



Solutions for environment and development
Soluciones para el ambiente y desarrollo

Indicadores de características morfológicas y funcionales de los árboles de cacao para adaptarse al cambio climático

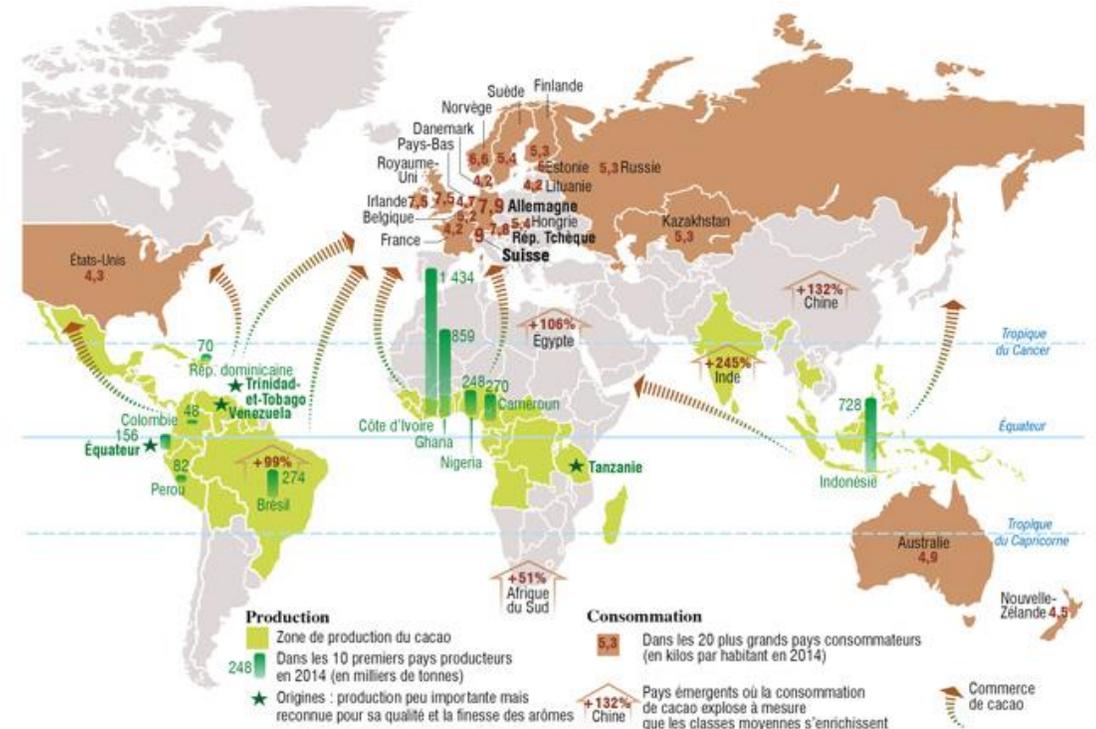
Dr. Dominique Dessauw y M.Sc. Allan Mata Quirós, CATIE



Introducción

Cultivo del cacao

- En el trópico húmedo entre 20° Norte y Sur
- 11,7 millones de ha para una producción de 5,2 millones de toneladas de cacao seco (FAOSTAT, 2017)
- En su mayoría, con bajo nivel de uso de insumos, sin riego y sin mecanización
- 5 - 6 millones de productores



Condiciones de cultivo

- **Altitud: entre 0 y 1000 m (Am C) o 1300 m (Am S)**
- **Pluviometría anual: 1200 hasta 4000 mm pero la distribución regular es esencial**
- **Periodo de sequía (<100 mm mensual): inferior a 3 meses**
- **Evapotranspiración: entre 1,6 mm/día en temporada seca y 3,2 mm/día en temporada húmeda**



Condiciones de cultivo

- **Temperaturas: 25-30°C promedio (mínimo mensual 15°C y mínimo absoluto 10°C ; máximo 34°C)**
- **pH óptimo: 6,5 (entre 5,0 y 8,5)**
- **Sombra: 70% (fase juvenil) hacia 35% (fase adulta)**



Limitaciones

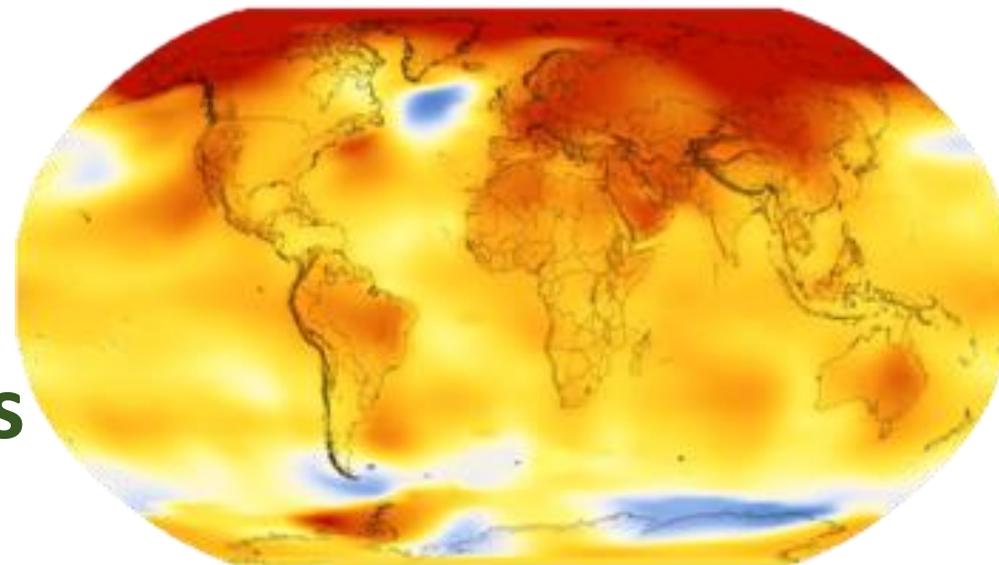
- **Enfermedades:** moniliasis, fitóftora, escoba de bruja, roselinia, mal de machete, antracnosis, etc.
- **Nutrición:** N, P, K, Ca, Mg
- **Metales pesados:** Cd
- **Índice de cosecha muy bajo**
- **< 10% de las flores producen mazorcas adultas**
- **Plagas:** mazorquero en el Perú (*Carmanta foraseminis*)



Cambio climático

- **Aumento del CO₂ atmosférico desde 400 ppm hasta entre 500 y 1370 ppm a finales del s.21**
- **Aumento temperaturas entre 1,4 hasta 4,8°C en promedio**
- **Variaciones en precipitaciones (sequía, fuertes lluvias, inundaciones)**
- **Incremento de eventos extremos**

Temperature Change in the Last 50 Years
(2014-2018 Average vs 1951-1980 Baseline)



Temperature anomaly (°C)





Efecto cambio climático

- **Altas temperaturas: disminución fotosíntesis si $>34^{\circ}\text{C}$, aumento transpiración ; maduración de mazorcas más rápida.**
- **Déficit de agua: reducción fotosíntesis, superficie foliar, conductancia estomática, transpiración, producción de biomasa aérea y flores, rendimiento y peso de mazorca ; aumento chermelles ; el desarrollo reproductivo es más susceptible al déficit de agua que el desarrollo vegetativo.**



Efecto cambio climático

- **Exceso de agua: reducción fotosíntesis, conductancia estomática, transpiración, producción de biomasa aérea y raíces, aumento efecto de enfermedades (fitóftora).**
- **Mayor concentración en CO₂: aumento fotosíntesis y producción de flores, reducción conductancia estomática y transpiración, aumento superficie hojas y producción cherelles, disminución tamaño de mazorca.**



1. Indicadores de respuesta de la planta frente a condiciones desfavorables

Repuestas al cambio climático

- **Sequía / inundación (hipoxia)**
- **Altas temperaturas**
- **Incremento CO₂**
- **Radiación solar**
- **Salinidad**
- **Viento**



Condiciones de crecimiento

- Cacao crece en áreas de altos índices de precipitación anual
 - Áreas son propensas a patrones irregulares de lluvias y sequías
 - Algunas áreas tienen suelos con baja capacidad de retención de humedad
- ↳ Producción irregular



Adaptación a sequía

- 1. Inhibición del crecimiento y desarrollo**
- 2. Cambios en la proporción de raíces/brotos (mayor biomasa en raíces que en brotes)**
- 3. Incremento en la longitud de las raíces**





Adaptación a sequía

- 4. Cambios en la actividad enzimática involucrada en el metabolismo antioxidante**
- 5. Diferenciación en la expresión génica**
- 6. Cambios en la absorción de nutrientes**



Cambios fisiológicos

- **Disminuye la capacidad de las raíces para absorber nutrientes**
- **Cambios en el metabolismo de los brotes, disminuyendo el transporte de carbohidratos a las raíces**
- **Cambios en la concentración de macro y micronutrientes en los brotes**

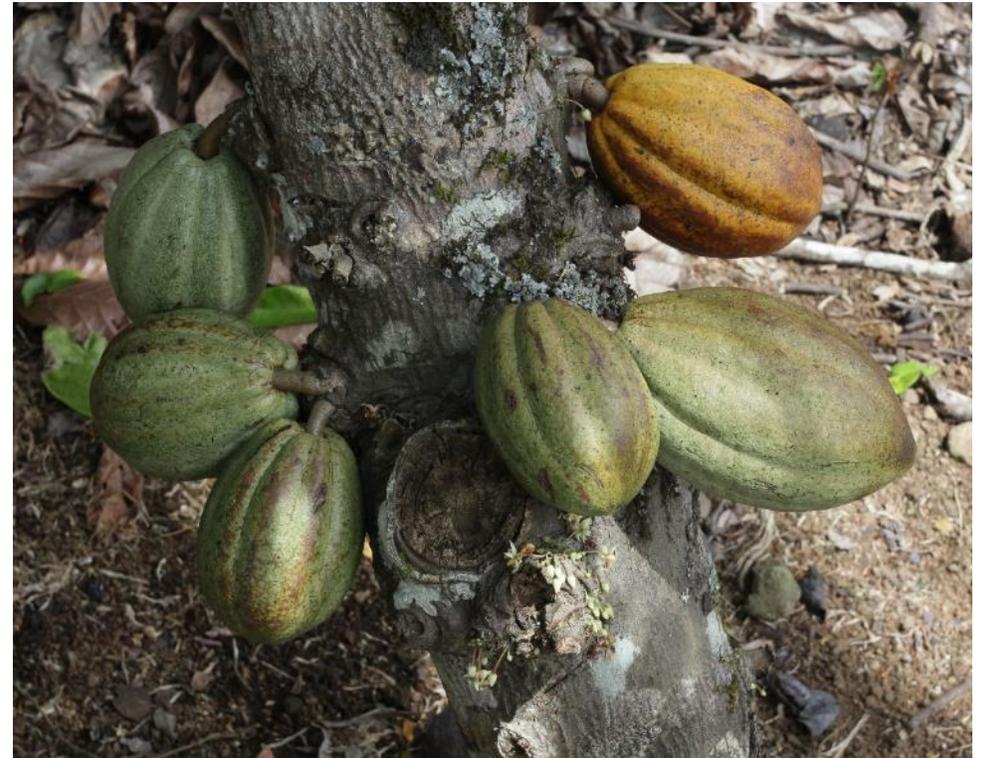


Respuestas químicas

- **Ca²⁺: Incrementa la concentración de ácido abscísico (ABA) en la planta**
- **K⁺: interviene en el cierre estomático, manteniendo la turgencia celular**
- **P: Incrementa la eficiencia fotosintética y en la actividad de enzimas oxidativas, incremento en la biomasa**
- **Mg²⁺: alteración en la distribución de biomasa entre raíces y brotes**

Sequía

- **Ajuste osmótico: a través de la acumulación neta de solutos (en particular potasio y fósforo en la hoja) en respuesta al estrés hídrico**



Sequía

- La regulación estomática es uno de los mecanismos clave para la conservación del agua, ya que los estomas son cruciales para regular la transpiración, aunque el cierre estomático también puede limitar la captación de carbono para la fotosíntesis.
- Conductancia estomática: la capacidad de las plantas para mantener estables el potencial hídrico y la turgencia en condiciones limitantes de agua es una importante adaptación fisiológica a la sequía.
- → Control estomático (cierre del estoma)

Sequía

- El cacao produce sus raíces en los 0,4 - 0,8m superiores de los suelos.
- Enraizamiento más profundo es una respuesta fisiológica y morfológica para escapar a periodo con sequía
- La asociación con especies de raíces más profundas, como la *Gliricidia*, es beneficiosa en épocas de estrés hídrico (apoyo del sistema agroforestal para manejar el estrés por sequía)



Sequía

- **Hojas:** las plantas de cacao producen hojas largas, grandes y anchas que pierden agua rápidamente en condiciones de alta irradiación
- El enrollamiento de la hoja para evitar mayor evaporación
- La producción de muchas hojas pequeñas y mas gruesas con más cera epicuticular y que caen rápidamente en época de sequia



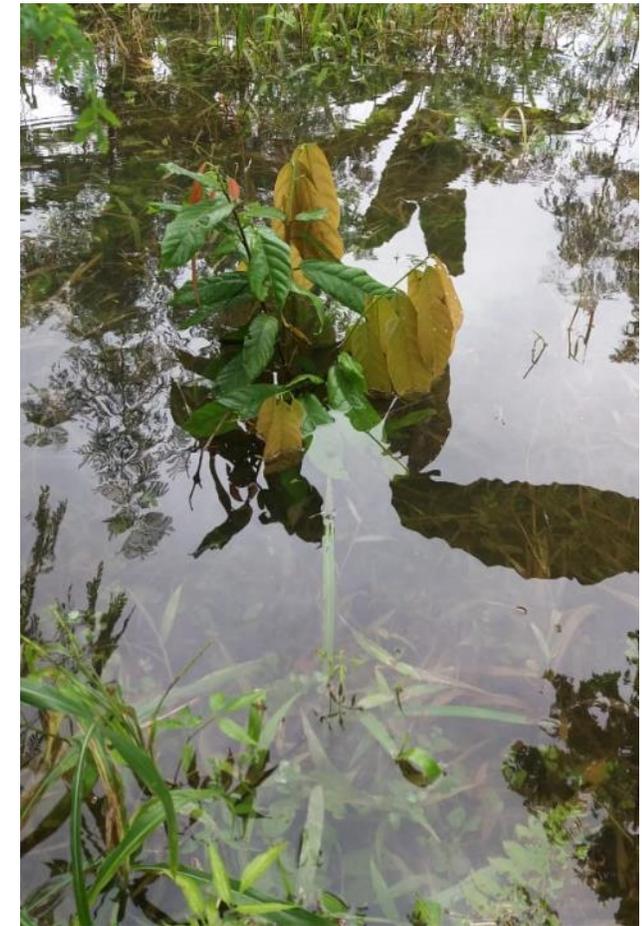
Sequía

- **La nutrición mineral, en particular en potasio, favorece la tolerancia a sequía**
- **La sombra reduce la conductancia estomática, lo que resulta en mayores actividades fotosintéticas y una mayor supervivencia**
- **El riego puede ser otra solución**



Inundación

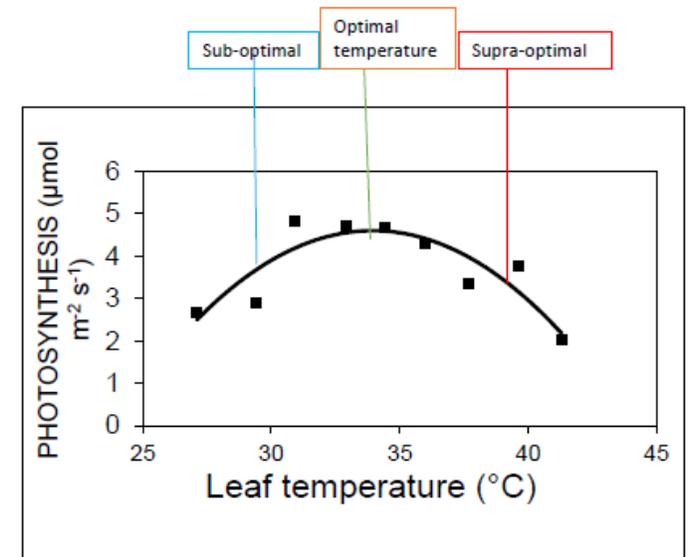
- **La producción de raíces adventicias es una respuesta adaptativa a las inundaciones**
- **Niveles más bajos de clorosis durante las inundaciones es un rasgo potencial para identificar genotipos de cacao tolerante a las inundaciones**



Temperaturas más altas

- Muchas diferencias entre genotipos en la respuesta al incremento de la temperatura
- Necesidad de más investigaciones para entender el efecto del estrés de temperatura sobre el comportamiento de los árboles de cacao

Temperature response curve of cocoa seedlings



Fuente: University of Reading

Radiación solar

- El germoplasma que puede utilizar niveles de luz bajos de manera más efectiva será esencial para lograr un alto rendimiento en condiciones de sombra, donde los árboles de sombra pueden usarse para mejorar el micro-ambiente
- Los genotipos de cacao con estructura más abierta y mayor penetración de la luz en las capas inferiores son más adecuados para el cultivo bajo sombra



Dióxido de carbono

- El aumento de CO_2 favorece la productividad
- El efecto sobre la calidad no está conocida todavía





Salinidad y viento

- **Salinidad: difícil de seleccionar plantas tolerante porque los mecanismos para la tolerancia a sal son muy complejos**
- **Viento fuerte: plantas bajas**
 - **Para vientos fuertes se debería establecer rompevientos**



2. Identificación de plantas tolerantes a sequías y temperaturas altas



Tolerancia contra déficit en agua

- **Eliminación rápida de las hojas debajo de las plantas en caso de sequía favoreciendo las hojas de la parte superior**
- **Enrollamiento de la hoja hacia el lado inferior para reducir la pérdida de agua por transpiración**
- **Plantas que reducen menos los contenidos en N, P y K en las hojas durante un periodo de estrés de agua son menos susceptibles sequía**



Tolerancia contra altas temperaturas

- **Las plantas mas vigorosas son casi siempre más tolerante a estrés de agua:**
 - ✓ **Número de hojas por planta,**
 - ✓ **Peso seco de raíces, de tallos, de hojas,**
 - ✓ **Concentraciones en Ca y Mg**
 - ✓ **Favorecer alto índice de cosecha: plantas cortas ayuda también contra viento fuerte**



3. Identificación de genotipos resistentes al cambio climático con nuevos indicadores (variables)

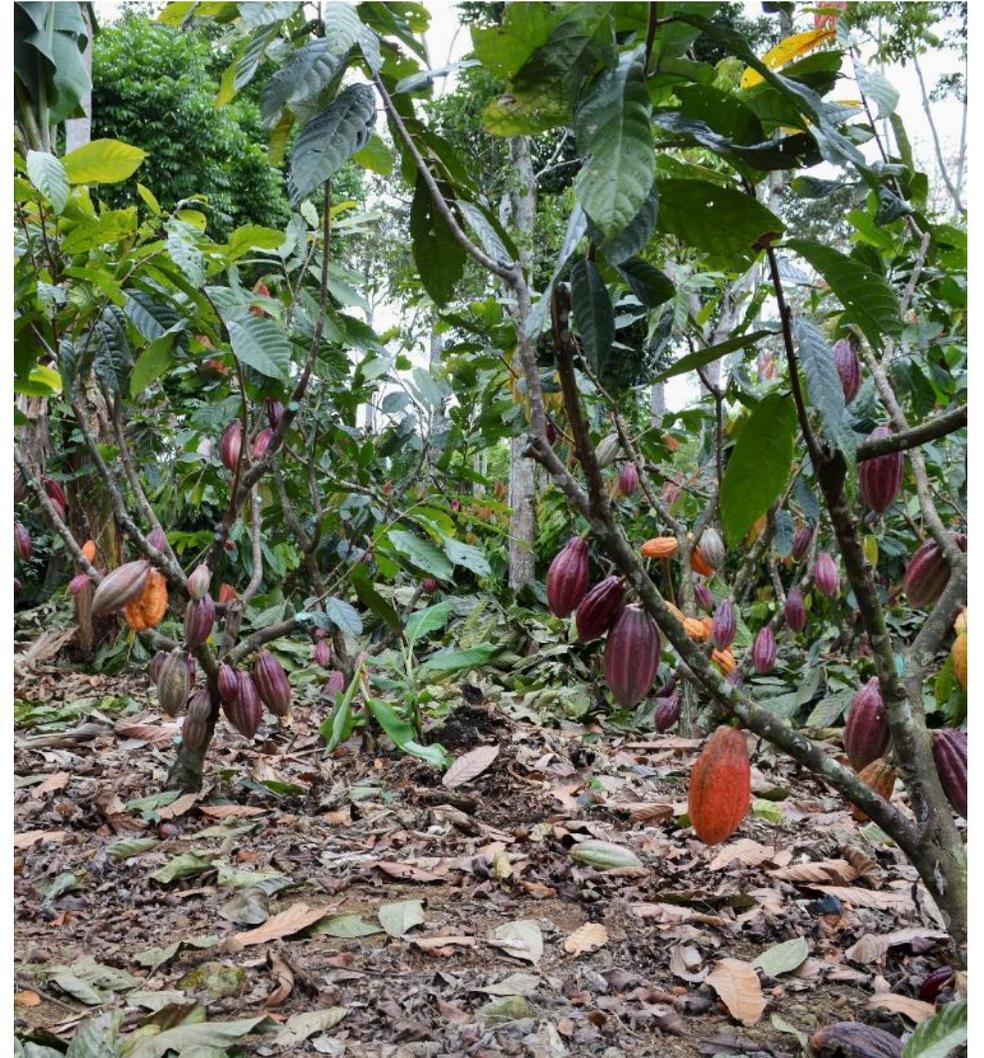
Indicadores tradicionales para la selección de los mejores árboles

- Productivo
- Tolerante a la monilia
- Poca escoba y fitóftora
- Índice de mazorca
- Índice de semilla
- Auto-Inter Compatibilidad
- Grosor de cáscara
- Meses de más producción
(variedades tempranas)



VARIABLES MÁS EFICIENTES

- Las variables de crecimiento y contenido de nutrientes en hojas son factores importantes para la identificación de genotipos tolerantes (Santos *et al.* 2014)





Variables

- 1. Biomasa seca de hojas**
- 2. Biomasa seca total**
- 3. Ritmo (velocidad) relativo de crecimiento**
- 4. Área foliar total por planta**
- 5. Contenido de Mg en las hojas**

Variables

- Los genotipos más tolerantes no presentan reducciones en hoja de los contenidos de N, P, K
- Cambios en concentraciones de P permiten aumentar la eficiencia del uso del agua y la conductancia de estomas
- Deficiencia de K disminuye el crecimiento y causa clorosis, necrosis y acortamiento de entrenudos

Variables

- **Genotipos tolerantes a sequía no muestran reducción de Ca y Mg en relación con el control**
- **Altos contenidos de Ca y Mg contribuyen con el incremento de la biomasa y área foliar, activación de kinasas, regulación osmótica y apertura y cierre de estomas**



Table 4. Macro and micronutrients leaf content evaluated in 36 cacao genotypes.

Genotype	Treatment	mg plant ⁻¹								
		N	P	K	Ca	Mg	Fe	Zn	Cu	Mn
AMZ 15.1	Control	884 ± 23**	71 ± 7	394 ± 23	871 ± 32**	397 ± 11**	8 ± 1	2.6 ± 0.2*	0.6 ± 0.0**	6.7 ± 0.9*
	Drought	685 ± 2	60 ± 4	387 ± 39	496 ± 15	249 ± 4	5 ± 2	1.7 ± 0.2	0.4 ± 0.0	2.6 ± 0.5
PA-13	Control	1006 ± 114	71 ± 8	357 ± 26	790 ± 35	308 ± 18	9 ± 1	3.2 ± 0.3	0.5 ± 0.0	6.1 ± 0.3
	Drought	739 ± 36	57 ± 7	292 ± 20	688 ± 48	305 ± 21	6 ± 2	3.6 ± 0.4	0.5 ± 0.0	7.0 ± 1.5
PA-150	Control	649 ± 7	54 ± 1	343 ± 16	680 ± 32	351 ± 6*	11 ± 1*	3.7 ± 0.3	0.5 ± 0.0*	6.3 ± 0.6*
	Drought	704 ± 89	59 ± 7	244 ± 33	546 ± 63	277 ± 16	4 ± 1	2.5 ± 0.4	0.3 ± 0.1	3.8 ± 0.3
PS-1319	Control	803 ± 83	59 ± 3*	399 ± 13**	599 ± 7**	284 ± 4	10 ± 1	2.5 ± 0.0	0.5 ± 0.1	6.3 ± 1.5*
	Drought	585 ± 28	49 ± 1	293 ± 17	518 ± 3	254 ± 11	7 ± 2	2.3 ± 0.1	0.3 ± 0.0	3.5 ± 0.3
RB-39	Control	835 ± 37	55 ± 10	352 ± 27	958 ± 59*	370 ± 23	7 ± 1	3.1 ± 0.1	0.9 ± 0.1*	4.9 ± 0.4
	Drought	826 ± 90	73 ± 8	281 ± 29	714 ± 41	376 ± 3	6 ± 2	3.3 ± 0.2	0.3 ± 0.0	3.9 ± 0.0
RB-48	Control	850 ± 52	70 ± 5	378 ± 15	965 ± 5**	440 ± 11	15 ± 0**	4.2 ± 0.9*	0.7 ± 0.1*	6.7 ± 1.0*
	Drought	737 ± 47	66 ± 9	369 ± 56	633 ± 56	315 ± 36	7 ± 2	2.3 ± 0.2	0.3 ± 0.1	3.3 ± 0.2
RIM-6	Control	826 ± 47	67 ± 1*	429 ± 52	751 ± 11**	340 ± 27	7 ± 2	4.1 ± 0.0	0.7 ± 0.0**	5.7 ± 0.5**
	Drought	745 ± 54	51 ± 4	365 ± 37	537 ± 10	382 ± 22	4 ± 1	3.3 ± 0.5	0.1 ± 0.0	3.1 ± 0.1
SCA-6	Control	941 ± 13**	56 ± 7	365 ± 24	900 ± 26**	384 ± 7**	10 ± 1**	3.2 ± 0.2	0.6 ± 0.0**	5.3 ± 0.1**
	Drought	640 ± 35	50 ± 2	260 ± 14	523 ± 28	275 ± 19	3 ± 1	2.5 ± 0.1	0.2 ± 0.0	3.3 ± 0.1
SIAL-169	Control	755 ± 38	53 ± 4	273 ± 17	638 ± 14	340 ± 32	6 ± 1	3.3 ± 0.7	0.4 ± 0.0	5.2 ± 1.1
	Drought	606 ± 79	53 ± 2	266 ± 30	589 ± 63	297 ± 20	5 ± 1	2.6 ± 0.0	0.4 ± 0.0	4.3 ± 0.4

Referencias

- Baligar *et al.* (2017). *Impact of drought on morphological, physiological and nutrient use of efficiency of elite cacao genotypes from Bahia-Brasil, Tarapoto-Peru and Puerto Rico-USA*. International Symposium on Cocoa Research, Lima, Peru, 13-17 November 2017.
- Lahive *et al.* (2019). *The physiological responses of cacao to the environment and the implications for climate change resilience. A review*. Agronomy for Sustainable Development. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0552-0>
- Medina, V; Laliberté, B. (2017). *A review of research on the effects of drought and temperature stress and increased CO₂ on Theobroma cacao L., and the role of genetic diversity to address climate change*. Costa Rica: Bioversity International.
- Santos *et al.* (2014). *Molecular, Physiological and Biochemical Responses of Theobroma cacao L. Genotypes to Soil Water Deficit*. PLoS ONE 9(12): e115746. doi:10.1371/journal.pone.0115746

**Muchas gracias por su
atención**