

Evaluación de la influencia de tres especies: tunal (*Opuntia ficus-indica* L.), chacatea (*Dodonea viscosa* Jacq.) y molle (*Schinus molle* L.) sobre las propiedades edáficas de un sistema agroforestal sucesional en Combuyo – Vinto

Evaluation of the influence of three species: tunal (Opuntia ficus-indica L.), chacatea (Dodonea viscosa Jacq.) And molle (Schinus molle L.) on soil properties in a successional agroforestry system in Combuyo - Vinto

Andrea Bolaños Angulo, Mauricio Azero A. y Eduardo A. Morales

Departamento de Ciencias Exactas e Ingeniería, Universidad Católica Boliviana San Pablo, Calle M. Marques esq. Parque J. Trigo A., Cochabamba

ba_andrea@hotmail.com

Resumen: El 41% del suelo boliviano se encuentra en proceso de degradación por erosión y desertificación, siendo los departamentos de La Paz, Cochabamba, Chuquisaca, Potosí y Oruro los más afectados, especialmente en sus regiones áridas y semiáridas (CYTED, 2002). Por efectos de deforestación, sobreexplotación del suelo y un mal manejo de los suelos agropecuarios y forestales en general, intensificado por el cambio climático. Es necesario pensar en términos de sistemas agrícolas que optimizan el ciclo de nutrientes, permiten la producción permanente o semi-permanente, reducen la dependencia de insumos externos y disminuyen el impacto ambiental. Así las prácticas de agroforestería se dan como una opción sostenible del uso de la tierra, permitiendo al productor utilizar las fuentes de recursos a su alcance para optimizar su uso y adaptar las especies vegetales conforme sus necesidades. Existen especies nativas de alto potencial para alimento, leña, fijación de nitrógeno, forraje para alimento, que son de uso doméstico por las familias asentadas en zonas secas.

En este sentido, se realizó una evaluación del efecto de tres especies nativas sobre la fertilidad del suelo en comparación a un testigo dentro de un sistema agroforestal de enfoque sucesional ubicado en una zona semiárida del valle de Cochabamba, en la localidad de Combuyo - Vinto. Este terreno se encuentra a laderas de la Cordillera Tunari y antes de su implementación era de libre acceso para el ganado de los productores locales, presentando suelos muy erosionados y extremadamente pedregosos. Las propiedades de la superficie del suelo se midieron a distancias crecientes de manera radial de tres especies: para el tunal (*Opuntia ficus-indica* L.) se midió a 0, 0,5 y 1 m de distancia de la planta, para la chacatea (*Dodonea viscosa* Jacq.) y para el molle (*Schinus molle* L.) se midió a 0, 1 y 2

m. Se analizó el pH, la materia orgánica, nitrógeno total, fósforo disponible, respiración microbiana, temperatura y humedad del suelo.

A través de un análisis de varianza de estos parámetros se determinó que las especies no presentaron medias significativamente diferentes en función de las distancias medidas. Por otro lado, a través de un Análisis de Componentes Principales (ACP) se vio que las plantas de la chacatea y el molle tuvieron un impacto positivo o incremento en las propiedades del suelo, la chacatea tiene una relación de incremento de la materia orgánica y el pH, mientras que el molle sobre la humedad, respiración del suelo, contenido de nitrógeno y fósforo. A diferencia de estos, las plantas de tuna, presentaron los menores valores en los parámetros medidos, pero mostrando aun valores en un rango adecuado. Además se observó que se tiene una correlación evidente entre la humedad y la respiración microbiana, así como del pH con el contenido de MO.

Palabras clave: Degradación del suelo, zonas áridas y semiáridas, agroforestería, propiedades del suelo.

Summary: 41% of Bolivian soil is being degraded by erosion and desertification, with the departments of La Paz, Cochabamba, Chuquisaca, Potosí and Oruro most affected, especially in the arid and semiarid regions (CYTED, 2002). As an effect of: deforestation, overexploitation of ground and mismanagement of agricultural and forest soils generally intensified by climate change. You need to think in terms of agricultural systems that optimize nutrient cycling, allow permanent or semi-permanent production, reduce dependence on external inputs and reduce environmental impact. So agroforestry practices are given as a sustainable option of using the land, allowing the producer to use sources of resources available to optimize their use and adapt the plants under their needs. There are high-potential native species for food, firewood, nitrogen fixation, forage for food, which are for domestic use by families living in dry-lands.

In this regard, an evaluation of the effect of three native species on soil fertility compared to a witness in an agroforestry system approach successional located in a semi-arid valley of Cochabamba, in the town of Combuyo - Vinto was performed. This land is located at slopes of the Cordillera Tunari and, before implementation, was freely accessible to cattle from local producers, presenting very eroded and extremely stony soils. The properties of the surface soil were measured at increasing distances radially from three species: for tunal (*Opuntia ficus-indica* L.) was measured at 0, 0.5 and 1 m of the ground, for chacatea (*Dodonea viscosa* Jacq.) and molle (*Schinus molle* L.) was measured at 0, 1 and 2 m. PH, organic matter, total nitrogen, available phosphorus, microbial respiration, temperature and soil moisture were analyzed.

Through an analysis of variance of these parameters was determined that the species did not show significantly different averages based on the measured distances. On the other hand, through a Principal Component Analysis (PCA) it was found that the plants chacatea and molle had a positive impact or improved soil properties, the chacatea has a ratio of increased organic matter and pH, while the molle on moisture, soil respiration, nitrogen and phosphorus content. Unlike these, prickly pear plants, showed the lowest values in the parameters measured, but showing even values in a suitable range. Furthermore is noted that it has an

obvious correlation between moisture and microbial respiration, pH and the content of OM.

Keywords: Soil degradation, arid and semi-arid areas, agroforestry, soil properties.

1 Introducción

La degradación de los suelos en las zonas áridas y semiáridas producidas por las actividades humanas y las variaciones climáticas es un fenómeno de alcance mundial. Las causas de la degradación son numerosas, siendo las principales el sobrepastoreo, el incremento de la superficie utilizada para la producción agrícola, la deforestación y el establecimiento de industrias relacionadas con la producción agrícola (CYTED, 2002).

En Bolivia, la pobreza se concentra principalmente en el área rural, donde los pequeños productores de zonas áridas y semiáridas del país, viven en economías de subsistencia, con frecuencia en situación de inseguridad alimentaria y de alta vulnerabilidad al cambio climático (PROAGRO, 2010). Es decir, que se presentan condiciones de alta fragilidad, incrementada por el mal manejo del recurso suelo, que llevan a la erosión, compactación y pérdida de fertilidad del mismo. Sin embargo, a través de la aplicación de Sistemas Agroforestales (SAF) existe la posibilidad de mejorar esta situación, diversificando la producción y logrando al mismo tiempo un mantenimiento de la productividad a largo plazo (STADLER-KAULICH, 2008). Los árboles dentro de un sistema de producción tienen el potencial de mejorar su productividad, al influir en las características del suelo, del microclima, de la hidrología y de otros componentes biológicos asociados (FARREL Y ALTIERI, 1999).

La localidad de Combujo del Municipio de Vinto, perteneciente al Valle Central de Cochabamba, es considerada una zona semiárida por la deficiente precipitación pluvial, con precipitaciones anuales que oscilan entre 400 a 900 mm (RED ECOSAF, 2008). En esta localidad se ha instalado una variedad de sistemas agroforestales de enfoque sucesional, con el objetivo de evaluar la factibilidad y rentabilidad de mediano a largo plazo de una producción sostenible en suelos degradados de zonas semiáridas, realizando a la vez un servicio ambiental a través del uso de árboles (STADLER-KAULICH, 2008). Tal propiedad lleva por nombre “*Mollesneja*”, donde se inició las actividades de instalación del SAF a partir del 2000-2001, y actualmente cuenta con más de 13 ha cultivadas con distintos consorcios agroforestales. El presente estudio se llevó a cabo dentro de esta propiedad, donde se evaluaron las propiedades del suelo alrededor de tres especies acompañantes, es decir, especies que cumplen la función de mejorar las condiciones ecológicas del

entorno: tunal (*Opuntia ficus-indica* L.), chacatea (*Dodonea viscosa* Jacq.) y molle (*Schinus molle* L.).

Se decidió trabajar con estas tres especies por los supuestos beneficios que brindan al sistema y por la adaptabilidad que presentan referente a las condiciones edafoclimáticas de la zona. La planta de tuna es una especie adaptada a zonas áridas y semiáridas, muy utilizada en prácticas agroforestales como parte de protección de suelo; tiene un valor forrajero e inclusive un valor alimenticio para el ser humano, a pesar de usarse poco para este fin en Bolivia. Por otro lado, la chacatea es una especie pionera de ladera seca y subhúmeda; en agroforestería se la considera una especie importante en la protección de laderas erosionadas o susceptibles a la degradación, para proteger del viento, mantener la humedad e incorporar carbono orgánico al suelo (VARGAS *et al.*, 2000). Por último, el árbol de molle, se encuentra en forma silvestre en los valles interandinos, algunos agricultores lo cultivan en cercos vivos y como árbol disperso en campo de cultivo; proporciona sombra, protege al suelo de la erosión, mantiene la humedad e incorpora materia orgánica; es apropiado para programas de conservación de cuencas y áreas degradadas (VARGAS *et al.*, 2000).

2 Metodología

2.1 Sitio de estudio

El estudio se llevó a cabo el año 2013 en la Propiedad *Mollesneja*, ubicada en la Localidad de Combujo, municipio de Vinto, departamento de Cochabamba. Esta propiedad se encuentra en la ladera sur de la Cordillera Tunari a una altitud aproximada de 2.700 ms.n.m. El clima de la zona es semiárido con precipitaciones anuales de 400 a 700 mm y una temperatura media anual de 18°C. El suelo es un regosol muy pedregoso, con fuerte sobrepastoreo en el pasado y signos de erosión laminar, en cárcavas y en masa (STADLER-KAULICH, 2010).

Dentro del terreno se identificaron 5 plantas de cada especie (molles, tunas, chacateas) que no tuvieran otras especies leñosas en un entorno de 5 m de lado, para reducir lo más posible las influencias de segundas especies (leñosas). En el caso del testigo, se buscó una sección de terreno, también de 5 m de lado, que no contara con ninguna especie leñosa sino solamente con vegetación herbácea adventicia. Dado que se trata de un sistema agroforestal de enfoque sucesional, se tiene especies que crecen por regeneración natural y no son eliminadas sino que son aprovechadas para producir biomasa que luego se incorpora al suelo como *mulch*.

Además, para la selección de las 5 muestras dentro de cada parcela, se buscó que sean plantas del mismo grado de desarrollo.

2.2 Descripción y características de las parcelas de estudio

A continuación se muestran las características del terreno recolectadas y la historia de manejo que se obtuvo a través de entrevistas con la administradora de la propiedad, Dra. Noemi Stadler Kaulich.

Tabla 1: Descripción y características de las parcelas de estudio

	P1	P2	P3	P4
Especie	<i>Opuntia ficus-indica</i> L.	<i>Dodonea viscosa</i> Jacq.	<i>Schinus molle</i> L.	Testigo
Tamaño	0,5 ha	0,25 ha	-	0,25 ha
Topografía	Ladera	Ladera	Ladera	Ladera
Orientación	De norte a sur	De norte a sur	De norte a sur	De norte a sur
Inclinación de la pendiente	10° = 18% (moderada)	11° = 20% (moderada)	7° = 12% (moderada)	11° = 20% (moderada)
Especie principal de la parcela	Palta y Nogal	Olivo	Parcela mixta	-

Tabla 2: Historial de manejo de las parcelas

Actividades	P1	P2	P3	Testigo	Año
Labranza (arado de discos)	+	+	+	+	1999
Plantación de especies arbóreas en los límites de la parcela (barreras vivas)	+	+	+	-	1999
Plantación de especies frutales y arbóreas		+	+	-	2003 – 2007
	+				
Riego, durante época seca, de las especies frutales en caso de que mostraban estrés hídrico	+	+	-	-	1999 – 2000 -2001
Extracción de la chacatea donde la misma es muy abundante	+	+	+	-	Desde el 2011 hasta la fecha
Poda dos veces/año	+	+	+	-	Desde el 2005 hasta la fecha
Disposición del material podado en el suelo y alrededor de las especies arbóreas y frutales	+	+	+	-	Desde el 2005 hasta la fecha
Construcción de terrazas para evitar la erosión hídrica	+	+	-	-	2003
Manejo bajo los principios de Ernst Gotch	+	+	-	-	Desde la plantación hasta la fecha

+ Aplicación de actividad

- Ausencia de aplicación

Como muestra el historial, las tres parcelas desde su implementación no fueron aradas nuevamente. El riego se realizó en los tres primeros años solamente a las especies que mostraron algún tipo de estrés hídrico, además de los frutales. El material podado es incorporado al suelo a manera de *mulch* y alrededor de cada especie leñosa; por otro lado, no se utilizan pesticidas ni fertilizantes de síntesis. No se practica la rotación de cultivos debido a que las mismas son sistemas agroforestales y su objetivo es la recuperación de la fertilidad del suelo y la producción frutícola. Se da un aprovechamiento de la dinámica de la sucesión natural y las especies acompañantes (tuna, molle, jacarandá y chacatea), sin embargo estas no pueden alcanzar un mayor tamaño que las especies primarias.

2.3 Evaluación de las propiedades del suelo

Se tomaron muestras del horizonte superficial (15 cm) del perfil del suelo en cada una de las 5 muestras de las especies seleccionadas. La toma de muestras se realizó de forma radial, es decir, se tomaron muestras a 0, 0,5 y 1 m de distancia de las plantas de tuna, y a 0, 1 y 2 m de distancia de los molles y chacateas, debido al mayor tamaño (ver Figura 1).

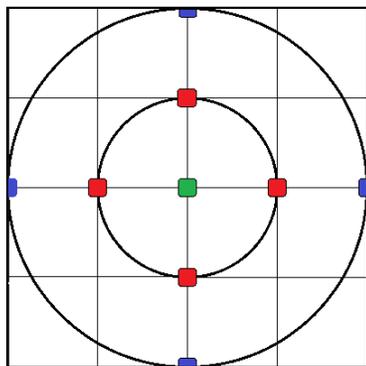


Figura 1: Esquema de la toma de muestras del entorno de cada especie.

En la Figura 1 se ilustra la forma de muestreo. En el eje central (que representa a cada especie), se tomó una muestra (simple). La siguiente muestra (compuesta) se obtuvo de cuatro submuestras obtenidas en forma de cruz, a una distancia ya sea de 0,5 m (tunas) o de 1 m (molles y chacateas). La última muestra compuesta se obtuvo igualmente de cuatro submuestras obtenidas en forma de cruz, a una distancia ya sea de 1 m (tunas) o de 2 m (molles y chacateas). Esta forma de muestreo permitió estudiar el gradiente de las propiedades del suelo en función de la distancia tomando como eje a cada una de las especies y repeticiones.

Sin embargo, para el análisis de la textura, el contenido de humedad en Capacidad de Campo (% CC) y el contenido de humedad en el Punto de Marchitez Permanente (%PMP), se tomó entre 5 a 6 submuestras de cada parcela: P1, P2 y

P3, realizando la toma de submuestras en forma zigzagueante o sinuosa, dentro de la capa superficial del suelo.

Se realizaron los siguientes análisis (fue restrictivo realizar análisis como la densidad aparente, infiltración, etc., por la pedregosidad del terreno y los recursos disponibles):

Tabla 3: Indicadores y método de análisis de las propiedades del suelo.

	Indicador	Método	Institución
Propiedades químicas	N _t	Kjeldahl	FCAPFV (UMSS)
	P _d	Colorimetría	FCAPFyV (UMSS)
	M.O.	Combustión húmeda	UCB
	pH	Lectura con pH-metro	UCB
Propiedades físicas	CC	Olla de presión, plato poroso de 0,33 bar	FCAPFyV (UMSS)
	PMP	Membrana de presión, plato poroso de 15 bar	FCAPFyV (UMSS)
	Textura	Hidrómetro (Bouyoucos)	FCAPFV (UMSS)
	Humedad	Sensor de humedad	Medición en campo
	Temperatura	Sensor de humedad	Medición en campo
Propiedades biológicas	Respiración microbiana	Respiración basal según el método descrito por Alef y Nannipieri (1995)	UCB

Fuente: Elaboración propia

2.4 Análisis estadísticos

Se obtuvo las medias de las 5 muestras para los parámetros medidos y para cada especie y el testigo. Luego se realizó un análisis de regresión lineal para analizar los gradientes de los parámetros en función de la distancia. Para ello se utilizó el software Infostat.

Se realizó un análisis de varianza multivariado entre especies, observando qué especie presentó mayor influencia en las propiedades del suelo. Esto a través de la prueba de Hotelling y Boferroni con un nivel de significancia del 95 %.

Finalmente, se aplicó un Análisis de Componentes Principales (ACP), con el fin de establecer relaciones de cada especie con las propiedades del suelo y visualizar la interdependencia entre variables.

3 Resultados y discusión

3.1 Evaluación de las propiedades físicas del suelo

- *Textura y agua del suelo*

De acuerdo a los resultados obtenidos (Tabla 4) se observa que la textura de las parcelas no es muy variable, entre franca y arenosa franca. Es decir que son suelos de textura media, que presentan características agrícolas adecuadas para una gran variedad de plantas y pueden ser muy productivas con un manejo adecuado (VILLARROEL, 1988). Sin embargo, al realizar el muestreo se observó una débil estructuración del suelo, esto los podría hacer susceptibles a la erosión hídrica y eólica, pero dado que se cuenta con cobertura vegetal permanente están protegidos de este factor.

En cuanto, a la capacidad de almacenamiento de agua disponible de los suelos, ellos muestran valores superiores a los referenciales, lo cual puede estar relacionado con contenido de materia orgánica, debido a la constante incorporación de residuos vegetales. No se observan diferencias significativas entre parcelas, a pesar de la diferente textura, posiblemente por el hecho de que son trabajadas bajo el mismo tipo de manejo.

Tabla 4: Resultados de la textura y agua del suelo, de muestras tomadas en octubre de 2013.

Parcelas	Textura	% CC	% PMP	% Agua Disponible	Valores de referencia*
P1 - Tuna	Franco Arenoso	23,69	10,01	13,67	6 – 10
P2 - Chacatea	Franco Limoso	29,70	13,05	16,64	10 – 14
P3 - Molle	Franco	22,89	8,46	14,43	10 – 14
B - Testigo	Arenoso Franco	20,21	8,34	11,87	6 – 10

Fuente: Laboratorio de Suelos y Aguas “Martín Cárdenas”

- *Temperatura y humedad del suelo*

Las mediciones de temperatura y humedad (%CC) del suelo fueron tomadas en un solo momento del día y no son valores de promedio diario.

Con referencia a la temperatura, en la Figura 2 se puede observar que no se han observado gradientes apreciables con la distancia. Los suelos bajo la tuna y el suelo testigo mostraron temperaturas ligeramente superiores a los que estaban debajo de las chacateas y molles. Este dato sugiere la importancia del follaje de estas especies como atenuadoras de la fuerte insolación, característica de la zona seca andina. Sin embargo, se midieron temperaturas entre valores de 20 a 30 °C, tolerables para el crecimiento de las especies estudiadas dado que se trata de

especies adaptadas a condiciones semiáridas. Asimismo, es importante remarcar que en todos los casos el terreno contó con una constante cobertura vegetal de *mulch*, que genera un microclima edáfico.

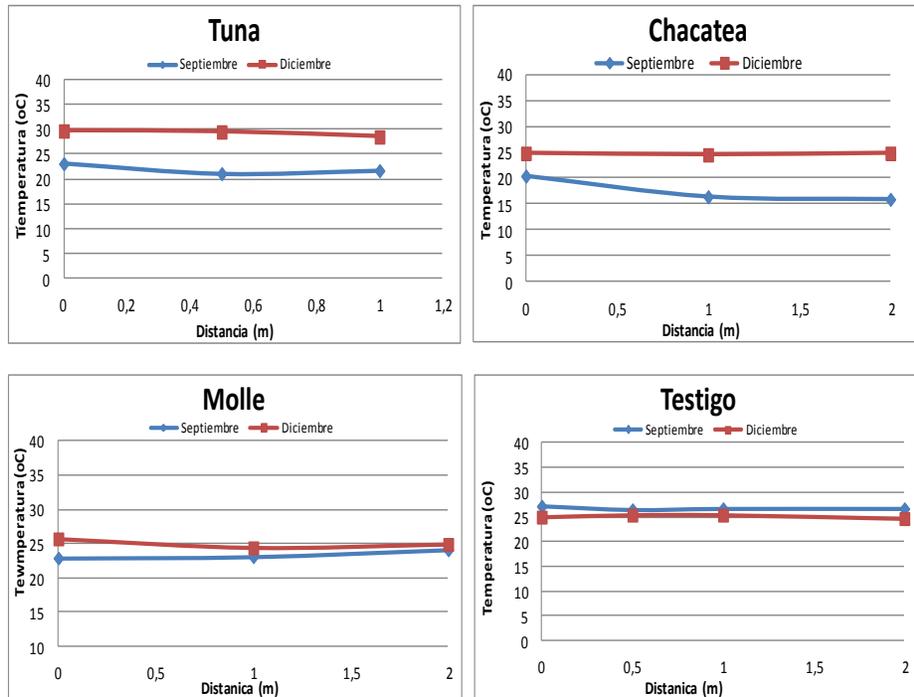


Figura 2: Variaciones de la temperatura en los meses de septiembre y diciembre para cada una de las especies.

En el caso del contenido de humedad (expresado como un porcentaje de la capacidad de campo), tampoco se apreció un gradiente con la distancia. Los suelos debajo de tunales, chacateas y molles se caracterizaron como medianamente húmedos, mientras que debajo del testigo se caracterizaron como secos. Hay que tomar en cuenta que en estas parcelas no se aplica ningún tipo de riego y que se tomaron las mediciones en plena época seca (septiembre) y al comienzo de la época de lluvias (diciembre). Es importante mencionar que en los 4 casos el suelo tiene un recubrimiento parcial de *mulch*; posiblemente en un suelo desnudo, típico de la agricultura convencional, los niveles de humedad edáfica habrían sido inferiores. Como referencia, en la zona de valle de Cochabamba (Vinto), se obtuvo incremento entre 29,9 % (ROJAS, 2010) y 80,9 % (SUAREZ, 2009) en el contenido de humedad de los primeros 15 cm, en parcelas cubiertas con *mulch* de maíz y trigo (respectivamente), en relación a parcelas con el suelo desnudo bajo un sistema convencional.

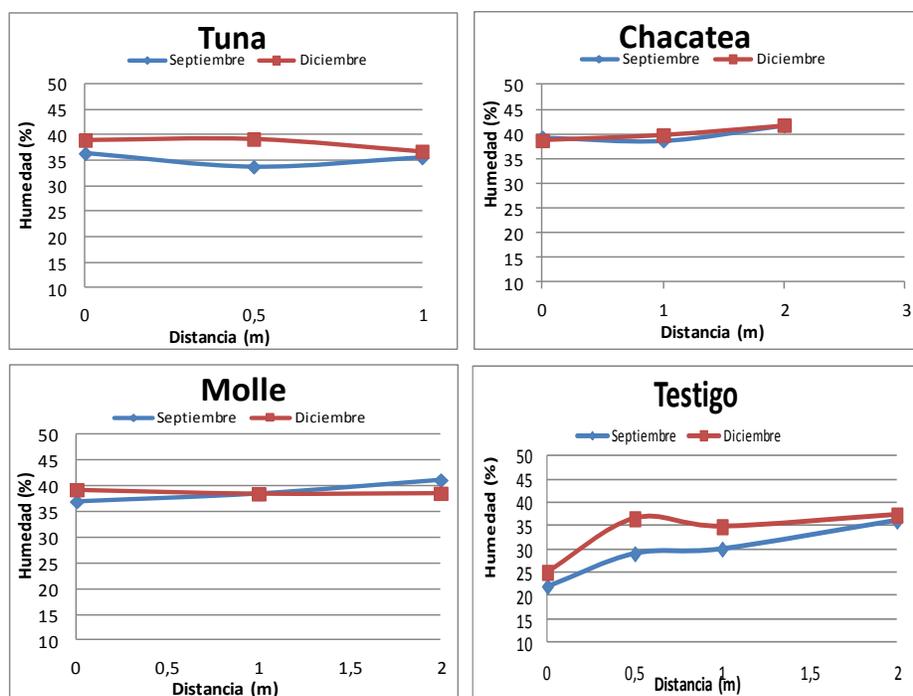


Figura 3: Variaciones de la humedad en los meses de septiembre y diciembre para cada una de las especies.

3.2 Evaluación de las propiedades químicas del suelo

En la siguiente tabla se presentan las medias obtenidas de los parámetros tomados, resultante de las cinco muestras de cada especie con las que se trabajó.

Tabla 5: Medias y clasificación de los parámetros químicos medidos

Especie	pH	Clasificación	MO (%)	Clasificación	N _t (%)	Clasificación	P _d (ppm)	Clasificación	
P1	Tuna	4,66	Fuertemente ácido	3,63	Medio	0,22	Alto	22,56	Alto
P2	Chacatea	5,06	Moderadamente ácido	4,58	Alto	0,21	Alto	22,95	Alto
P3	Molle	5,21	Moderadamente ácido	5,77	Alto	0,28	Alto	29,75	Alto
B	Testigo	4,72	Fuertemente ácido	3,85	Medio	0,18	Moderado	6,53	Bajo

- *pH*

Los suelos con valores de pH inferiores a 5,0 son considerados como suelos fuertemente ácidos, que se constituyen en limitativos debido a la disminución de la disponibilidad de ciertos nutrientes (HAUSENBUELLER, 1985). Los valores entre

5,0 y 6,0 son considerados como de acidez moderada, donde el problema de disponibilidad es menor. De acuerdo a los resultados de la tabla 5, el pH resultó moderadamente ácido debajo de los molles (5,21) y las chacateas (5,06) y fuertemente ácido debajo de los tunales y en el suelo testigo, pudiendo tener efectos negativos para el crecimiento de las plantas. Este hecho sugiere que debe estudiarse más a fondo el potencial de ciertos acompañantes para mejorar la reacción ácida de algunos suelos cuyo material parental les confiere niveles de acidez elevada.

- *Materia orgánica (MO)*

En general se tuvo buenos contenidos de MO, considerando el valor referencial de 4 % para un alto contenido de MO. Sin embargo, el valor fue especialmente elevado en los suelos debajo de las chacateas y molles, que son especies conocidas por su aporte de material vegetal al suelo, en la forma de hojas, tallos, flores y frutos secos. Esta característica no es propia de la planta de tuna.

Es importante mencionar que en los sistemas agroforestales, los suelos suelen estar cubiertos de rastrojo (*mulch*), especialmente alrededor de los árboles (HODGSON, 1987), dado que es uno de los fundamentos que justifica la aplicación de estos sistemas.

- *Nitrógeno (N_t)*

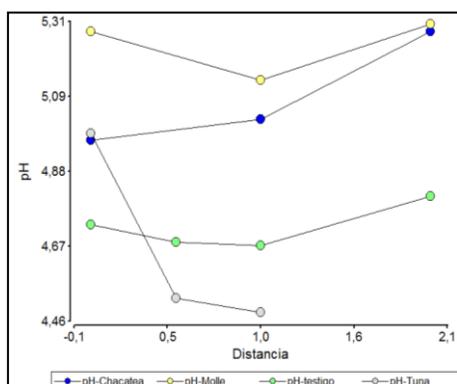
Se conoce que por lo general, del 97 al 99 % por ciento del nitrógeno total (N_t) del suelo se encuentra en la materia orgánica, el principal almacén de nitrógeno del suelo (WHITE, 1997). La tabla 5 muestra una estrecha relación entre el nitrógeno total y la materia orgánica, las muestras de suelo con un contenido alto de nitrógeno son las de tuna, chacatea y molle, mientras que el testigo cuenta con una clasificación de valores medios de nitrógeno total.

- *Fósforo (P_d)*

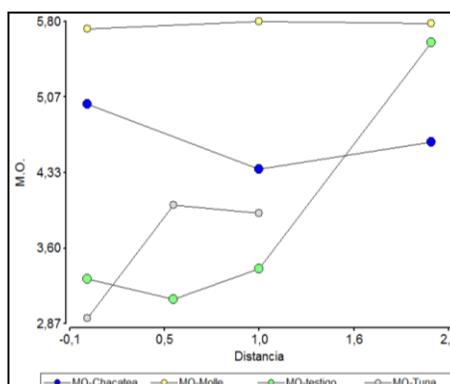
En todos los suelos por debajo de las especies estudiadas, excepto en el testigo, se tiene un alto contenido de fósforo disponible, que podría ser atribuido a la existencia de micorrizas asociadas a las especies estudiadas (LYNCH y WOOD, 1988). En el presente estudio no se incluyó esta variable, que sin embargo sería importante evaluar en un trabajo posterior.

3.3 Análisis de regresión lineal en función de la distancia

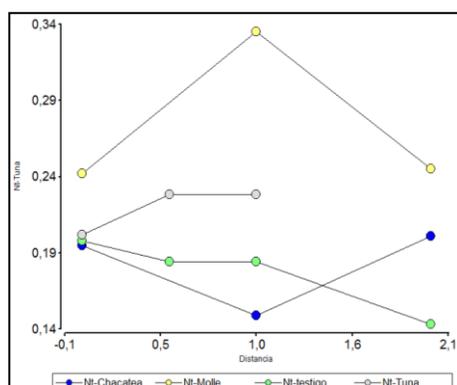
Del análisis de regresión lineal, se presenta gráficas para el pH, MO, N_t y P_d . Cada gráfica representa una comparación entre especies de la variación de determinado indicador en función de la distancia. De esta forma se puede observar si existe un gradiente de los parámetros del suelo (el parámetro del suelo aumenta o disminuye con la distancia), tomando la especie como punto 0.



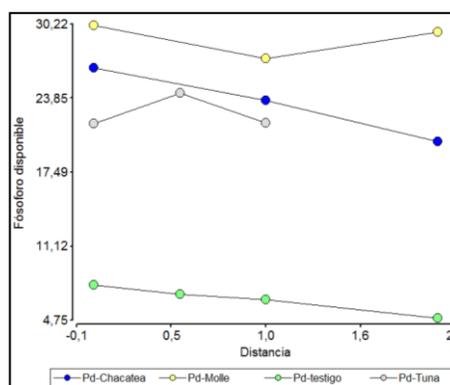
Especie	R ²	p-valor	
		Const	Dist
Tuna	0,81	0,0207	0,2884
Chacatea	0,89	0,0310	0,2165
Molle	0,01	0,0136	0,9268
Testigo	0,38	0,0010	0,3821



Especie	R ²	p-valor	
		const	Dist
Tuna	0,69	0,0892	0,3749
Chacatea	0,4	0,0435	0,6027
Molle	0,48	0,0037	0,5122
Testigo	0,79	0,0312	0,1100



Especie	R ²	p-valor	
		Const	Dist
Tuna	0,75	0,0313	0,3333
Chacatea	0,01	0,1326	0,9341
Molle	0,0007	0,1596	0,9823
Testigo	0,92	0,0011	0,0422



Especie	R ²	p-valor	
		Const	Dist
Tuna	0,0008	0,0542	0,9915
Chacatea	0,99	0,0071	0,0464
Molle	0,03	0,0415	0,8891
Testigo	0,99	0,0010	0,0029

Figura 4: Análisis de regresión lineal del pH, MO, N_t y P_d en función de la distancia.

De este análisis se pudo constatar, que no se tiene realmente un gradiente de las propiedades del suelo que disminuya o aumente en función de la distancia de muestreo de la planta. Solo se obtuvo una variación estadísticamente significativa para el fósforo disponible en el caso de la chacatea, que disminuye en cuanto aumenta la distancia de la planta. En el caso de la tuna se tuvo altos coeficientes de correlación para el pH, MO y N_t en función de la distancia, sin embargo estos

mostraron no ser estadísticamente significativos con la presente densidad de datos. En este sentido, se sugiere incrementar el número de muestras en un estudio posterior, abocado a estas variables.

3.4 Evaluación de propiedades biológicas del suelo

La respiración es un proceso clave del ecosistema, está relacionada con la productividad del ecosistema, la fertilidad del suelo, y el ciclo del carbono. Tiene un impacto en el cambio climático y en la fertilidad del suelo. Entre los principales factores que influyen en la respiración del suelo tenemos a la humedad y la temperatura. El flujo de salida de CO₂ es menor en condiciones secas, y alcanza una velocidad máxima con suelo de humedad media, y decrece en altos contenidos de humedad del suelo cuando las condiciones anaerobias reprimen la actividad aeróbica microbiana (LUO y ZHOU, 2006). El patrón estacional de la respiración sigue el patrón de las lluvias, así se tuvo contenidos medios a bajos niveles de humedad para los meses tomados, obteniendo valores medios - bajos de respiración microbiana; además que se trata de una zona semiárida con suelos en recuperación a través del establecimiento de los sistemas agroforestales.

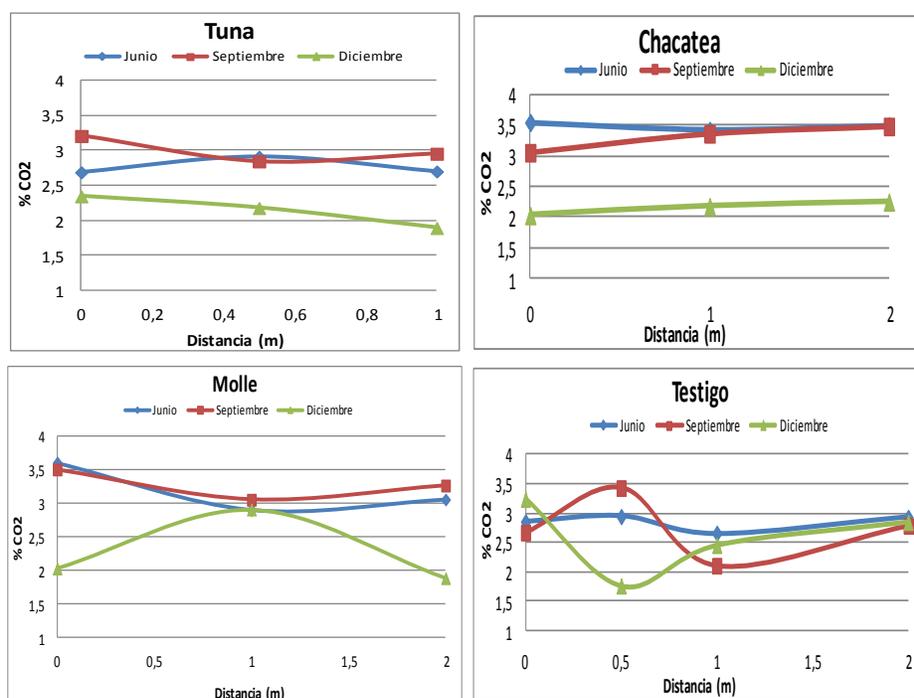


Figura 5: Variación de la respiración microbiana para los meses de junio, septiembre y diciembre.

Sin embargo, otro de los factores que pudo haber tenido mucha influencia en la respiración obtenida fue el pH, ya que la mayoría de los microorganismos del

suelo crecen óptimamente en un entorno de pH cercano a la neutralidad (STOLP, 1988). Uno de los factores que se piensa que influyó positivamente en la respiración del suelo fue el aporte de materia orgánica.

En cuanto a los cambios estacionales de la respiración del suelo para los suelos de debajo de las 3 especies del estudio, se puede observar que la respiración tuvo un descenso progresivo desde el mes de junio al mes de diciembre. Entre los meses de junio y septiembre este no es significativo, sin embargo es más notorio para el mes de diciembre. Esto se debió posiblemente a que las muestras del mes de diciembre fueron recolectadas a principios del mes como se mencionó, donde todavía no se habían observado marcados episodios de lluvia. La respiración del suelo usualmente es mayor durante el verano y menor en el invierno (LUO y ZHOU, 2006). Probablemente si las muestras se hubieran tomado en el mes de enero o febrero, se pudieran haber visto grandes diferencias en la respiración en comparación de los meses de junio y septiembre.

3.5 Análisis de varianza multivariado de las propiedades del suelo en función de las especies de tuna, chacatea y molle con la distancia.

Se vio que las medias no son significativamente diferentes en función de las distancias tomadas para ninguna de las especies con las que se trabajó, las plantas de tuna, chacatea y molle. Es decir que las propiedades del suelo en el radio de 0, 1 y 2 m de distancia para el molle y la chacatea (tomando la especie como punto central) no variaron ni siguieron un patrón lineal (de aumento o disminución) en función de las distancias tomadas, sino más bien presentaron valores similares de las propiedades del suelo en un radio de hasta 2 m en función de cada especie. De la misma forma para las plantas de tuna, en un radio de 0, 0,5 y 1 m de distancia, las propiedades del suelo no variaron significativamente, no existió una relación lineal de las propiedades del suelo con la distancias. Posiblemente tomando a mayores distancias se puede encontrar mayores diferencias, como un estudio realizado para evaluar el papel de los árboles en los sistemas de agricultura tradicional de México Central ilustra la influencia potencial de los árboles sobre la fertilidad del suelo (FARREL y ALTIERI, 1999). Otro factor que influyó pudo ser la edad de las plantas con las que se trabajó, siendo que con mayor edad tendrán una influencia mayor en las propiedades del suelo.

De esta forma para, el análisis multivariado entre especies y el análisis de componentes principales (ACP), se decidió no tomar en cuenta la distancia como variable, ya que no tuvo ninguna incidencia en el análisis de la relación entre parámetros, ni en la evaluación del potencial de estas tres especies sobre las propiedades del suelo.

3.6 Análisis de varianza multivariado entre especies

A través de la prueba de Hotelling y Boferroni se tiene una clasificación de A, B y C, siendo C el que presenta mayores valores en las medias (los mejores valores para los parámetros evaluados), B valores intermedios y A los valores menores en las medias.

Se obtuvo una clasificación C para el molle y la chacatea (Figura 6), es decir que estas dos especies no representan diferencias significativas en las medias de los parámetros evaluados y presentan los mejores valores de las propiedades del suelo entre las especies evaluadas, generan un impacto positivo sobre las propiedades del suelo y su fertilidad. Por otro lado, el testigo tiene una clasificación B, es decir que presenta valores intermedios (menor a los obtenidos para el molle y la chacatea, pero mayores a los obtenidos para la tuna). Finalmente, se tiene una clasificación A para las plantas de tuna, es decir que estas presentaron los valores más bajos de las propiedades del suelo. Sin embargo, a pesar de presentar los valores más bajos entre las medias evaluadas de las propiedades del suelo, no presentaron niveles críticos.

Prueba de Hotelling con nivel corregido por Bonferroni Alfa=0.05
 Error: Matriz de covarianzas común gl: 40

Especies	pH	Nt	Pd	M.O.	T(sep)	H(sept)	Resp(sep)	n	
Tuna	4,66	0,22	22,56	3,63	21,99	35,24	3,00	15	A
Testigo	4,72	0,18	6,55	3,85	26,77	29,25	2,75	4	B
Molle	5,21	0,28	29,75	5,77	23,02	38,27	3,26	13	C
Chacatea	5,06	0,21	22,95	4,58	25,94	39,72	3,24	12	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Figura 6: Análisis de varianza multivariado entre especies en función de los parámetros del suelo.

3.7 Análisis de componentes principales (ACP)

En el gráfico del ACP (ver Figura 7:) se observa la media total de cada una de las especies; están representadas por los puntos biplot de color oscuro y su posición sobre los ejes 1 y 2 nos indica la influencia que tendrán cada una de las especies sobre los parámetros medidos.

En la Figura 8:, se observa que las especies que tuvieron mayor influencia sobre las propiedades del suelo fueron las plantas de chacatea y molle, a diferencia del testigo y de la tuna, por la distancia a la que se encuentran del eje 2. Del testigo como era de esperarse dado que no se tiene una especie implantada, no se tiene una influencia potencial sobre las propiedades del suelo fuera de las actividades que se realizan normalmente en los suelos como medio dinámico (no labranza, cobertura vegetal, etc.).

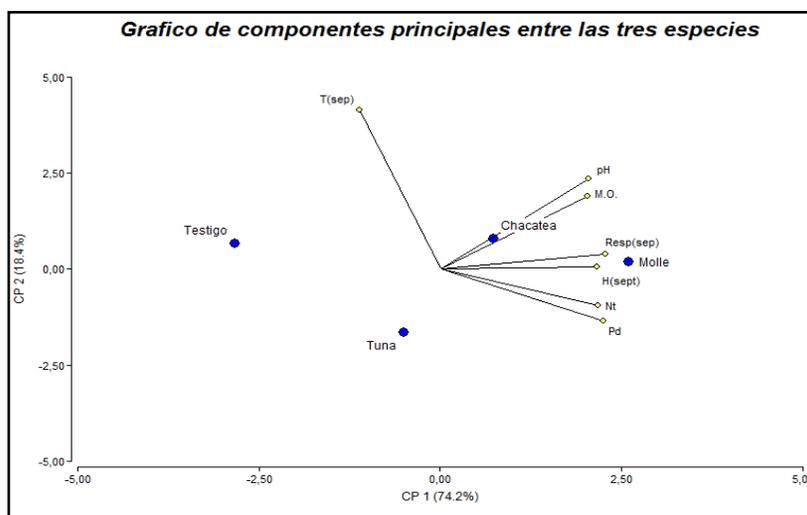


Figura 7: Gráfico del análisis de componentes principales

Matriz de correlación/Coefficientes

	pH	Nt	Pd	M.O.	T(sep)	H(sept)	Resp(sep)
pH	1,00						
Nt	0,73	1,00					
Pd	0,67	0,88	1,00				
M.O.	0,97	0,82	0,65	1,00			
T(sep)	0,01	-0,65	-0,67	-0,10	1,00		
H(sept)	0,76	0,70	0,92	0,65	-0,36	1,00	
Resp(sep)	0,84	0,77	0,92	0,76	-0,34	0,99	1,00

Figura 8: Matriz de correlación resultado del ACP.

En cuanto a las plantas de la chacatea, se puede observar que esta especie (según su posición) presenta una mayor relación con los vectores de materia orgánica y pH, es decir, que tiene una influencia en el aumento del contenido de materia orgánica y el pH, según la dirección del vector. Mientras que el molle tendrá una mayor influencia en el aumento de la respiración microbiana y la humedad, incluso en el contenido de nitrógeno total y fósforo disponible.

Del gráfico también se puede afirmar, según el tamaño de los vectores, que la temperatura fue el parámetro que mayor variabilidad tuvo entre especies, y a la vez que mayor influencia presentó sobre las especies. Se puede decir entonces, que el clima juega un papel importante así como el manejo que se le puede dar, para optimizar este factor y usarlo a nuestro favor. Pero estas son estimaciones, para poder hacer un análisis más profundo se necesitan mediciones promedio de la temperatura.

Del ACP, también es posible observar la matriz de coeficiente de correlación en la figura 7, la cual es importante comparar con el gráfico obtenido. Los factores con mayor correlación fueron la humedad con el incremento de la respiración microbiana (0,99), en el gráfico tienen un grado mínimo de apertura indicando una gran correlación, este principio se cumple dado que la relación conceptual común que se da es que se tendrá un menor flujo de CO₂ en condiciones secas (LOU y ZHOU, 2006).

Además, se tiene una relación del incremento de la materia orgánica con el incremento del pH con un coeficiente de 0,97, sugiriendo que los valores de pH ácidos mostrarían una vinculación con el incremento de materia orgánica, provenientes de la descomposición de residuos arbóreos y el material parental. A la vez se vio una relación del pH con la respiración (0,84), lo cual es también expectable por los niveles de pH entre medianamente y fuertemente ácidos.

Según la matriz de correlación, también la respiración y la humedad del suelo presentaron una importante correlación con el contenido de fósforo disponible (0,92).

Así también, el fósforo disponible estuvo relacionado con el nitrógeno total (0,88). Finalmente se pudo observar que la temperatura tuvo una relación inversamente proporcional tanto con el contenido de nitrógeno total como con el fosforo disponible. Los vectores de N_t y P_d tienen un amplio rango de apertura acercándose a los 180° en relación con la temperatura. Es decir que estos disminuyen con el incremento de la temperatura, existen estudios que muestran que el contenido de N de los suelos baja entre un tercio a la mitad por cada aumento de 10°C (FAO, s/a). A pesar que se mostró esta tendencia, no es significativa (- 0,67), probablemente por los aceptables valores de N_t y P_d, además de temperaturas aceptables también para el crecimiento de las plantas.

Adicionalmente, se realizó un análisis de predicción de ACP, es decir una predicción de la variabilidad que tendrán los parámetros medidos para cada especie. Las plantas de molle y chacatea presentaron una menor variación como se observa en la Figura 8, representado por un círculo que envuelve la variación que posiblemente tendrán las propiedades del suelo medidas; mientras que para el tunal se tuvo una amplia variación, es decir que sería conveniente trabajar con una mayor cantidad de muestras para tener un menor rango de predicción de valores.

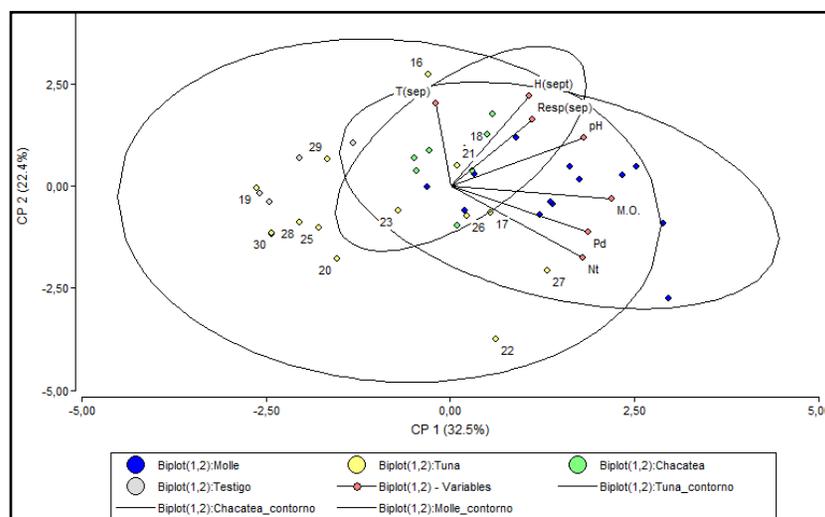


Figura 9: Gráfico de predicción de análisis de componente principales.

4 Conclusiones

En cuanto al análisis de las propiedades físicas del suelo, las parcelas presentaron texturas adecuadas para el desarrollo de las plantas, sin embargo una débil estructuración, además de ser terrenos extremadamente pedregosos. El porcentaje de CC en todas las parcelas fue superior a los valores de referencia, relacionado posiblemente al buen contenido de materia orgánica y a la cobertura del suelo con *mulch*.

Por otro lado, en el análisis de las propiedades químicas, en cuando al contenido de MO, N_t y P_d para todos los casos de estudio se encontraron en una clasificación entre medio y alto. El contenido de P_d presentó una gran diferencia: mientras que en las tres especies se obtuvo un contenido alto, en el testigo se observó un contenido bajo, atribuido al retorno de residuos en las primeras. Para el pH se obtuvo valores medianamente ácidos (chacatea y molle) y fuertemente ácidos (tunal y testigo), sugiriendo una posible relación con el aporte de sustancias químicas provenientes de la descomposición de los residuos vegetales. Esta relación es interesante y debería ser más estudiada en función al potencial de mejora de suelos ácidos utilizando especies de molle y chacatea.

No se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos (tuna, molle, chacatea y testigo) en función de la distancia. Es decir que no se observó grandes diferencias en las propiedades del suelo (humedad, temperatura, pH, MO, N_t, respiración microbiana) a distintas distancias, excepto en el caso del Fósforo disponible (P_d) para la planta de la chacatea. Esta evidencia sugiere que sería

aconsejable realizar un estudio a mayor distancia, para encontrar alguna evidencia del patrón de influencia de las especies vegetales leñosas estudiadas.

Se observó que el árbol del molle y la planta de la chacatea generaron un impacto positivo sobre la fertilidad del suelo, por el constante aporte de material orgánico. En contraposición, los tunales presentaron medias significativamente diferentes de los parámetros evaluados en relación al testigo, el molle y la chacatea.

Las especies de chacatea tuvieron mayor influencia en el aumento del contenido de materia orgánica y pH del suelo; mientras que el molle en el aumento de la respiración microbiana y humedad, incluso en el contenido de nitrógeno total y fósforo disponible.

El testigo no tuvo una influencia potencial sobre las propiedades del suelo.

Los factores más correlacionados entre sí fueron el aumento de la humedad con el incremento de la respiración microbiana. Además, se vio una relación del aumento de la MO con el pH. A la vez se vio una relación del pH con la respiración, sugiriendo que los valores de acidez afectan la actividad biológica en el rango de los suelos estudiados.

Agradecimiento

Los autores agradecen a la Dra. Noemi Stadler-Kaulich por la motivación a estudiar las interacciones incluidas en este trabajo, acoger a los investigadores en la Propiedad *Mollesnejta* y financiar una parte del estudio.

Referencias

- [1] CYTED XVII. 2002. *El agua en Iberoamérica; de la escasez a la desertificación*. En <http://www.produccion-animal.com.ar/agua_cono_sur_de_america/31-tierras_secas_iberoamerica.pdf>, (06/05/2013).
- [2] FAO (s/a). *Sistemas agroforestales en América Latina y el Caribe*. En <http://www.ecosaf.org/publicaciones/Sistemas_agroforestales_en_America_L_y_C_FAO.pdf>, (15/04/2013).
- [3] Farrell, J. G.; Altieri, M. A. 1999. *Sistemas Agroforestales*. En: Altieri, M. A. 1999. *Agroecología: bases científicas para una agricultura sustentable*. Editorial Nordan Comunidad, Montevideo.
- [4] Hausenbuiller, R. L. 1985. *Soil Science*. Principles and Practices. WCB Publishers
- [5] Hodgson, J. M. 1987. *Muestreo y descripción de suelos*. Algunos conceptos edáficos. Barcelona. Reverté, S.A

- [6] Lou, Yiqi, y Zhou, Xuhui. 2006. *Soil respiration and the environment*. Elsevier Science Publishers.
- [7] Lynch, J.M. y M. Wood. 1988. *Interactions between plant roots and soil microorganisms*. En: Wild, A. (Ed.). 1988. *Russell's Soil Conditions and Plant Growth*, 11th Ed. Longman Group U.K. London.
- [8] PROAGRO. 2010. *Perfil de PROAGRO en la Adaptación al Cambio Climático*. En <http://www.proagro-bolivia.org/files/Perfil_ACC.pdf>, (22/05/2013).
- [9] RED ECOSAF. 2008. “*Ensayo de agroforestería sucesional en la ladera sur de la cordillera del Tunari del municipio de Vinto, Cochabamba, Bolivia, 2001 – 2009*”, *Acta Nova*, UCB, 2008, Vol. 4 - N° 1, Cochabamba.
- [10] Rojas, E. K., 2010. “*Evaluación comparativa de parámetros ambientales y agronómicos de un sistema de labranza cero frente a un sistema de labranza convencional en un cultivo de maíz (Zea mays var. Comp. 20) en la Granja Modelo Pairumani*”. Tesis de grado de Ing. Ambiental. Universidad Católica Boliviana San Pablo.
- [11] Stolp, H. 1988. *Microbial ecology: organisms, habitats, activities*. Cambridge Studies in Ecology. Cambridge University Press.
- [12] Suarez, G., 2009. “*Comparación y evaluación del efecto de sistemas de labranza cero y labranza convencional sobre parámetros edafoclimáticos y biológicos en cultivo de trigo (Triticum aestivum) en la Granja Modelo Pairumani*”. Tesis de grado de Ing. Ambiental. Universidad Católica Boliviana San Pablo.
- [13] Stadler-Kaulich, N. 2008. “*Un ensayo de agroforestería sucesional en el valle de Cochabamba/Bolivia, 2001 – 2009. La Implementación de una parcela de Agroforestería Sucesional con la especie primaria palta, 2006 - 2009*”, Cochabamba. RED ECO-SAF.
- [14] Stadler-Kaulich, N. 2010. *Producir en mismo tiempo de proteger los RRNN en el Valle de Cochabamba*. En: <http://ecosaf.org/informenoemi/Caracteristicas.MOLLESNEJTA_Abril.2010.pdf> (06/03/2013).
- [15] Vargas, I., Lawrence L., Eid M. 2000. *Árboles y arbustos para sistemas agroforestales de los valles interandinos de Santa Cruz, Bolivia*. Guía de campo. Fundación Amigos de la Naturaleza, Bolivia.
- [16] Villarroel, J. 1988. *Manual práctico para la interpretación de análisis de suelos en laboratorio*. Cochabamba. AGRUCO.
- [17] White, R.E. 1997. *Principles and Practice of Soil Science; The Soil as a Natural Resource*. 3rd. Ed. Blackwell Science.