



Lourdes Luna Ramos

RESTAURACIÓN DE CANTERAS DE ROCA CALCÁREA EN CLIMA SEMIÁRIDO

# RESTAURACIÓN DE CANTERAS DE ROCA CALCÁREA EN CLIMA SEMIÁRIDO

Lourdes Luna Ramos

Tesis doctoral

Universidad de Almería

2016



UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

Departamento de Agronomía



Departamento de  
Desertificación y Geocología

2016



Diseño de la portada: Almudena Delgado Palominos/Alfonso Nombela



UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

Departamento de Agronomía (Edafología y Química Agrícola)  
Programa de doctorado: Ciencias Aplicadas y Medioambientales

**TESIS DOCTORAL**

**RESTAURACIÓN DE CANTERAS DE ROCA  
CALCÁREA EN CLIMA SEMIÁRIDO**

**RESTORATION OF CALCAREOUS QUARRIES  
UNDER SEMIARID CLIMATE**

Lourdes Luna Ramos

Estación Experimental de Zonas Áridas

Consejo Superior de Investigaciones Científicas

**2016**





UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

Departamento de Agronomía (Edafología y Química Agrícola)  
Programa de doctorado: Ciencias Aplicadas y Medioambientales

**Tesis Doctoral**

**RESTAURACIÓN DE CANTERAS DE ROCA  
CALCÁREA EN CLIMA SEMIÁRIDO**

Memoria presentada por Lourdes Luna Ramos para optar al Grado de Doctora por la Universidad de Almería, dirigida por el Dr. Albert Solé Benet, Científico Titular de la Estación Experimental de Zonas Áridas, y la Dra. Isabel Miralles Mellado, Postdoctoral Marie Curie en la UCL de Louvain la Neuve (Bélgica).

Vº Bº Director Tesis

Vº Bº Directora Tesis

Fdo.: Albert Solé Benet

Fdo.: Isabel Miralles Mellado

Doctoranda

Fdo: Lourdes Luna Ramos

**Junio 2016**

Este trabajo ha sido posible gracias a la concesión de una beca predoctoral asociada al Proyecto de Excelencia de la Junta de Andalucía “Restauración experimental y control de la erosión en canteras de roca caliza en clima árido” (RNM-5887, años 2011-2016). La tesis ha sido desarrollada en la Estación Experimental de Zonas Áridas de Almería, del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEZA-CSIC). Agradecemos a la Fábrica de Cemento de Gádor todo el soporte logístico y la financiación recibida en el marco de los contratos: a) “Plan de restauración ecológica e integración paisajística de las canteras de roca calcárea de la Sierra de Gádor. Fase experimental (año 2008)” y b) “Aplicación de residuos en restauración de suelo en ambiente semiárido y uso en agricultura” (años 2012-2016), éste último cofinanciado por la Agencia IDEA y la Corporación Tecnológica de Andalucía. Se agradece a la *COST ACTION 1104 Arid Lands Restoration and Combat of Desertification* (Unión Europea) por financiar el viaje y una estancia de tres meses en el *Centro di Ricerca per l'agrobiologia e la pedologia - Sede (ABP)* de Florencia. Finalmente, agradecemos a los organismos o empresas que proporcionaron sus productos para llevar a cabo los tratamientos de la restauración experimental: la Planta de Recuperación y Compostaje de residuos sólidos urbanos de Gádor suministró el compost, la Estación Depuradora de Aguas Residuales El Bobar proporcionó el lodo, el Vivero de Rodalquilar (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, Junta de Andalucía) suministró las plantas para la revegetación.



# ÍNDICE

<b>RESUMEN.....</b>	<b>1</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>5</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>9</b>
<b>JUSTIFICACIÓN E HIPÓTESIS .....</b>	<b>17</b>
<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>19</b>
<b>METODOLOGÍA GENERAL .....</b>	<b>21</b>
ÁREA DE ESTUDIO .....	21
RESTAURACIÓN EXPERIMENTAL .....	24
<b>CAPÍTULOS .....</b>	<b>33</b>
CAPÍTULO I: Restoration techniques affect soil organic carbon, glomalin and aggregate stability in degraded soils of a semiarid Mediterranean region .....	37
CAPÍTULO II: Soil porosity and infiltration after six years of experiemntal restoration in calcareous quarries under semiarid conditions .....	71
CAPÍTULO III: The combination of quarry restoration strategiesin semiarid climate induces different responses in biochemical and microbiological soil properties.....	101
CAPÍTULO IV: Effect of organic amendments and mulches on plant survival and growth in calcareous quarry restoration from semiarid regions .....	153
<b>DISCUSIÓN GENERAL.....</b>	<b>183</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>199</b>
<b>CONCLUSIONS .....</b>	<b>203</b>



<b>SÍNTESIS Y RECOMENDACIONES PRÁCTICAS .....</b>	<b>205</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>209</b>
<b>Otras aportaciones científicas derivadas de la Tesis Doctoral .....</b>	<b>221</b>

## RESUMEN

En la cantera de roca calcárea de la Fábrica de Cemento de Gádor (Almería, SE de España), enclavada en el límite climático entre el árido y el semiárido, el Grupo Desertificación y GeoEcología (Estación Experimental de Zonas Áridas, CSIC) inició en 2008 una restauración experimental del suelo. Se estableció un diseño experimental 3 x 3 donde se evaluaron dos tipos de enmiendas orgánicas (lodo procedente de Estación Depuradora de Aguas Residuales Urbanas y compost procedente de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos) y dos tipos de acolchados (grava y astilla de madera), con sus correspondientes controles (sin enmienda y sin acolchado). Cinco y seis años más tarde, se evaluaron las propiedades del suelo/substrato y su comportamiento hidrológico, así como sus efectos sobre la revegetación con especies nativas.

El estudio del suelo/substrato consistió en evaluar: a) las principales propiedades morfológicas incluyendo la porosidad 2D, físicas (textura, densidad aparente), químicas (pH, conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico,  $\text{CaCO}_3$ , C orgánico total, N, P y K total), bioquímicas (respiración basal, actividades enzimáticas como la deshidrogenasa,  $\beta$ -glucosidasa, ureasa y fosfatasa alcalina) y biológicas (composición y estructura de la comunidad microbiana a través del análisis de PLFAs y PCR-DGGE); b) la estabilidad de agregados mediante dos métodos directos (el test de la gota y el tamizado en húmedo) y el contenido en glomalina (glomalina total y glomalina fácilmente extraíble); c) el comportamiento hidrológico (tasa de infiltración, frente de humectación, escorrentía y producción de sedimentos) mediante simulaciones de lluvia. El suelo natural no alterado del área cercana a la cantera fue analizado y considerado como referencia, además de evaluar también su comportamiento hidrológico. Se realizó un seguimiento de la supervivencia y el crecimiento de la vegetación para estudiar el efecto de los tratamientos del suelo sobre las tres especies nativas (*Macrochloa*

*tenacissima*, *Anthyllis cytisoides* y *A. terniflora*) que se plantaron en las parcelas experimentales de 75 m<sup>2</sup> (15 x 5 m).

La combinación de enmiendas orgánicas y acolchados mejoró la estabilidad de los agregados del suelo y el contenido de agentes cementantes como el C orgánico total y la glomalina. Pero el papel de las enmiendas orgánicas, especialmente el compost, fue más importante que los acolchados en el aumento de C orgánico total y glomalina, mostrando los valores más similares a los suelos naturales de referencia. A pesar del considerable aumento del número de agregados estables al agua que se observó en las parcelas enmendadas con lodo, los suelos de referencia exhibieron los valores más elevados.

Los tratamientos de restauración provocaron una mayor porosidad 2D comparados con los suelos naturales no alterados. Cada combinación de enmiendas orgánicas y acolchados generó un sistema de poros diferente con respuestas hidrológicas diversas. El aporte de materia orgánica mejoró la infiltración y redujo la erosión hídrica. Por otro lado, el acolchado de astilla fue más efectivo reduciendo la escorrentía y la erosión, en cambio, no favoreció la percolación del agua hacia horizontes más profundos. Por lo tanto, el uso de enmiendas orgánicas debería fomentarse en restauración de suelos mineros debido a los beneficios observados: mejoran la estructura del suelo, incrementan la infiltración y reducen las pérdidas del suelo. Por el contrario, los acolchados no favorecieron la conservación de agua en el suelo.

Las enmiendas orgánicas, especialmente el compost, también mejoraron las propiedades químicas y bioquímicas, así como la biomasa microbiana. Los suelos tratados con lodo y compost mostraron concentraciones de PLFAs bacterianos similares a los suelos de referencia, en cambio, las concentraciones de PLFAs fúngicos fueron mucho mayores en los tratamientos de compost. Por otra parte, los efectos procedentes de la aplicación de acolchados no mostraron una tendencia clara con respecto a la

funcionalidad del suelo y tampoco incrementaron la biomasa microbiana. Cada combinación de enmienda orgánica y acolchado mostró una determinada comunidad microbiana. No obstante, incrementos en la funcionalidad del suelo y en la biomasa microbiana no estuvieron relacionados con cambios en la diversidad microbiana. Después de cinco años, las propiedades microbianas de los suelos restaurados no han convergido con las de los suelos de referencia. Sin embargo, los tratamientos con aporte de materia orgánica exógena, sobre todo compost, estimulan el crecimiento microbiano y su actividad, además de tener implicaciones positivas tanto en la fertilidad como en la calidad del suelo.

La respuesta de cada especie de plantas nativas fue diferente debido a sus propios mecanismos fisiológicos. *M. tenacissima* mostró la supervivencia más elevada (92%), mientras que las dos especies de *Anthyllis* presentaron supervivencias mucho más bajas (15% y 36% para *A. terniflora* y *A. cytisoides* respectivamente). A pesar de que las enmiendas orgánicas no tuvieron un efecto positivo sobre la supervivencia de la vegetación, la mejora en las propiedades físicas, químicas y microbiológicas inducidas por los tratamientos de lodo y compost incrementó el crecimiento de las plantas. *M. tenacissima* y *A. cytisoides* alcanzaron los mayores crecimientos en los tratamientos con compost y *A. terniflora* mostró los mayores crecimientos en parcelas enmendadas con lodo. En cambio, las diferencias provocadas por los acolchados sobre las propiedades del suelo no proporcionaron evidencias claras, ni positivas ni negativas, sobre el establecimiento de las plantas. Estos resultados sugieren que el uso de enmiendas orgánicas en restauración de suelos mineros crea condiciones favorables para el facilitar el establecimiento de especies de plantas nativas. Además, estas prácticas pueden dirigir la dinámica de la vegetación hacia etapas de sucesión más avanzadas, acelerando la recuperación del ecosistema.



## ABSTRACT

In the calcareous quarry belonging to the Cement Factory in Gádor (Almería, SE Spain), under the climatic boundary between arid and semiarid, the Desertification and GeoEcology Group (Arid Zone Research Institute, National Research Council of Spain) started in 2008 an experimental soil restoration. Two organic amendments (sewage sludge from a wastewater treatment plant and compost from the organic fraction of urban wastes) and two mulches (gravel and woodchips), with the corresponding controls, were tested in a 3 x 3 factorial design. Five and six years later, soil/substrate properties and their hydrological behaviour were assessed and their effects on native planted vegetation.

The soil/substrate assessment consisted in evaluating: a) the essential morphological properties including 2D-porosity, physical (particle size, bulk density), chemical (pH, electrical conductivity, cation exchange capacity, CaCO<sub>3</sub>, total organic C, total N, P, and K), biochemical (basal respiration, enzyme activities as dehydrogenase, β-glucosidase, urease and alkaline phosphatase) and biological properties (composition and structure of microbial community through PLFAs and PCR-DGGE analysis); b) the aggregate stability by two direct methods (water drop test and wet sieving) and glomalin content (glomalin-related soil protein [GRSP], and easily extractable glomalin-related soil protein [EE-GRSP]); c) hydrological behaviour (infiltration front and rate, runoff and sediment production) by means of rainfall simulations. The natural, undisturbed soil from the neighbouring area was also analysed and considered as reference soil and its hydrological behaviour assessed. The effects of the experimental substrates were tested every year on the survival and growth of three autochthonous plant species (*Anthyllis cytisoides*, *A. terniflora* and *Macrochloa tenacissima*) planted in nine plots of 75 m<sup>2</sup> (15 x 5 m).

The combination of organic amendments and mulches enhanced both the soil aggregate stability and the content of aggregate binding agents such as total organic C and glomalin. But the role of organic amendments, especially compost, was more important than mulch in increasing TOC and glomalin, showing the closest values to the undisturbed reference soils. Despite the considerable improvement in the amount of water stable aggregates found in sewage sludge-amended plots, the reference soils had the highest values.

Restoration treatments led to higher total porosity compared to reference soils. Each combination of organic amendments and mulches resulted in a different pore system with very diverse hydrological responses. Organic amendments conditioned both infiltration improvement and water erosion reduction. Woodchip mulch was more effective at trapping runoff and sediment, though this type of mulch did not favour the vertical water movement towards deeper horizons. Therefore, the use of organic amendments should be encouraged in mine soil restoration for its proven environmental benefits (enhancement of soil structure and infiltration and reduction of soil losses); conversely, mulches did not favour water conservation in the soil.

Organic amendments, especially compost, also improved soil chemical and biochemical properties as well as microbial biomass. Soils treated with sewage sludge and compost showed bacterial PLFA concentrations similar to those of reference soils, but compost treatments presented much higher fungal PLFA concentrations. On the other hand, the effects of mulch application did not show a clear trend with respect to soil functionality and did not increase the microbial biomass. Each combination of organic amendment and mulch was selective for a proper microbial community. Nevertheless, increases in soil functionality and microbial biomass were not related to changes in microbial diversity. After five years, the microbial properties of restored soils had not yet converged to values

recorded in the reference soils. However, the combination of mulches and organic amendments, particularly the compost treatment, stimulate microbial growth and activity, with positive implications for the increase in both soil fertility and quality.

The response to soil treatments of each plant species was different due to its own physiological mechanisms. *M. tenacissima* had the highest survival (92%), while both *Anthyllis* species presented much lower survival rates (15% and 36% in *A. terniflora* and *A. cytisoides* respectively). Despite organic amendments had not a positive effect on plant survival, the improvement on chemical, microbiological and physical soil properties induced by sewage sludge and especially compost treatment, enhanced plant growth. *M. tenacissima* and *A. cytisoides* reached the highest growth in compost treatments and *A. terniflora* reached its maximum growth in plots amended with sewage sludge. On the other hand, changes induced by mulches on the soil properties did not provided clear evidences, either positive or negative, in plant establishment. These results suggest that the improvement induced by organic amendments in restored mine soils can create favorable conditions to support revegetation with native species. These practices can redirect vegetation dynamics towards later successional stages, improving ecosystem recovery.



