

# Respuesta ecofisiológica de *Caesalpinia spinosa* (Mol.) Kuntze a condicionantes abióticos, bióticos y de manejo, como referente para la restauración y conservación del bosque de nieblas de Atiquipa (Perú)

Irene Cordero<sup>1,2,\*</sup>

(1) Instituto de Ciencias Agrarias (ICA), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Serrano 115-bis, 28006 Madrid, España.

(2) Departamento de Biología Vegetal I, Universidad Complutense de Madrid, José Antonio Nováis 12, 28040 Madrid, España.

\* Autor de correspondencia: I. Cordero [cordero.irene@ica.csic.es]

> Recibido el 10 de junio de 2016 - Aceptado el 20 de septiembre de 2016

Cordero, I. 2016. Respuesta ecofisiológica de *Caesalpinia spinosa* (Mol.) Kuntze a condicionantes abióticos, bióticos y de manejo, como referente para la restauración y conservación del bosque de nieblas de Atiquipa (Perú). *Ecosistemas* 25(3):128-133. Doi.: 10.7818/ECOS.2016.25-3.16

Las lomas de Atiquipa se localizan en el desierto Costero Peruano, uno de los más áridos del mundo, y representan el mayor y mejor conservado oasis de nieblas de la costa Pacífica. La vegetación leñosa de las lomas intercepta la niebla proveniente del océano aumentando la disponibilidad hídrica del ecosistema, lo que permite la existencia de estos parches de vegetación en el desierto (Fig. 1). Predomina la tara (*Caesalpinia spinosa* (Mol.) Kuntze), leguminosa arbórea neotropical de gran valor tanto ecológico, por ser la principal captadora de nieblas del sistema, como económico por sus múltiples usos relacionados con su alto contenido en taninos y gomas. La sobreexplotación de recursos ha provocado la deforestación de gran parte del bosque, amenazando a este frágil ecosistema y dejando a la población en situación muy precaria (Canziani Amico 2002). Actualmente, la regeneración natural del bosque de lomas y de la tara es muy limitada y se requiere la restitución de procesos ecológicos que faciliten su recuperación.

El objetivo general de esta tesis es valorar la respuesta ecofisiológica de la tara a condicionantes abióticos, bióticos y de manejo que pueden beneficiar o limitar su supervivencia y desarrollo y, por tanto, afectar a la capacidad de regeneración natural de estos bosques. En último término, se pretende establecer criterios de referencia que ayuden en la toma de decisiones para la conservación y la restauración ecológica de las zonas degradadas del bosque de las lomas de Atiquipa y otros bosques de tara.

## Condicionantes de uso y gestión – Estructura del bosque

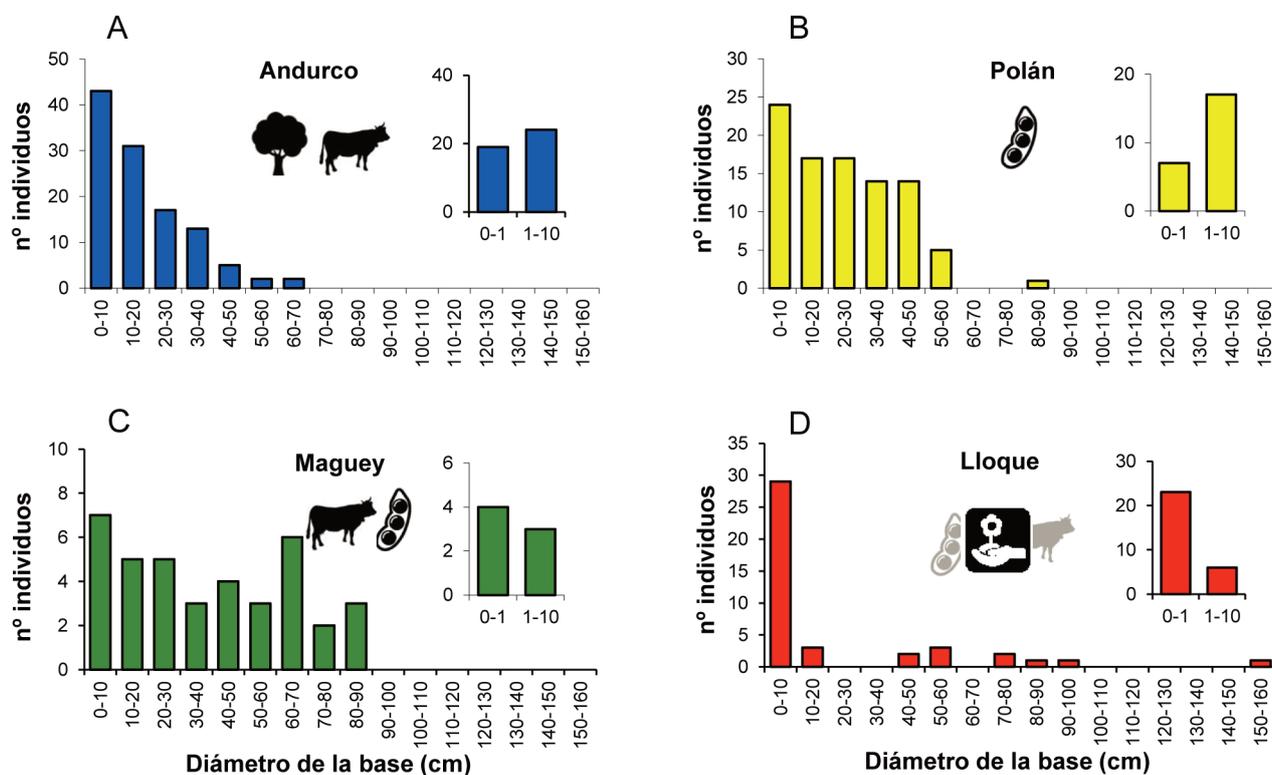
El estudio de patrones espaciales y estructura poblacional de los bosques ayuda a comprender su dinámica y evaluar los efectos



Figura 1. Banco de nieblas en el bosque de las lomas de Atiquipa. Fotografía: MD Jiménez.

Figure 1. Fog bank in the Atiquipa forest. Photograph: MD Jiménez.

del manejo (Wiegand y Moloney 2004; Feeley et al. 2007). Con ese fin, se estudió la estructura del bosque, la distribución espacial y los patrones de interacción planta-planta en cuatro bosques de tara en un gradiente latitudinal y de diferente gestión (Fig. 2). Sólo la población de Andurco presentó una estructura diamétrica en J invertida, típica de bosques estables, mientras que el resto mostró problemas de regeneración pasados (Lloque) y presentes (Polán, Maguey) (Fig. 2). La distribución espacial fue al azar, frecuente en especies tropicales dispersadas mediante zoocoria. La población



**Figura 2.** Distribución diamétrica de los individuos de tara (*Caesalpinia spinosa*) en los cuatro bosques analizados. Inserto: frecuencia de individuos en la clase diamétrica más pequeña divididos en plántulas  $\leq 1$  cm y juveniles 1-10 cm. En cada bosque se indica el tipo de gestión. A. Andurco (Piura): silvicultura y pastoreo. B. Polán (Cajamarca): recogida de semillas. C. Maguey (Lomas de Atiquipa, Arequipa): pastoreo y recogida de semillas. D. Lloque (Lomas de Atiquipa, Arequipa): en el pasado recogida de semillas y pastoreo intensivo; actualidad: zona protegida.

**Figure 2.** Diametric distribution of tara (*Caesalpinia spinosa*) individuals in the four forest analysed. Insert: frequency of individuals in the smallest diametric class divided into seedlings  $\leq 1$  cm and juveniles 1-10 cm. In each forest it is indicated the management regime. A. Andurco (Piura): forestry and grazing. B. Polán (Cajamarca): seed collection. C. Maguey (Lomas de Atiquipa, Arequipa): grazing and seed collection. D. Lloque (Lomas de Atiquipa, Arequipa): in the past: intensive grazing and seed collection; at present: protected area.

de Maguey fue la excepción, con un patrón regular para distancias cortas posiblemente asociado a manejo pasado (como talas selectivas y/o plantaciones). El estudio de interacción planta-planta demostró que las plántulas de tara se asociaban a la vegetación leñosa circundante, sugiriendo un posible efecto de facilitación que podría atenuar las condiciones microclimáticas estresantes y/o proteger a plántulas y juveniles frente a herbívoros. Se propone que una gestión controlada de los recursos, limitando la carga ganadera y de la recolección de semillas, preservando la vegetación existente, pueden ser estrategias eficaces para asegurar la regeneración y viabilidad de los bosques remanentes.

### Condicionantes abióticos – Respuesta a estrés lumínico y sequía

El estudio de los diferentes condicionantes ambientales a los que se enfrentan las plantas puede ayudar a comprender su distribución y abundancia, así como sus respuestas frente a un mundo cambiante (Valladares et al. 2014). El ambiente de las lomas de Atiquipa está fuertemente condicionado por la elevada estacionalidad de su único recurso hídrico: las nieblas. Se estudió la respuesta fisiológica de la tara frente al ambiente en condiciones de campo (Atiquipa) y en condiciones controladas de invernadero, donde se evaluó el efecto la inmovilización de folíolos y de un ciclo de sequía-rehidratación-sequía sobre distintas procedencias de tara.

La deforestación de las lomas de Atiquipa determinó los principales condicionantes abióticos de esta zona, cuyos suelos presentaron menor humedad, materia orgánica y contenido en nutrientes que la zona conservada del bosque. La época sin nieblas impuso

un doble estrés (hídrico y lumínico) frente al cual las taras presentaron una estrategia marcada por el cierre estomático, el plegamiento de folíolos y un bajo ratio de clorofilas Ch1a/Ch1b. La tolerancia de tara a sequía observada en campo se confirmó en invernadero, donde las plantas mostraron gran caída del potencial hídrico, cierre paulatino de estomas y rápida recuperación tras rehidratación (Fig. 3). Esta respuesta dependió de la procedencia, siendo la más xérica (Atiquipa) la más tolerante. En sequía, el cierre de folíolos (protección estructural) redujo el fotodaño (Fig. 3C), mientras que en los folíolos inmovilizados aumentó la fotoprotección química (mayores AZ/VAZ, Neo+Lut/ $\beta$ -Car y retención nocturna de zeaxantina), aunque el cierre estomático y el cese de actividad fotosintética fue igual en ambos casos. Además, la tara mostró una estrategia conservadora de los recursos (cierre estomático más rápido) durante un episodio de sequía recurrente lo que sugiere cierta “memoria de sequía”. Se concluye que la tara posee diferentes estrategias para enfrentarse a la sequía, entre las que destaca el cierre de folíolos, mediante el que obtiene un claro beneficio de fotoprotección sin costes de asimilación de carbono.

### Condicionantes bióticos – Interacciones con los microorganismos del suelo

Las interacciones de las plantas con los microorganismos del suelo suponen un gran condicionante para su crecimiento. Las bacterias beneficiosas, ya sean rizobios simbióticos con leguminosas (Coba de la Peña y Pueyo 2012) o de vida libre promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) (Rincón et al. 2008) pueden potenciar el crecimiento de las plantas y aliviar diversos estreses ambientales, por lo que son herramientas muy útiles para la restauración. La

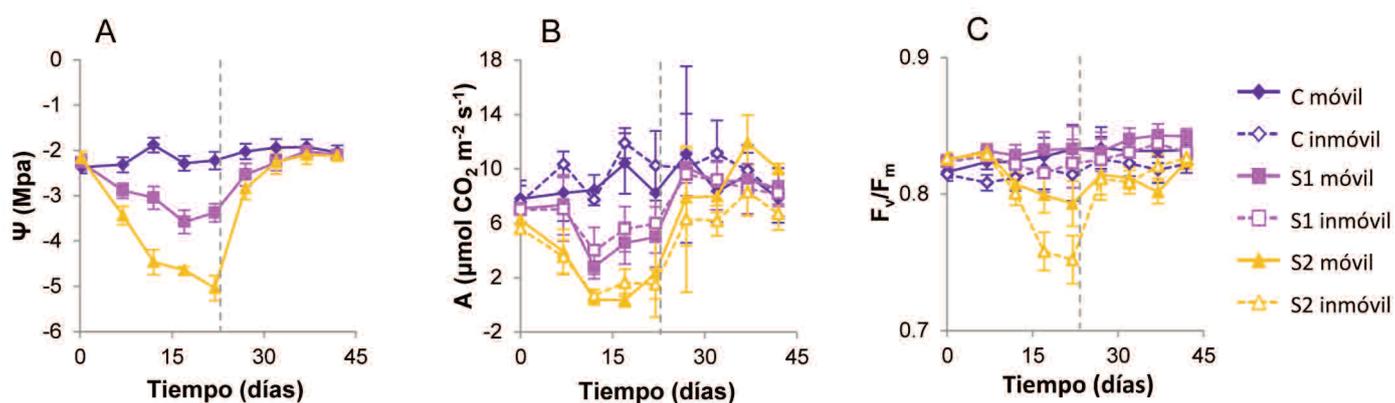
**Figura 4** esquematiza el proceso de selección de inoculantes para su uso en restauración ecológica, cuyas etapas, exceptuando las pruebas en condiciones de campo, se llevaron a cabo en esta tesis para los dos tipos principales de bacterias beneficiosas: rizobios y PGPR.

Se observó una alta diversidad de rizobios en suelos de bosques de tara, asociados a *Vachellia* (=Acacia) *macracantha* (leguminosa noduladora) acompañante de la tara (no noduladora). La inoculación con los rizobios *Ensifer americanum* CHU1, *Ensifer* sp. CHU2 y *Ensifer* sp. ATQ1 mejoró el crecimiento y la fisiología de acacia y la eficiencia fotoquímica de tara, por lo que estas cepas se perfilan como buenas candidatas para su uso como inoculantes. Se concluye que la co-reforestación de tara con *V. macracantha* podría ser una estrategia sinérgica (carácter facilitador de acacia) a tener en cuenta en proyectos de restauración del bosque de Atiquipa.

Por otro lado, el análisis de las comunidades microbianas asociadas a la rizosfera de tara en Atiquipa reveló diferencias destacables en la zona deforestada en comparación con la conservada (menor biomasa microbiana total, hongos, bacterias, ratios Gram<sup>+</sup>/Gram<sup>-</sup> y bacterias/hongos y estructura de comunidad diferente), a la vez que se observó que las comunidades edáficas no se recuperaban tras la reforestación. Los árboles adultos de las zonas deforestada y conservada presentaron una comunidad mi-

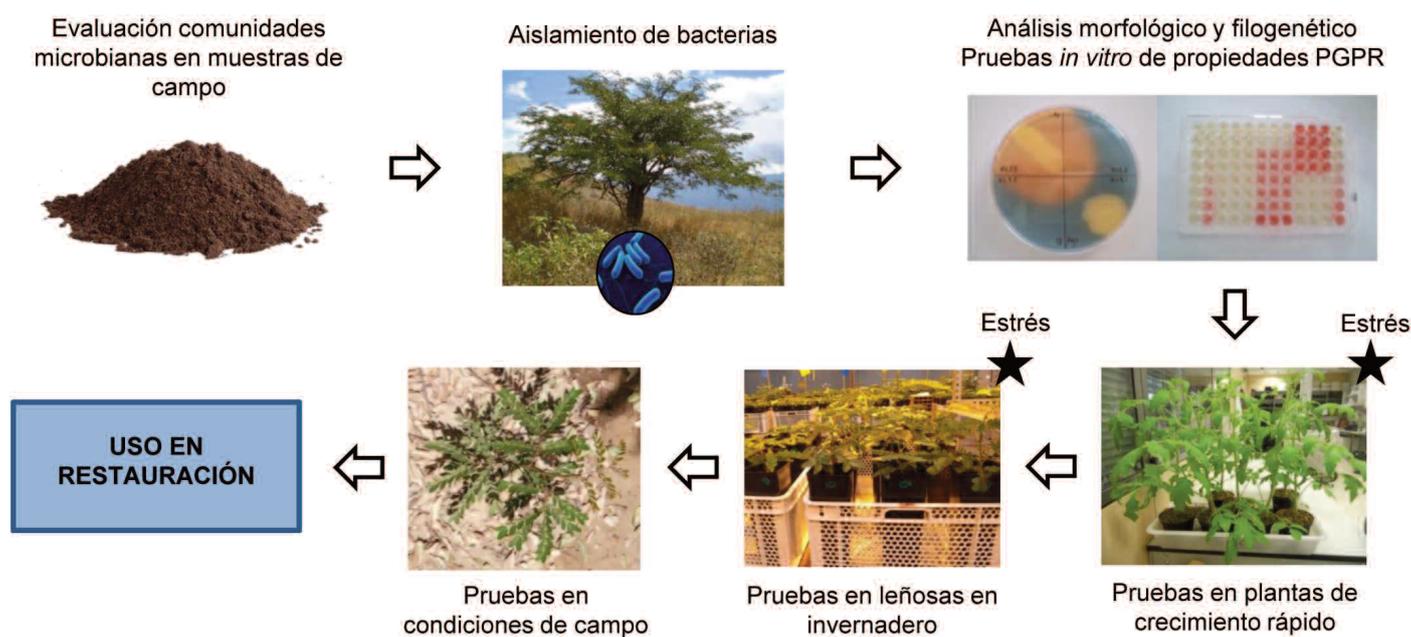
crobiana similar pudiendo actuar como posibles fuentes de inoculo. Se generó una colección de 203 aislados bacterianos pertenecientes a los phyla Actinobacteria, Proteobacteria y Firmicutes, con diferentes capacidades PGPR: producción de indoles (93% de los aislados), sideróforos (46%), y solubilización de fosfatos (32%). Además, el 38% tenía dos cualidades PGPR y el 17% las tres. Estos resultados han permitido la pre-selección de cepas como posibles inoculantes.

En comparación con la fertilización química, la biofertilización por inoculación con bacterias seleccionadas mejoró el desarrollo de plantas de interés agronómico (tomate y remolacha) reduciendo los efectos negativos causados por el estrés salino (reducción del crecimiento, pérdida de agua, agotamiento de K<sup>+</sup>) (**Fig. 5A-C**). La fertilización biológica no afectó a la morfología de tara, pero algunas cepas sí mejoraron su estado fisiológico y su tolerancia a la sequía (mayor contenido hídrico, tasa fotosintética, eficiencia en el uso del agua y reducción del fotodaño en sequía) en comparación con plantas no fertilizadas y fertilizadas químicamente (**Fig. 5D-E**). Estos resultados subrayan el beneficio del uso de biofertilizantes como herramienta de manejo sostenible frente a los fertilizantes químicos para la producción de plantas de interés agronómico y forestal. La cepa RC5.5 (*Pseudomonas* sp.) se propone como buen candidato para su uso como inoculante de plántulas de tara destinadas a la reforestación de las lomas de Atiquipa.



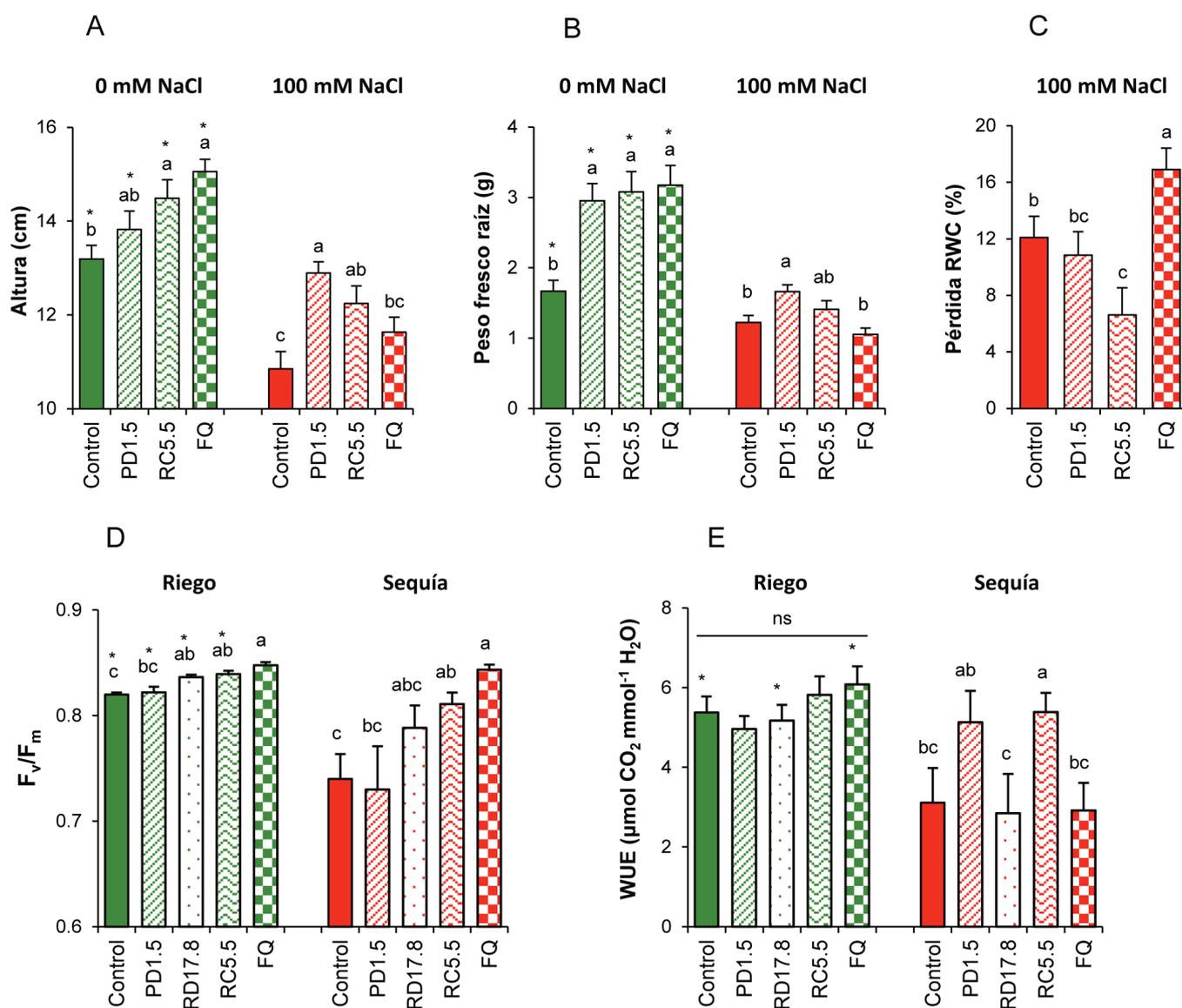
**Figura 3.** Efectos de la sequía y la inmovilización de folíolos sobre la fisiología de plantas de tara (*Caesalpinia spinosa*) procedentes de Atiquipa. La línea vertical discontinua indica el final del periodo de sequía y el inicio de la rehidratación. Morado: control de riego C; rosa: sequía moderada S1; amarillo: sequía severa S2. Símbolos rellenos y líneas continuas: folíolos móviles; símbolos vacíos y líneas discontinuas: folíolos inmóviles. A. Potencial hídrico ( $\Psi$ ) a mediodía. B. Asimilación neta de carbono ( $A$ ). C. Eficiencia fotoquímica máxima del fotosistema II ( $F_v/F_m$ ). Valores = media  $\pm$  error estándar.  $n=8$  (A,C);  $n=4$  (B).

**Figure 3.** Effects of drought and leaflet immobilization on the physiology of tara (*Caesalpinia spinosa*) plants from Atiquipa. Dashed vertical line indicates the end of the drought and the start of the rewetting. Purple: control C; pink: moderate drought S1; yellow: severe drought S2. Filled symbols and continuous lines: mobile leaflets; open symbols and dashed lines: static leaflets. A. Midday water potential ( $\Psi$ ) B. Net carbon assimilation ( $A$ ). C. Maximum quantum yield of photosystem II ( $F_v/F_m$ ). Values = mean  $\pm$  standard error.  $n=8$  (A,C);  $n=4$  (B).



**Figura 4.** Esquema resumen del proceso de selección de inoculantes para su uso en restauración ecológica. Inicialmente se evalúa el estado de conservación de las comunidades microbianas en muestras de campo. Posteriormente se aíslan las bacterias de la rizosfera y se analizan sus características morfológicas y filogenéticas. Se realizan pruebas *in vitro* de diferentes propiedades promotoras del crecimiento vegetal o PGPR (producción de indoles, sideróforos y solubilización de fosfatos) para realizar una primera selección. El efecto de las bacterias seleccionadas se evalúa primeramente en plantas de crecimiento rápido, permitiendo analizar un número elevado de cepas a la vez; si además estas plantas son de interés agronómico, los resultados podrán tener aplicación directa en agricultura ecológica. Las cepas con mejores efectos se prueban en plantas leñosas en condiciones de invernadero. En ambos casos se puede combinar con una prueba de respuesta a un estrés ambiental. Finalmente las cepas seleccionadas se prueban en condiciones de campo para su uso final en proyectos de restauración.

**Figure 4.** Schematic summary of the inoculant selection process to be used in ecological restoration. Firstly, the conservation state of the soil microbial communities in the field is evaluated. Afterwards, rhizospheric bacteria are isolated and their morphological and phylogenetic characteristics are analysed. *In vitro* tests for the different plant growth promotion (PGPR) capacities are carried out (indole and siderophores production and phosphate solubilization), in order to make a first selection. The effect of the selected bacteria is firstly evaluated in fast growing plants, allowing the measurement of many strains at the same time. Additionally if the tested plant has an agronomic interest, the results obtained have a direct application on organic agriculture. The best performing strains are then tested in woody plants under greenhouse conditions. In both cases, an environmental stress can be included in the experiments. Finally, the selected strains are tested in the field for their final use in restoration projects.



**Figura 5.** Efectos de la fertilización biológica con PGPR o química (FQ) y el estrés por salinidad o sequía sobre (A-C) las variables morfológicas y estado hídrico de plantas de tomate y (D-E) la capacidad fotosintética de las plantas de tara (*Caesalpinia spinosa*). A. Altura. B. Peso fresco de raíz. C. Pérdida de contenido relativo de agua (RWC) en hojas. D. Eficiencia fotosintética máxima ( $F_v/F_m$ ). E. Eficiencia en el uso del agua (WUE). Para cada tratamiento de estrés, letras diferentes muestran diferencias significativas entre tratamientos de fertilización según el test de Tukey ( $p < 0.05$ ). Para cada tratamiento de fertilización, los asteriscos indican diferencias significativas del factor estrés. ns: no significativo. Valores = media  $\pm$  error estándar.  $n=15$  (A-C);  $n=10-12$  (D-E).

**Figure 5.** Effects of biological fertilization with PGPR or chemical fertilization (FQ) and the salt or drought stress on (A-C) the morphological variables and water status of tomato plants and (D-E) the photosynthetic capacity of tara (*Caesalpinia spinosa*). A. Height. B. Root fresh weight. C. Relative water content (RWC) loss in leaves. D. Maximum quantum yield ( $F_v/F_m$ ). E. Water use efficiency (WUE). For each stress treatment, different letters denote significant differences among fertilization treatments following Tukey test ( $p < 0.05$ ). For each fertilization treatment, asterisks indicate significant differences of the stress factor. ns: not significant. Values = mean  $\pm$  standard error.  $n=15$  (A-C);  $n=10-12$  (D-E).

## Referencias

- Canziani Amico, J. 2002. Las Lomas de Atiquipa: un caso de paisaje cultural en la costa desértica del sur del Perú. En: Mujica, E. (ed.), *Paisajes culturales en los Andes*, pp. 169–190. UNESCO, Lima, Perú.
- Coba de la Peña, T., Pueyo, J.J. 2012. Legumes in the reclamation of marginal soils, from cultivar and inoculant selection to transgenic approaches. *Agronomy for Sustainable Development* 32: 65–91.
- Feeley, K.J., Davies, S.J., Noor, M.N.S., Kassim, A.R., Tan, S. 2007. Do current stem size distributions predict future population changes? An empirical test of intraspecific patterns in tropical trees at two spatial scales. *Journal of Tropical Ecology* 23: 191–198.
- Rincón, A., Valladares, F., Gimeno, T.E., Pueyo, J.J. 2008. Water stress responses of two Mediterranean tree species influenced by native soil microorganisms and inoculation with a plant growth promoting rhizobacterium. *Tree Physiology* 28: 1693–1701.
- Valladares, F., Matesanz, S., Guilhaumon, F., Araujo, M.B., Balaguer, L., Benito-Garzon, M., Cornwell, W. et al. 2014. The effects of phenotypic plasticity and local adaptation on forecasts of species range shifts under climate change. *Ecology Letters* 17: 1351–1364.
- Wiegand, T., Moloney, K.A. 2004. Rings, circles, and null-models for point pattern analysis in ecology. *Oikos* 104: 209–229.

### IRENE CORDERO HERRERA

***Ecophysiological response of Caesalpinia spinosa (Mol.) Kuntze to abiotic, biotic and management determinants, as a referent for restoration and conservation of the fog forest of Atiquipa (Peru). Respuesta ecofisiológica de Caesalpinia spinosa (Mol.) Kuntze a condicionantes abióticos, bióticos y de manejo, como referente para la restauración y conservación del bosque de nieblas de Atiquipa (Perú)***

Tesis Doctoral

Departamento de Ecología, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Complutense de Madrid

Julio 2015

Directores: José Javier Pueyo Dabad, Ana María Rincón Herranz y Luis Balaguer Núñez

#### Publicaciones resultantes de la tesis

- Balaguer, L., Arroyo-García, R., Jiménez, P., Jiménez, M.D., Villegas, L., Cordero, I., Rubio de Casas, R. et al. 2011. Forest restoration in a fog oasis: evidence indicates need for cultural awareness in constructing the reference. *PloS One* 6: e23004.
- Cordero I., Rincón A., Ruiz-Díez B., López M., Balaguer L., Pueyo J.J. 2012. Effects of inoculation with plant growth-promoting rhizobacteria on salt stress alleviation in tomato. En: Bonilla Mangas I, Hernández LE, Lucena Marotta JJ (eds.) *Nutrición mineral de las plantas como base de una agricultura sostenible*, pp. 390-396. Edición Digital. Cantoblanco, Madrid, España.
- Cordero, I., Ruiz-Díez, B., Coba de la Peña, T., Balaguer, L., Lucas, M.M., Rincón, A., Pueyo, J.J. 2016. Rhizobial diversity, symbiotic effectiveness and structure of nodules of *Vachellia macracantha*. *Soil Biology and Biochemistry* 96: 39–54.
- Cordero, I., Jiménez, M.D., Delgado, J.A., Villegas, L., Balaguer, L. 2016. Spatial and demographic structure of tara stands (*Caesalpinia spinosa*) along a latitudinal gradient in Peru: influence of present and past forest management. *Forest Ecology and Management* 377: 71-82.