un valor actual de  $1,7 \text{ t ha}^{-1}$  de rendimiento en grano, lo que contrasta con el potencial de  $6,9 \text{ t ha}^{-1}$ , dependiendo de la presencia de precipitaciones. En el caso del arroz de secano en Brasil, se muestra que, considerando un rendimiento actual promedio de  $2,6 \text{ t ha}^{-1}$ , se puede esperar un rendimiento potencial de  $9,7 \text{ t ha}^{-1}$  ([www.yieldgap.org](http://www.yieldgap.org)). En el caso de U.S.A., los rendimientos actuales para el arroz de riego son cercanos a  $8,1 \text{ t ha}^{-1}$  y el rendimiento potencial promedio es de  $12,4 \text{ t ha}^{-1}$ . En el caso del arroz de riego en Brasil, los rendimientos actuales alcanzan  $7,6 \text{ t ha}^{-1}$  con un potencial de rendimiento de  $14,8 \text{ t ha}^{-1}$ , mientras que en Uruguay el rendimiento promedio actual es de  $8,1 \text{ t ha}^{-1}$  y el potencial es similar al de Brasil ( $14 \text{ t ha}^{-1}$ ) (Carracelas et al., 2019). En estos países (Brasil, Uruguay y U.S.A.) se registró el mayor potencial de rendimiento y rendimientos actuales de una sola cosecha de arroz por año. La variación en el potencial del rendimiento detectada en los países productores de arroz incluidos en el Atlas Mundial de Brecha de Rendimiento, se explica principalmente por la amplia gama de ambientes donde se cultiva arroz y las diferencias en los sistemas de producción del cultivo. Los rendimientos actuales promedio, para la mayoría de los países incluidos en el atlas mundial, indican que sería posible mantener, o incluso aumentar, la producción de granos dentro de las áreas de producción de arroz existentes. Este aspecto es de fundamental importancia ya que contribuiría a satisfacer la creciente demanda de alimentos a nivel mundial (Carracelas et al., 2019).

## Consideraciones finales

Las bajas temperaturas, la radiación solar y las precipitaciones, son uno de los principales factores que limitan la distribución del cultivo del arroz en el mundo. Según lo estudiado, este cultivo

está presente en climas tropicales, secos y templados. Con ello, se muestra que el cultivo del arroz tiene una amplia distribución mundial. No obstante, aún existen importantes brechas de rendimiento en grano en diferentes países, lo que hace necesario mantener y sumar más países a los estudios de brecha y zonificación del cultivo, que incorporen información edafoclimática.

## Referencias

- Aghaee, A., Moradi, F., Zare-Maivan, H., et al. 2011. Physiological responses of two rice (*Oryza sativa* L.) genotypes to chilling stress at seedling stage. *Afr. J. Biotechnol.* 10:7617-7621.
- Agnoun, Y., Biauou, S., Sié, M., et al. 2012. The African rice *Oryza glaberrima* Steud.: Knowledge distribution and prospects: *Int. J. Biol.* 4:158-180.
- Aguirre-Gutiérrez, J., Serna-Chavez, H.M., Villalobos-Arambula, A.R., et al. 2015. Similar but not equivalent: ecological niche comparison across closely-related Mexican white pines. *Divers. Distrib.* 21:245-257.
- Allen, D.J., Ort, D.R. 2001. Impacts of chilling temperatures on photosynthesis in warm-climate plants. *Trends Plant Sci.* 6:36-42.
- Andaya, V.C., Mackill, D.J. 2003. Mapping of QTLs associated with cold tolerance during the vegetative stage in rice. *J. Exp. Bot.* 54:2579-2585.
- Bandumula, N. 2018. Rice production in Asia: Key to global food security. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* 88:1323-1328.
- Campillo, C., Fortes, R., del Henar Prieto, M. 2012. Solar radiation effect on crop production solar radiation. p. 1-30. In Babatunde, E.B. (ed.) *Solar radiation*. Covenant University, Ota, Nigeria.
- Carracelas, G., Guilpart, N., Grassini, P., et al. 2019. Potencial y brecha de rendimiento de arroz irrigado en Uruguay y otros países arroceros. p. 53-56. In Terra, J., Martínez, S., Saravia H. (eds.) *Arroz 2019*. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, INIA, Uruguay.
- Cassman, K.G., Dobermann, A.R., Walters, D.T., et al. 2003. Meeting Cereal Demand While Protecting Natural Resources and Improving Environmental Quality. *Annu. Rev. Env. Resour.* 28:315-358.
- Castaño, J., Giménez, A., Ceroni, M., et al. 2011. Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, Uruguay, Serie Técnica N° 193 (34 p).
- da Cruz, R., Milach, S.C., Federizzi, L.C. 2006. Inheritance of rice cold tolerance at the germination stage. *Genet. Mol. Biol.* 29:314-320.
- de Groot, H. 2015. GYGA irrigated rice results. CGIAR research program on climate change, agriculture and food security (CCAFS), Copenhagen, Denmark.
- Diagne, A., Amovin-Assagba, E., Koichi, F., et al. 2013. Estimation of cultivated area, number of farming households and yield for major rice-growing environments in Africa. p. 35-45. In Wopereis, M.C., Johnson, D.E., Ahmadi, N., et al. (eds.) *Realizing Africa's rice promise*. CAB International, Boston, USA.
- Díaz, S., Morejón, R., Castro, R., et al. 2006. Comportamiento de genotipos de arroz (*Oryza sativa* L.) seleccionados para tolerancia a bajas temperaturas en siembra temprana de frío. *Cult. Trop.* 27:71-75.
- Donoso, G., Leyton, M., Paredes, M., et al. 2014. Relative expression of genes related with cold tolerance in temperate rice at seedling stage. *Afr. J. Biotechnol.* 13:2506-2512.
- Fahad, S., Adnan, M., Noor, M., et al. 2019. Major constraints for global rice production. p. 1-22. In Hasanuzzaman, M., Fujita, M., Naha, K., et al. (eds.) *Advances in rice research for abiotic stress tolerance*. Elsevier, London, UK.

- FAO. 1998. Wetland characterization and classification for sustainable agricultural development. FAO, Harare, Zimbabwe.
- FAO. 2002. Rice Information. FAO, Rome, Italy.
- Fujino, K., Sekiguchi, H., Sato, T., et al. 2004. Mapping of quantitative trait loci controlling low-temperature germinability in rice (*Oryza sativa* L.) Theor. Appl. Genet. 108:794-799.
- Gautam, P., Lal, B., Nayak, A.K., et al. 2019. Inter-relationship between intercepted radiation and rice yield influenced by transplanting time, method, and variety. Int. J. Biometeorol. 63:337-349.
- Haefele, S.M., Nelson, A., Hijmans, R.J. 2014. Soil quality and constraints in global rice production. Geoderma 235:250-259.
- Hansjoerg, K., Vidotto, F. 2017. Rice production in Europe. In Chauhan, B.S., Jabran, K., Mahajan, G. (eds.) Rice production worldwide. Springer, Cham, Switzerland.
- Hill, J.E., Hardy, B. 1999. Proceedings of the Second Temperate Rice Conference. IRRI Books Nr 281816. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Laguna, Philippines.
- Howarth, C.J., Ougham, H.J. 1993. Gene expression under temperature stress. New Phytol. 125:1-26.
- Laborte, A., Gutiérrez, M., Balanza, J., et al. 2017. RiceAtlas, a spatial database of global rice calendars and production. Sci. Data 4:170074.
- Lobell, D.B., Cassman, K.G., Field, C.B. 2009. Crop yield gaps: Their importance, magnitudes, and causes. Annu. Rev. Env. Resour. 34:179-204.
- Mahajan, G., Kumar, V., Chauhan, B.S. 2017. Rice production in India. In Chauhan, B., Jabran, K., Mahajan, G. (eds.) Rice production worldwide. Springer, Cham, Switzerland.
- McCree, K.J. 1972a. The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. Agric. Meteorol. 9:191-216.
- McCree, K.J. 1972b. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. Agric. Meteorol. 10:443-453.
- Mottus, M., Sulev, M., Baret, F., et al. 2013. Photosynthetically active radiation: Measurement and modeling. In Richter, C., Lincot, D., Gueymard, C.A. (eds.) Solar energy. Springer, New York, USA.
- Patra, B., Ray, S., Ngangkham, U., et al. 2016. Rice. p. 1-80. In Singh, M., Upadhyaya H. (eds.) Genetic and Genomic Resources for Grain Cereals Improvement. Academic Press, Cambridge, Massachusetts, U.S.A.
- Ricepedia. 2020. Rice around the world. <http://ricepedia.org/rice-around-the-world> (acceso 16-03-2020).
- Ryu, Y., Jiang, C., Kobayashi, H. 2000. MODIS-derived global land products of shortwave radiation and diffuse and total photosynthetically active radiation at 5 km resolution from 2000. Remote Sens. Environ. 204:812-825.
- Saito, K., Nelson, A., Zwart, S.J., et al. 2013. Towards a better understanding of biophysical determinants of yield gaps and the potential for expansion of the rice area in Africa. p. 188-203. In Wopereis, M.C., Johnson, D.E., Ahmadi, N., et al. (eds.) Realizing Africa's rice promise. CAB International, Wallingford, UK.
- Semon, M., Nielsen, R., Jones, M., et al. 2005. The population structure of African cultivated rice *Oryza glaberrima* (Steud.): Evidence for elevated levels of linkage disequilibrium caused by admixture with *O. sativa* and ecological adaptation. Genetics 169:1639-1647.
- Shimono, H., Okada, M., Kanda, E., et al. 2007. Low temperature-induced sterility in rice: Evidence for the effects of temperature before panicle initiation. Field Crops Res. 101:221-231.

- Sié, M., Sanni, K., Futakuchi, K., et al. 2012. Towards a rational use of African rice (*Oryza glaberrima* Steud.) for breeding in sub-Saharan Africa. *G3-Genes Genom. Genet.* 6(Special issue 1):1-7.
- Suzuki, K., Nagasuga, K., Okada, M. 2008. The chilling injury induced by high root temperature in the leaves of rice seedlings. *Plant Cell Physiol.* 49:433-442.
- Takahashi, N. 1984. Differentiation of ecotypes in *Oryza sativa* L. p. 31-67. In Takahashi, N., Tsunoda S. (eds.) *Biology of rice*. Japan Science Society, Tokyo, Japan.
- Tang, S., Ding, L., Bonjean, A. 2010. Rice production and genetic improvement in China. p. 15-34. In He, Z., Bonjean, A. (eds.) *Cereals in China*. CIMMYT, México.
- Van Bussel, L.G.J., Grassini, P., Van Wart, J., et al. 2015. From field to atlas: upscaling of location-specific yield gap estimates. *Field Crops Res.* 177:98-108.
- Van Ittersum, M., Cassman K.G., Grassini, P. 2013. Yield gap analysis with local to global relevance—A review. *Field Crops Res.* 143:4-17.
- Van Wart, J., Kersebaum, K.C., Peng, S., et al. 2013a. Estimating crop yield potential at regional to national scales. *Field Crop Res.* 143:34-43.
- Van Wart, J., Van Bussel, L.G.J., Wolf, J., et al. 2013b. Use of agro-climatic zones to upscale simulated crop yield potential. *Field Crop Res.* 143:44-55.
- Washio, K. 2013. The prediction of climate change and rice production in Japan. *Rice Res.* 2:1-3.
- Yoshida, S. 1981. *Fundamentals in rice crop science*. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Laguna, Philippines.
- Zenna, N., Senthilkumar, K., Sie, M. 2017. Rice production in Africa. p. 117-135. In Chauhan, B., Jabran, K., Mahajan, G. (eds.) *Rice production worldwide*. Springer, Cham, Switzerland.
- Zepner, L., Karrasch, P., Wiemann, F., et al. 2020. ClimateCharts.net – an interactive climate analysis web platform. *Int. J. Digit. Earth* doi:10.1080/17538947.2020.1829112.