

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS AGRÓNOMOS
DEPARTAMENTO DE PRODUCCIÓN VEGETAL

T E S I S D O C T O R A L

Efecto del residuo vegetal de Coffea canéfora Var. Robusta "cáscara de café" sobre las propiedades físicas del suelo y en la reducción de la escorrentía y erosión bajo lluvia simulada.

*Presentado por: Santos João Da Costa Quizembe
Dirigida por: Prof. Titular Dra. Sara Ibáñez Asensio*

2009

Universidad Politécnica de Valencia

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS AGRÓNOMOS

DEPARTAMENTO DE PRODUCCIÓN VEGETAL

T E S I S D O C T O R A L

Efecto del residuo vegetal de Coffea canéfora Var. Robusta "cáscara de café" sobre las propiedades físicas del suelo y en la reducción de la escorrentía y erosión bajo lluvia simulada.

Presentado por: Santos João Da Costa Quizembe
Dirigida por: Prof. Titular Dra. Sara Ibáñez Asensio

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi familia y a este país tan maravilloso, hermoso y lleno de esperanza que es Angola.

Agradecimientos

Mis agradecimientos más sinceros:

En primero lugar me gustaría agradecer a mi Tutora Dra. Sara Ibáñez Asensio Profesora Titular del Departamento de Producción Vegetal, Unidad Docente de Suelos de la Universidad Politécnica de Valencia, por dirigir este trabajo, por su plena disposición y dedicación durante el desarrollo de este proyecto.

En segundo lugar mis agradecimientos al Dr. Juan Gilbert Blanquer, Catedrático de la Universidad Politécnica Valencia, Unidad Docente de Suelos, por sus consejos y colaboración.

Mis profundos agradecimientos a Dr. Bernardo Pascual España, Catedrático y Jefe del Departamento de Producción Vegetal de la Universidad Politécnica de Valencia, por su apoyo y colaboración en todos los aspectos durante la estancia que estuve como becario en esta institución.

Mi agradecimiento a la Agencia Española de Cooperación Internacional (AECI) por darme la oportunidad de realizar estos estudios.

Mis agradecimientos a Héctor Ramón, Javier Roig, Ángel y Nuria por su inquebrantable colaboración y apoyo durante el desarrollo de este trabajo.

A mis amigos por escucharme y animarme a seguir adelante.

A mi familia por confiar en mí, por su paciencia e comprensión.

Al conjunto de profesores del departamento de producción vegetal de la Universidad Politécnica de Valencia que de una forma u otra han contribuido en mi formación académica.

RESUMEN

Es evidente el interés de buscar alternativas para combatir los efectos de erosión hídrica, uno de los factores de degradación de suelos, y lograr aumentar la capacidad de retención del agua y mejorar su fertilidad. Es por ello que se han llevado a cabo estudios de conservación de suelos en los que se evalúa la posibilidad de utilizar residuos agrícolas, haciendo experimentos con ellos para conocer su capacidad protectora y mejoradora del suelo.

En el presente trabajo se estudió la efectividad de la cáscara de café en el control de la erosión y como mejorador de las propiedades físicas del suelo. Para el presente estudio se elaboró un diseño experimental factorial 3x5x2 con 2 réplicas y un total de 60 tratamientos. Los tres factores en estudio fueron el suelo, la posición del residuo y el estado del terreno. Así, se estudiaron 5 suelos diferentes, uno franco-arenoso, uno franco-arcilloso y tres franco-arcillo-limoso, comparando en todos ellos los resultados obtenidos con el residuo en superficie y “enterrado”; en ambos casos el porcentaje de cubierta de suelo varió entre el 80 y el 85%. En cuanto al último factor, el estado del terreno, las evaluaciones se realizaron tanto en suelos con costra superficial como sin ella.

El procedimiento del experimento, que tuvo una duración de un año, consistió en preparar bandejas de simulación de lluvia con diferentes tipos de suelo y residuo vegetal, determinando las propiedades físicas y físico-químicas como parte de la caracterización de los suelos en estudio. En una primera fase (tratamientos sin costra), y tras un humedecimiento realizado dos días antes, las bandejas fueron expuestas a una lluvia simulada de 122 mm/h de intensidad durante 21 minutos, repartida en 7 intervalos de 3 minutos de duración cada uno. Estas condiciones permitieron el estudio del balance hídrico y de la pérdida de suelo a través de la determinación de la escorrentía, la cantidad de residuos arrastrados, el inicio de encharcamiento, el inicio de la escorrentía y la tasa de infiltración. Tras ello y durante el tiempo de desecación, se hicieron mediciones continuas de la humedad y de la resistencia a la penetración, al finalizar los seis meses se determinaron las propiedades físicas del suelo (estabilidad de los agregados, densidad aparente del suelo, conductividad hidráulica y la porosidad del suelo).

Seis meses después se iniciaría la segunda fase de la experiencia, una vez formada la costra superficial en todas las bandejas. La metodología sería la misma que en la fase

anterior: humedecimiento previo, simulación de lluvia, estudio del balance hídrico y de la pérdida de suelo, y medida de las propiedades físicas.

El análisis de los resultados demostró la efectividad de la cáscara de café en el control de la erosión y la escorrentía principalmente en tratamientos con residuo “enterrado”, siendo ésta muy inferior en suelos franco-arenosos. Además este trabajo demostró que la presencia de costra es un factor que reduce la influencia de la cáscara de café. El residuo vegetal fue muy efectivo al mejorar las propiedades físicas del suelo, principalmente en los tratamientos “enterrados” y sin costra. El estudio reveló la efectividad de la cáscara de café en retener la humedad del suelo y reducir la resistencia a la penetración. Además demostró la capacidad del método “enterrado” como la más recomendada para el posicionamiento del residuo vegetal en el suelo.

RESUM

És evident l'interès de cercar alternatives per a combatre els efectes de l'erosió hídrica, un dels factors de degradació de sòls, i aconseguir augmentar la capacitat de retenció de l'aigua i millorar-ne la fertilitat. És per això que s'han portat a terme estudis de conservació de sòls en què s'avalua la possibilitat d'utilitzar residus agrícoles, fent-hi experiments per a conèixer-ne la capacitat protectora i de millora del sòl.

En aquest treball s'ha estudiat l'efectivitat de la pela de cafè en el control de l'erosió i com a milloradora de les propietats físiques del sòl. Per a l'estudi s'ha elaborat un disseny experimental factorial 3 x 5 x 2 amb 2 rèpliques i un total de 60 tractaments. Els tres factors en estudi han sigut el sòl, la posició del residu i l'estat del terreny. Així, s'han estudiat 5 sòls diferents, un de francoarenós, un de francoargilós i tres de francoargil-lollimós, i s'han comparat en tots aquests els resultats obtinguts amb el residu en superfície i "enterrat". En tots dos casos, el percentatge de cobertura de sòl varia entre el 80 i el 85%. Pel que fa a l'últim factor, l'estat del terreny, les avaluacions s'han fet tant en sòls amb crosta superficial com sense.

El procediment de l'experiment, que ha tingut una durada d'un any, ha consistit a preparar safates de simulació de pluja amb diferents tipus de sòl i residu vegetal, per a determinar les propietats físiques i fisicoquímiques com a part de la caracterització dels sòls en estudi. En una primera fase (tractaments sense crosta), i després d'un humitejament realitzat dos dies abans, les safates han sigut exposades a una pluja simulada de 122 mm/h d'intensitat durant 21 minuts, repartida en 7 intervals de 3 minuts de durada cadascun. Aquestes condicions han permès l'estudi del balanç hídric i de la pèrdua de sòl a través de la determinació del vessament, la quantitat de residus arrossegats, l'inici d'embassada, l'inici del vessament i la taxa d'infiltració. Després d'això i durant el temps de dessecació, s'han fet mesuraments continus de la humitat i de la resistència a la penetració; en acabar els sis mesos, s'han determinat les propietats físiques del sòl (estabilitat dels agregats, densitat aparent del sòl, conductivitat hidràulica i porositat del sòl).

Sis mesos després, s'inicia la segona fase de l'experiència, una vegada formada la crosta superficial en totes les safates. La metodologia és la mateixa que en la fase anterior: humitejament previ, simulació de pluja, estudi del balanç hídric i de la pèrdua de sòl, i mesura de les propietats físiques.

L'anàlisi dels resultats ha demostrat l'efectivitat de la pela de cafè en el control de l'erosió i el vessament, principalment en tractaments amb residu "enterrat", i que aquesta és molt inferior en sòls francoarenosos. A més, aquest treball ha demostrat que la presència de crosta és un factor que redueix la influència de la pela de cafè. El residu vegetal ha sigut molt efectiu en millorar les propietats físiques del sòl, principalment en els tractaments "enterrats" i sense crosta. L'estudi ha revelat l'efectivitat de la pela de cafè per a retenir la humitat del sòl i reduir la resistència a la penetració. A més, ha demostrat la capacitat del mètode "enterrat" com el més recomanat per al posicionament del residu vegetal en el sòl.

SUMMARY

It is clear that we must look for alternative ways to combat the effects of hydric erosion, which is one of the factors of soil degradation, and, in this way, increase the water retention capacity and improve fertility. This is why soil conservation studies have been conducted. These studies assess the possibility of using agricultural waste, experimenting with it in order to determine its capacity to protect and improve soil.

In this study the effectiveness of coffee bean husks in controlling erosion and improving the physical properties of soil was assessed. A 3x5x2 factorial experimental design with 2 reruns and a total of 60 treatments was elaborated. The three study factors were soil, waste position and state of the land. Thus, five different kinds of soil were studied: one sandy loam soil, one clay loam soil and three clay-silt loam soils, comparing in all of them the results obtained with surface and “buried” waste. In both cases the soil coverage percentage varied between 80% and 85%. In the case of the state of the land, the assessments were carried out on soils with both surface crusting and without surface crusting.

In order to perform this experiment, which lasted one year, rain simulation trays were prepared with different types of soil and vegetal waste. The physical and physical-chemical properties were taken into consideration for the characterization of the soil to be studied. In the first stage (treatments with no crusting), the soil was moistened two days before the start of the experiment and the trays were exposed to simulated rain at 122 mm/h rainfall intensity for 21 minutes divided into 7 intervals of three minutes each. These conditions permitted the study of the hydric balance and soil loss through the determination of runoff, the amount of dragged waste, the start of ponding, the start of runoff and the infiltration rate. After that, during desiccation time, moisture and penetration resistance were continuously measured. At the end of the six months the physical properties of the soil were determined (aggregates stability, apparent soil density, hydraulic conductivity and soil porosity).

Six months later, after the surface crust had formed in all the trays, the second stage of the experiment was initiated. The methodology was the same as in the first stage: premoistening, rain simulation, study of hydric balance and of soil loss and measurement of the physical properties.

The analysis of the results showed the effectiveness of coffee bean husks in controlling erosion and runoff, mainly in treatments with “buried” waste where runoff was lower in sandy loam soil. Besides, this study showed that the presence of crusting reduces

the influence of coffee bean husks. The vegetal waste was very effective since it improved the physical properties of the soil, especially in “buried” treatments and treatments without a crust. The study showed the effectiveness of coffee bean husks in retaining soil moisture and in reducing penetration resistance. Moreover, it showed the capacity of the “buried” method as the most recommendable for the positioning of the vegetal waste in the soil.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	12
1.1 ANGOLA. CLIMA, AGRICULTURA Y DEGRADACIÓN DE TIERRAS	12
1.1.1 Generalidades.....	12
1.1.2 Aspectos climáticos.....	13
1.1.3 El desarrollo de la agricultura.....	15
1.1.4 Caracterización de los suelos.....	17
1.1.5 Degradación, desertificación y sequía.....	20
1.2 RESIDUO VEGETAL “CÁSCARA DE CAFÉ” COMO MEJORADOR DEL SUELO..	22
1.2.1 Generalidades.....	22
1.2.2 Estructura y composición.....	23
1.2.3 Procesamiento.....	25
1.2.4 Usos alternativos de los residuos y subproductos del café.....	26
1.3 IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE LA CÁSCARA DE CAFÉ Y SUBPRODUCTOS PARA ANGOLA.....	29
1.3.1 El suelo como sumidero de carbono de los subproductos de café.....	31
1.4 OBJETIVO DEL ESTUDIO	32
2 ANTECEDENTES.....	34
2.1 DEGRADACIÓN DE LOS SUELOS	34
2.1.1 Generalidades.....	34
2.1.2 Degradación de los suelos en el mundo.....	34
2.1.3 Caracterización de las zonas áridas.....	37

2.2	PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO	38
2.2.1	Generalidades	38
2.2.2	Desarrollo físico del sistema radicular	39
2.2.2.1	Aireación.....	40
2.2.2.2	Régimen térmico del suelo.....	42
2.2.2.3	Propiedades dinámicas de los suelos	46
2.2.2.3.1	Resistencia a la penetración	46
2.2.3	Estructura del suelo	47
2.2.3.1	Niveles de organización estructural.....	47
2.2.3.1.1	Mecanismo de formación de los agregados	48
2.2.3.2	Estabilidad de los agregados	50
2.2.3.3	Densidad real.....	51
2.2.3.4	Densidad aparente	51
2.2.3.5	Porosidad.....	53
2.2.3.6	Compactación.....	54
2.2.3.7	Sellado y enconstramiento	55
2.2.3.7.1	Concepto y procesos	55
2.2.3.7.2	Método de estudio y preedición del riesgo	58
2.2.3.7.3	Prácticas de prevención.....	60
2.2.4	Textura del suelo	60
2.2.5	Propiedades hidráulicas del suelo	62
2.2.5.1	Conductividad hidráulica.....	62
2.2.5.2	Infiltración.....	65
2.3	EL AGUA DEL SUELO	67
2.3.1	Generalidades.....	67
2.3.2	Humedad del suelo	68
2.3.3	Métodos de medición	70
2.3.3.1	Técnica de reflectometría en dominio de tiempo	70
2.3.3.1.1	Principios y descripción del método tdr.....	71
2.3.4	Descripción de otros métodos	72
2.3.5	Comparación de los métodos	74

2.4	EROSIÓN HÍDRICA.....	75
2.4.1	Generalidades.....	75
2.4.2	Factores de la erosión hídrica.....	75
2.4.2.1	Agresividad de la lluvia.....	75
2.4.2.2	Erosionabilidad del suelo.....	76
2.4.2.3	Vegetación.....	77
2.4.2.4	Pendiente.....	78
2.4.3	Metodología de evaluación.....	78
2.4.3.1	Medición directa en el campo.....	80
2.4.3.2	Parcelas experimentales y el simulador de lluvia.....	80
2.4.3.3	Predicción a partir de modelos.....	83
2.5	TÉCNICAS DE CONSERVACIÓN DE SUELOS.....	89
2.5.1	Generalidades.....	89
2.5.2	Clasificación de las técnicas de conservación de suelo.....	90
2.5.2.1	Medidas agronómicas.....	91
2.5.2.2	Medidas de manejo de suelo.....	95
2.5.2.3	Métodos mecánicos.....	96
3	MATERIALES Y MÉTODOS.....	98
3.1	CARACTERIZACIÓN DE LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS DEL MEDIO.....	98
3.1.1	Temperatura del medio.....	99
3.1.2	Evaporación.....	99
3.2	UNIDADES EXPERIMENTALES.....	100
3.2.1	Características de las bandejas de erosión.....	100
3.2.2	Caracterización de los cinco tipos de suelo.....	102
3.2.2.1	Análisis de las propiedades químicas de los suelos estudiados.....	102
3.2.2.1.1	Extracto de saturación.....	102
3.2.2.1.2	Potencial de hidrogeno (ph).....	102
3.2.2.1.3	Calcio y magnesio.....	103

3.2.2.1.4	Potasio y sodio.....	104
3.2.2.1.5	Porcentaje de caliza	104
3.2.2.1.6	Conductividad eléctrica.....	105
3.2.2.2	Evaluación de las propiedades físicas.....	106
3.2.2.2.1	Materia orgánica	106
3.2.2.2.2	Textura, análisis granulométrico	107
3.2.2.2.3	Estabilidad de los agregados	109
3.2.2.2.4	Porosidad.....	109
3.2.2.2.5	Densidad aparente.....	110
3.2.2.2.6	Conductividad hidráulica	110
3.2.3	Cáscara de café.....	111
3.3	SIMULADOR DE LLUVIA. CARACTERIZACIÓN	112
3.3.1	Componentes del simulador.....	113
3.3.2	Características del gotero.....	115
3.3.2.1	Tamaño de las gota	115
3.3.2.2	Velocidad de las gotas	116
3.3.3	Caracterización de la lluvia simulada.....	117
3.3.3.1	Cantidad de lluvia.....	117
3.3.3.2	Intensidad de la lluvia.....	117
3.3.3.3	Cantidad de movimiento y energía cinética.....	119
3.4	DISEÑO EXPERIMENTAL	120
3.4.1	Descripción del diseño experimental.....	120
3.4.2	Procedimiento	122
3.4.2.1	Balance hídrico y la pérdida de suelo.....	124
3.4.2.1.1	Medición de la pérdida de suelo.....	124
3.4.2.1.2	Escorrentía.....	124
3.4.2.1.3	Infiltración.....	125
3.4.2.2	Proceso de humectación – desecación. evaluaciones y cuantificación	125
3.4.2.2.1	Capacidad de campo y punto de marchitamiento.....	125
3.4.2.2.2	Determinación del contenido de agua del suelo	126

3.4.2.2.3	Resistencia a la penetración	127
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	129
4.1	Análisis de las condiciones climáticas del medio	129
4.2	UNIDADES EXPERIMENTALES.....	130
4.2.1	Estudio de los suelos	130
4.2.1.1	Caracterización de las propiedades físico-químicas.....	130
4.2.1.2	Los suelos de las zonas cafeteras de Angola y su relacion con los suelos estudiados en la experiencia.....	133
4.2.1.3	Análisis de la influencia del residuo sobre las propiedades físicas de los suelos.....	134
4.2.1.3.1	Estabilidad de los agregados	134
4.2.1.3.2	Porosidad.....	137
4.2.1.3.3	Densidad aparente.....	140
4.2.1.3.4	Conductividad hidráulica	143
4.2.1.4	Análisis de la influencia del residuo sobre el balance hídrico	146
4.2.1.4.1	Influencia sobre la pérdida del suelo	146
4.2.1.4.2	Influencia sobre la escorrentía.....	150
4.2.1.4.2.1	Análisis de las variables residuos arrastrados, inicio de encharcamiento e inicio de escorrentía	153
4.2.1.4.3	Efecto sobre la tasa de infiltración.....	156
4.2.1.5	Análisis del proceso de humectación- desecación	159
4.2.1.5.1	Humedad del suelo	159
4.2.1.5.2	Resistencia a la penetración	163
4.2.2	Influencia de las técnicas de conservación	166
4.2.2.1	Análisis general de los métodos de aplicación del residuo vegetal en las variables estudiadas	166
5	CONCLUSIONES.....	168

6	BIBLIOGRAFÍAS	171
7	ANEXOS	202

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO I: TABLAS Y GRAFICAS DE LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS DE ANGOLA

<i>Anexo I.1: Temperatura del suelo a la profundidad de 0,20 m.....</i>	<i>202</i>
<i>Anexo I.2: Temperatura del suelo a la profundidad de 0,50 m.....</i>	<i>202</i>
<i>Anexo I.3: Temperatura del suelo a la profundidad de 1,00 m.....</i>	<i>203</i>
<i>Anexo I.4: Valores medios de temperaturas máximas.....</i>	<i>203</i>
<i>Anexo I.5: Valores medios de temperaturas mínimas.....</i>	<i>204</i>
<i>Anexo I.6: Numero de días de precipitación.....</i>	<i>205</i>
<i>Anexo I.7: Evaporación Piche.....</i>	<i>206</i>
<i>Anexo I.8: Evapotranspiración potencial calculada.....</i>	<i>207</i>
<i>Anexo I.9: Evaporación tina clase A.....</i>	<i>208</i>
<i>Anexo I.10: Temperatura media anual.....</i>	<i>209</i>
<i>Anexo I.11: Precipitación media anual.....</i>	<i>210</i>

ANEXO II: GRAFICAS DE LA DETERMINACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA

<i>Anexo II.1: Distribución de la energía cinética y porcentaje acumulado.....</i>	<i>211</i>
--	------------

ANEXO III: BALANCE HÍDRICO Y PÉRDIDA DE SUELO

<i>Anexo III.1. Cuantificación de los parámetros evaluados en la simulación de lluvia (s. sin costra).....</i>	<i>212</i>
<i>Anexo III.2. Cuantificación de los parámetros evaluados en la simulación de lluvia (s. con costra).....</i>	<i>213</i>
<i>Anexo III.3. Variables dependientes de la escorrentía.....</i>	<i>214</i>
<i>Anexo III.4. Dinámica de la infiltración durante el experimento.....</i>	<i>215</i>

<i>Anexo III.5. Tasa de infiltración estimada con la ecuación de Horton.....</i>	<i>215</i>
<i>Anexo III.6 Dinámica de la pérdida de suelo durante el experimento.....</i>	<i>216</i>
<i>Anexo III.7. Dinámica de la concentración durante el experimento.....</i>	<i>216</i>
<i>Anexo III.8. Dinámica de la escorrentía durante el experimento.....</i>	<i>217</i>
<i>Anexo III.9. Cuantificación de los valores de escorrentía.....</i>	<i>218</i>
<i>Anexo III.10. Cuantificación de los valores de escorrentía.....</i>	<i>219</i>
<i>Anexo III.11. Cuantificación de los valores de escorrentía.....</i>	<i>220</i>
<i>Anexo III.12. Cuantificación de los valores de pérdida de suelo.....</i>	<i>221</i>
<i>Anexo III.13. Cuantificación de los valores concentración.....</i>	<i>222</i>
<i>Anexo III.14. Cuantificación de los valores de pérdida de suelo.....</i>	<i>223</i>
<i>Anexo III.15. Infiltración (l).....</i>	<i>224</i>
<i>Anexo III.16. Infiltración (mm).....</i>	<i>225</i>
<i>Anexo III.17. Infiltración (mm/h).....</i>	<i>226</i>

ANEXO IV: ANÁLISIS DE REGRESIÓN

<i>Anexo IV.1. Valor estimado de la tasa de infiltración (K_p) por la ecuación de regresión de Philip....</i>	<i>227</i>
<i>Anexo IV.2. Valor estimado de la tasa de infiltración (K) por la ecuación de regresión de Horton....</i>	<i>228</i>

ANEXO V: AJUSTE DE LA TASA DE INFILTRACIÓN CON LAS ECUACIONES DE REGRESIÓN DE PHILIP Y HORTON

ANEXO VI: ESTUDIO DE LA HUMEDAD DEL SUELO (5 cm de profundidad)

<i>Anexo VI.1. Medición de la humedad a los 5 cm. de profundidad en el suelo 1.....</i>	<i>242</i>
<i>Anexo VI.2. Medición de la humedad a los 5 cm. de profundidad en el suelo 2.....</i>	<i>242</i>
<i>Anexo VI.3. Medición de la humedad a los 5 cm. de profundidad en el suelo 3.....</i>	<i>243</i>
<i>Anexo VI.4. Medición de la humedad a los 5 cm. de profundidad en el suelo 4.....</i>	<i>243</i>
<i>Anexo VI.5. Medición de la humedad a los 5 cm. de profundidad en el suelo 5.....</i>	<i>243</i>

ANEXO VII: ESTUDIO DE LA HUMEDAD DEL SUELO (10 cm de profundidad)

<i>Anexo VII.1. Medición de la humedad a los 10cm de profundidad en el suelo 1.....</i>	<i>244</i>
<i>Anexo VII.2. Medición de la humedad a los 10cm de profundidad en el suelo 2.....</i>	<i>244</i>
<i>Anexo VII.3. Medición de la humedad a los 10 cm de profundidad en el suelo 3.....</i>	<i>245</i>
<i>Anexo VII.4. Medición de la humedad a los 10 cm de profundidad en el suelo 4.....</i>	<i>245</i>
<i>Anexo VII.5 Medición de la humedad a los 10 cm de profundidad en el suelo 5.....</i>	<i>245</i>

ANEXO VIII: RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN

Anexo VIII.1. Medición de la resistencia a la penetración en el suelo 1.....246
Anexo VIII.2. Medición de la resistencia a la penetración en el suelo 2.....246
Anexo VIII.3. Medición de la resistencia a la penetración en el suelo 3.....247
Anexo VIII.4. Medición de la resistencia a la penetración en el suelo 4.....247
Anexo VIII.5. Medición de la resistencia a la penetración en el suelo 5.....247

**ANEXO IX: RESUMEN ESTADÍSTICO DEL EFECTO DE LA POSICIÓN
DEL RESIDUO VEGETAL EN RELACIÓN AL TIPO DE SUELO
Y ESTADO DEL SUELO**

Anexo IX.1. Variación de la escorrentía en relación al residuo vegetal y el tipo del suelo.....248
Anexo IX.2. Variación de la escorrentía en relación al residuo vegetal y al estado del suelo248
Anexo IX.3. Variación de la pérdida del suelo en relación al residuo vegetal y el tipo del suelo...249
Anexo IX.4. Variación de la pérdida del suelo en relación al residuo vegetal y el est. del suelo...249
Anexo IX.5. Variación de la pérdida del suelo en relación al residuo vegetal y el est. de suelo....250
Anexo IX.6. Variación de la pérdida del suelo en relación al residuo vegetal y el est. de suelo250

ANEXO X: PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO

Anexo X.1. Variación de la estabilidad de los agregados.....251
Anexo X.2. Variación de la densidad aparente.....251
Anexo X.3. Variación de la conductividad hidráulica.....252
Anexo X.4. Variación de la porosidad del suelo.....252
Anexo X.5. Valores de las propiedades físicas estudiadas en suelo sin costra.....253
Anexo X.6. Valores de las propiedades físicas estudiadas en suelo con costra.....254

**ANEXO XI: IMÁGENES DEL DESARROLLO DE LA VEGETACIÓN
ESPONTÁNEA Y LA COSTRA**

*Anexo XI.1. Comparación del desarrollo de la vegetación espontánea 5 meses después de la simulación
de lluvia en los tratamiento sin formación de encostramiento.....255*
*Anexo XI.2. Comparación del desarrollo de la vegetación espontánea 5 meses después de la
simulación de lluvia en los tratamiento con formación de encostramiento.....260*
Anexo XI.3. Encostramiento en los tratamientos.....265

ANEXO XII: FICHAS DE CAMPO

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Caracterización de las condiciones climáticas de Angola.....</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 2. Distribución de los suelos de Angola.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 3. Composición química de la pulpa de café.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 4. Distribución porcentual de las estructuras principales del café en cereza.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 5. Producción de café en África.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 6. Clasificación de la aireación del suelo.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 7. Granulometría y su comportamiento.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 8. Modelo cuantitativo de la evaluación directa e indirecta de la erosión.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 9. Diferencias entre las parcelas experimentales.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 10. Valores del LS según el rango de pendiente.....</i>	<i>88</i>
<i>Tablas 11y 12. Valores del factor P.....</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 13. Tipos de franja con relación a la pendiente del terreno, agente erosivo y cultivo a sembrar.....</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 14. Resumen de los valores calculados de la energía cinética.....</i>	<i>119</i>
<i>Tabla 15. Factores y niveles del diseño experimental.....</i>	<i>120</i>
<i>Tabla 16. Esquema del diseño experimental.....</i>	<i>121</i>
<i>Tabla 17. Textura de los suelos estudiados.....</i>	<i>132</i>
<i>Tabla 18. Análisis físico químico.....</i>	<i>131</i>
<i>Tabla 19. Análisis de las propiedades físicas a estudiar (antes de las evaluaciones).....</i>	<i>132</i>
<i>Tabla 20. Influencia de la estabilidad de los agregados en todos los niveles.....</i>	<i>136</i>
<i>Tabla 21. Análisis de varianza de la estabilidad de los agregados.....</i>	<i>137</i>
<i>Tabla 22. Influencia de la porosidad en todos los niveles de los factores.....</i>	<i>139</i>
<i>Tabla 23. Análisis de varianza de la porosidad.....</i>	<i>140</i>
<i>Tabla 24. Influencia de la densidad aparente en todos los niveles.....</i>	<i>142</i>
<i>Tabla 25. Análisis de varianza de la densidad aparente.....</i>	<i>143</i>
<i>Tabla 26. Influencia de la conductividad hidráulica en todos los niveles.....</i>	<i>145</i>
<i>Tabla 27. Análisis de varianza de la conductividad hidráulica.....</i>	<i>146</i>
<i>Tabla 28. Influencia de la pérdida de suelo en todos los niveles de los factores estudiados.....</i>	<i>148</i>
<i>Tabla 29. Análisis de varianza de la pérdida de suelo.....</i>	<i>149</i>
<i>Tabla 30. Influencia de la concentración en todos los niveles de los factores.....</i>	<i>149</i>
<i>Tabla 31. Análisis de varianza de la concentración.....</i>	<i>150</i>
<i>Tabla 32. Influencia de la escorrentía en todos los niveles de los factores estudiados.....</i>	<i>152</i>
<i>Tabla 33. Análisis de varianza de la escorrentía.....</i>	<i>152</i>
<i>Tabla 34. Influencia de las variables residuos arrastrados, inicio de encharcamiento y inicio de escorrentía.....</i>	<i>153</i>

Tabla 35. Análisis de varianza de las variables dependientes de la escorrentía.....	154
Tabla 36. Influencia de los parámetros evaluados: escorrentía, pérdida de suelo y tasa de infiltración.....	158
Tabla 37. Análisis de varianza de los parámetros evaluados: escorrentía, pérdida de suelo y tasa de infiltración.....	158
Tabla 38. Influencia de la humedad en todos los niveles de los factores estudiados.....	162
Tabla 39. Análisis de varianza de la humedad del suelo.....	162
Tabla 40. Influencia de la resistencia a la penetración en todos los niveles de los factores estudiados ..	165
Tabla 41. Análisis de varianza de la resistencia a la penetración	165

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de Angola.....	13
Figura 2. Principales regiones de producción agropecuaria.....	16
Figura 3. Representación geográfica de los suelos de Angola.....	20
Figura 4. Estructura del café.....	24
Figura 5. Frutos, granos y la cáscara.....	24
Figura 6. Producción de café robusta y arabica.....	30
Figura 7. Causas de la degradación de suelos.....	36
Figura 8. La conductividad térmica en diferentes componentes del suelo.....	45
Figura 9. Fenómeno de atracción –repulsión de las arcillas para la formación de los agregados.....	48
Figura 10. Efecto del espesor de la costra sobre la resistencia mecánica y la velocidad de infiltración en suelo franco limoso y arcilloso.....	58
Figura 11. Efecto de la infiltración acumulada sobre un Suelo con o sin encostramiento.....	66
Figura 12. Efecto de la textura sobre la infiltración del agua.....	66
Figura 13. Monograma para la determinación del valor (K).....	87
Figura 14. Estrategia para la conservación de suelos en tierras cultivadas.....	90
Figuras 15. Equipo de adquisición de datos instalado en el invernadero.....	98
Figura 16. Evaporimetro utilizado en la experiencia.....	100
Figura 17. Las bandejas de erosión.....	101
Figura 18. Mesa de erosión.....	101
Figura 19. Estimación del porcentaje de cobertura.....	112
Figura 20. Simulador de lluvia.....	113

Figura 21. Deposito de agua.....	114
Figura 22. Agitador mecánico.....	114
Figuras 23. Parilla portagotero y gotero autocompensante.....	115
Figura 24. Distribución del diámetro de las gotas.....	116
Figura 25. Distribución del la velocidad del simulador.....	117
Figura 26. Determinación de la intensidad de la lluvia.....	118
Figura 27. Ficha técnica del experimento.....	123
Figura 28. Theta probe ML2x y Wet-2.....	127
Figura 29. El penetrómetro.....	128
Figura 30. Curva característica de humedad de los cinco suelos estudiados.....	132
Figura 31. Variación de la estabilidad de los agregados en relación al suelo y residuo vegetal.....	135
Figura 32. Variación de la estabilidad de los agregados en relación al tipo de suelo y est. de suelo.....	135
Figura 33. Variación de la porosidad en relación al tipo de suelo y la posición del residuo vegetal...	138
Figura 34. Variación de la porosidad en relación al tipo de suelo y estado de suelo.....	138
Figura 35. Variación de la densidad aparente en relación al tipo de suelo y residuo vegetal.....	141
Figura 36. Variación de la densidad aparente en relación al tipo de suelo y estado de suelo.....	141
Figura 37. Variación de la conductividad hidráulica en relación al tipo de suelo y residuo vegetal...	144
Figura 38. Variación de la conductividad hidráulica en relación al tipo de suelo y estado de suelo...	144
Figura 39. Variación de la pérdida de suelo en relación al tipo de suelo y residuo vegetal.....	147
Figura 40. Variación de la pérdida de suelo en relación al tipo de suelo y estado del suelo.....	147
Figura 41. Variación de la escorrentía en relación al tipo de suelo y residuo vegetal.....	151
Figura 42. Variación de la escorrentía en relación al tipo de suelo y estado del suelo.....	151
Figura 43. Comportamiento de los residuos arrastrados, inicio de encharcamiento y inicio de escorrentía en los tratamientos sin costra.....	155
Figura 44. Comportamiento de los residuos arrastrados, inicio de encharcamiento y inicio de escorrentía en los tratamientos con costra.....	155
Figura 45. Variación de la tasa de infiltración en relación al tipo de suelo y residuo vegetal.....	156
Figura 46. Variación de la tasa de infiltración en relación al tipo de suelo y estado de suelo.....	157
Figura 47. Variación de la humedad (5 cm) en relación al tipo de suelo y residuo vegetal.....	159
Figura 48. Variación de la humedad (10 cm) en relación al tipo de suelo y residuo vegetal.....	160
Figura 49. Variación de la humedad (5cm) en relación al tipo de suelo y estado de suelo	160
Figura 50. Variación de la humedad (10cm) en relación al tipo de suelo y estado de suelo	161
Figura 51. Variación de la resistencia a la penetración en relación al tipo de suelo y res. vegetal ...	163
Figura 52. Variación de la resistencia a la penetración en relación al tipo de suelo y estado de suelo.....	164

1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANGOLA. CLIMA, AGRICULTURA Y DEGRADACIÓN DE TIERRAS

1.1.1 GENERALIDADES

Angola ocupa un amplio territorio en el continente africano con una superficie de 1 246 700 Km². Esta comprendida entre los paralelos 5° y 18° de latitud sur y los meridianos 11° y 24°, con 15 millones de habitantes aproximadamente. Presenta una gran diversidad de los aspectos fisiográficos y ecológicos, comprende una superficie litoral de 1 500 Km, el interior del país presenta altitudes entre 1 200 y 1 700 m. el 73% de territorio se sitúa en una altitud de 1 000 m (Diniz, 1998). Situada en la zona intertropical de África, con varias condiciones climáticas desde las grandes forestas densas hasta las dunas del desierto, comprende gran biodiversidad. Se estima que existe entre 5 000 y 8 000 especies de plantas de las cuales 1 260 son endémicas, la diversidad de mamíferos y aves es una de las mas ricas del continente con 275 á 900 especies registradas. El país tiene un gran potencial de recursos hídricos; con 10 cuencas hidrográficas se estima que más del 80% del agua se desagua en el mar por falta de grandes infraestructuras para su aprovechamiento.

estación seca y fresca y un máximo de 160 a 180 mm⁻¹ mes en la estación lluviosa y calida.

Tipo climático (Thornthwaite)	Indice hídrico	Área (km²)	% do total
Árido (E)	- 60 a - 40	62 320	4,99
Semi-árido (D)	- 40 a - 20	174 200	13,97
Sub-húmedo seco (C1)	- 20 a 0	152 300	12,22
Sub-húmedo chuvoso (C2)	0 a 20	144 920	11,62
Húmedo (B1)	20 a 40	441 980	35,46
Húmedo (B2)	40 a 60	232 110	18,61
Húmedo (B3)	60 a 80	33 520	2,70
Húmedo (B4)	80 a 100	5350	0,43
	TOTAL	1 246 700	100,00

Tabla 1. Caracterización de las condiciones climáticas de Angola. Fuente: Diniz (1998).

En Angola existe una estación de lluvia corta, que va de febrero a abril. Los veranos son calientes y secos, los inviernos son templados. Las tierras altas del interior del país tienen un clima ligeramente frío con una estación de lluvias que va de noviembre a abril, después una estación de sequía con temperaturas no muy altas de mayo hasta octubre. Las precipitaciones en las provincias del norte (clima tropical húmedo) se producen durante casi todo el año y varían de 750 a 1 500 mm/año. En el clima tropical seco (semi- árida) la pluviométrica es menor a 1 000 mm/año, y mientras que en la zona desértica las precipitaciones alcanzan valores máximos a 100 mm/año.

La temperatura media disminuye de norte al sur. Las regiones mas caliente están cerca del litoral debido a pocas precipitaciones. En el norte de Cabinda hasta Kwanza Sur la temperatura varía de 23-24 °C. La influencia de la corriente fría de Benguela y el relieve hacen variar la temperatura en las regiones situadas cerca de la franja litoral. En la zonas de mayor altitud la temperatura varía de 17 a 20°C, en el interior y sur del país la temperatura varia de 21-22 °C (Ucuahamba et al., 2006). Otros datos referentes a la s condiciones climáticas de Angola se ven reflejadas en anexo I.

1.1.3 EL DESARROLLO DE LA AGRICULTURA

El país tiene una área total de 124,67 millones de hectáreas de las cuales hay 8 millones de hectáreas arables, hasta el momento se realizan labores agrícolas en más de 3,2 millones de ha, las zonas forestales ocupan una extensión de 53,4 millones de ha. Hay cinco zonas agrícolas: la zona norte que tiene como cultivo básico la yuca. La zona centro-sur (Kwanza sur, Benguela, Huambo, y el norte de Huila) es la área rural más poblada con una población estimada en 8 millones de personas. La zona este (Lunda sur, Moxico y Cuando Kubango) tiene una baja concentración de poblaciones, los cultivos básicos son yuca, alubias y arroz; la zona costera de norte a sur tiene una actividad diversificada (agricultura, pesca, etc.); y posteriormente la zona sur (Cunene, Namibe y sur de Huila) que se destaca en la producción de sorgo (MINADER y FAO, 2003).

El cultivo del café se extiende en el noroeste del país. Las grandes producciones se sitúan en la provincia de Uije y representa una fuente de empleo a gran parte de las poblaciones de estas zonas.

Las líneas de orientación para el relanzamiento del sector agropecuario como objetivo de satisfacer las necesidades alimentarias y reactivar la economía rural son:

- Rehabilitación y construcción de canales de irrigación agrícola;
- Divulgación agrícola y extensión rural;
- Producción y multiplicación de semillas;
- Investigación básica y aplicada en el dominio de la agropecuaria;
- Formación técnico - profesional;
- Fomento de la producción agropecuaria y forestal.

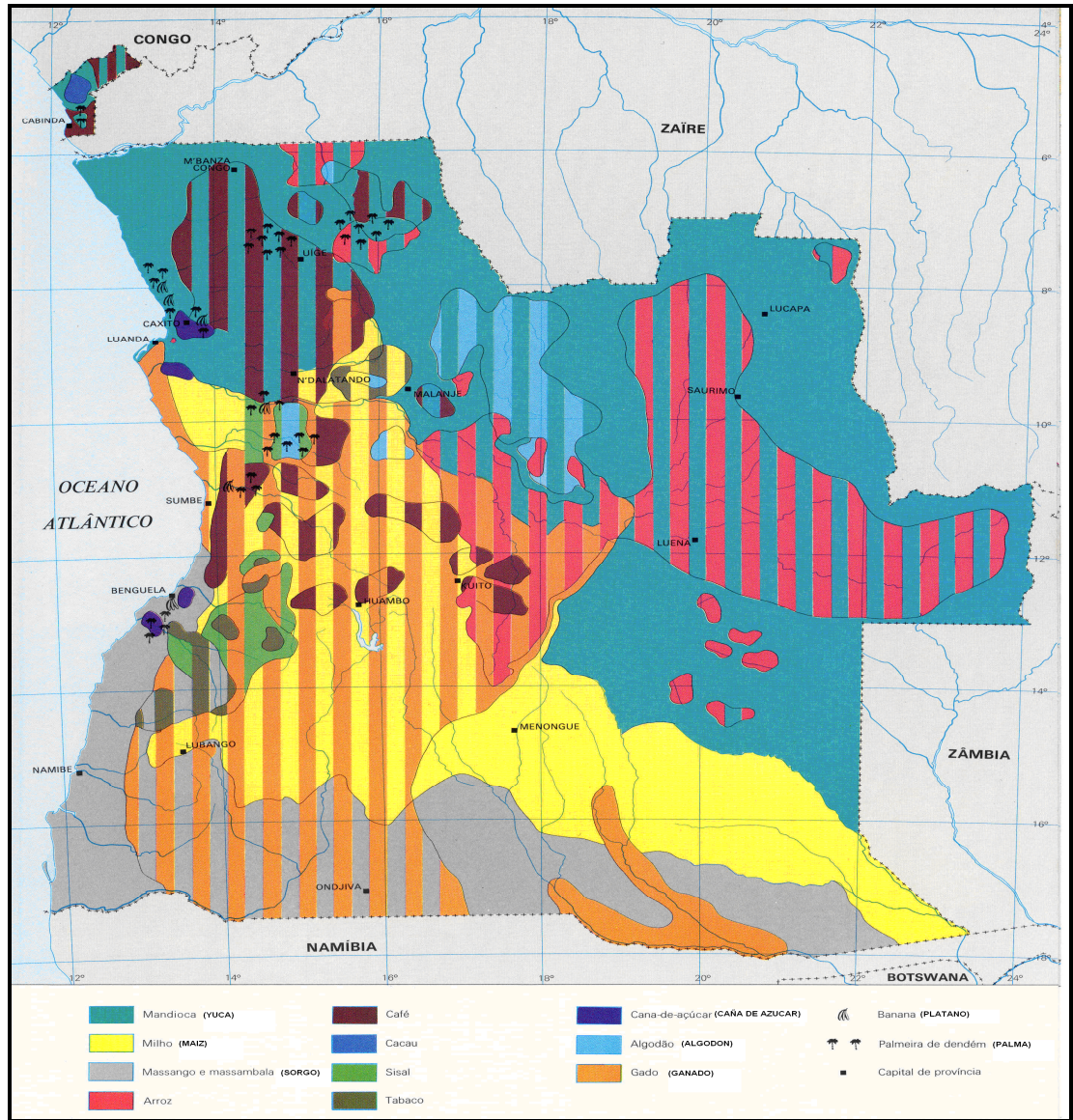


Figura 2. Principales regiones de producción agropecuaria. Fuente: Atlas geográfica de Angola (1985).

La producción de cereales en el año 2004-2005 fue de 880 900 toneladas en todo el país. El incremento de los rendimientos es notable a medida que van pasando los años, hasta satisfacer las necesidades totales de las poblaciones, y establecer un sistema de reserva alimentaria, disminuyendo de esta forma las importaciones. Aunque hay todavía grandes dificultades en el sistema de distribución de los mismos. En 2004 - 2005 solo el sector familiar tenía 3 207 483 hectáreas sembradas en todo el país, cifra que se va incrementando desde que terminó la guerra civil en 2002.

Actualmente se está llevando a cabo un trabajo serio en la construcción y rehabilitación de redes viarias (hay 7 000 Km. de carreteras) para facilitar el transporte de productos agropecuarios, circulación de personas etc.

1.1.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS

En la carta generalizada de suelos de Angola se encuentran los siguientes órdenes según el sistema de clasificación del departamento de agricultura de EE.UU. (USDA): Entisoles, Oxisoles, Inceptisoles, Aridisoles, Alfisoles, Ultisoles, Vertisoles. En la Tabla 2 se puede observar el área que ocupa y sus respectivos porcentajes según la clasificación de la FAO (1988), a continuación se describe los cuatro principales órdenes según los estudios realizados en Angola por Diniz (1989):

Entisoles:

Se caracterizan por ser pocos evolucionados con epipedón ochrico y solo algunos como histico y albico. En Angola estos ocupan más de 57,46 % de todo el territorio, ellos se caracterizaron por ser suelos con textura gruesa, arenoso o franco-arenoso, relacionados con materiales cuarzosos más o menos sueltos, muy gruesos. Pedogenéticamente poco evolucionados, de perfil AC o A (B) C, o todavía ABC, sin o con horizontes A1 más o menos presente, color pardo pálido y menos veces crómico. En general sin horizonte A2, o francamente presente, frecuentemente con un horizonte (B) color amarillento a rojizo, y en algunos casos con horizonte B de acumulación de arcilla, por veces poco nítido. Este suelo se encuentra en la zona sur del país y domina una porción de la provincia de Luanda y Cabinda. Son suelos que se relacionan con depósitos arenosos de cobertura. En la clasificación pedológica de la FAO - UNESCO (1988) son los Arenosoles.

En este orden también están los suelos situados en las márgenes de los ríos, en la franja litoral donde forman llanuras aluviales de extensión apreciable con suelos sin horizonte genético bien definido, formado por depósito de sedimentos aluviales que son los Fluvisoles y Leptosoles (clasificación pedológica de la FAO – UNESCO, 1988). Este último es un suelo poco evolucionado con roca consolidada poco o nada meteorizada, menos de 15/20 cm. de profundidad, frecuentemente con pedregosidad, se distingue un horizonte A1 más o menos visible.

Oxisoles:

Son suelos minerales de las zonas tropicales calidas y húmedas que han sido sometidas en intensos y prolongados procesos de meteorización y lavado. Presentan un régimen de humedad que abarca desde el arídico hasta el perúdico. Se desarrolla en zonas donde la precipitación sobrepasa la evapotranspiración en algunos periodos del año, esto favorece la remoción de los productos solubles de la meteorización, lo cual incide en la formación y concentración residual de caolinita y sesquióxidos, esenciales para la formación de un horizonte óxico (Gisbert, 2002). Ferralsoles, según la clasificación FAO-UNESCO (1988) representan 22,6% del territorio ocupando una superficie de 282 800 km² (Antonio et al., 2006). Son suelos minerales de perfil ABC, de horizonte B ferralítico, en general de textura fina o medianamente fina, frecuentemente crómico (coloración desde amarillo a rojo), constituido por minerales cauliníticos y óxido de hierro y aluminio, sin estructura o levemente estructurados en agregados granulosos, en general de consistencia friable, con grado de saturación en bases inferior a 50 % y capacidad de cambio catiónico inferior a 15 %, pudiendo presentar concreciones lateríticas dispersas en el perfil o concentrando en capas a profundidad variable, y a veces constituyendo bancadas mas o menos dura. Dominan los suelos con grado moderado de ferralitización en cuanto que los suelos ferralíticos típicos con Grado de ferratilización elevada están relacionados con las regiones mas húmedas, con determinado tipos de rocas muy favorables a una intensa alteración ferralítica. Estos suelos se localizan en zonas donde ya se verificó una profunda alteración pedogenética como en la provincia de Huambo, donde no es raro la presencia de materiales lateríticos a profundidades variables.

Clasificación FAO	Soil taxonomy USDA	Área (Km ²)	%
Dunas	-	3 732	0,30
Fluvisoles	Entisoles	9 635	0,77
Leptosoles y terrenos rocosos	Entisoles/Inceptisoles	64 474	5,17
Arenosoles	Entisoles	716 248	57,46
Calcisoles y cambisoles	Inceptisoles	9 008	0,72
Vertisoles	Vertisoles	11 176	0,90
Calsisoles, gypsisoles y solonetz	Aridisoles	60 095	4,82
Luvisoles cálcicos	Alfisolos	5 916	0,47
Alisoles	Ultisoles	7 060	0,57
Lixisoles	Alfisolos	40 283	3,22
Nitisoles	Ultisoles/alfisolos	46 875	3,77
Ferralsoles	Oxisoles	268 897	21,57
Gleysoles	Inceptisoles	3 084	0,24
Arenas de playa	-	215	0,02
Total		1 246 700	100,00

Tabla 2. Distribución del suelo en todo el país y sus respectivos porcentajes. Fuente: Diniz (1989)

Inceptisoles:

Son suelos poco evolucionados más que los entisoles y menos que la mayoría de otros ordenes (media evolución) puede presentar cualquier epipedon aunque generalmente se trata de ochrico y úmbrico. El horizonte subsuperficial típico es cámbico acompañado a veces del cálcico (sin presencia de argillico, ni espódico, ni oxico). Su representación en Angola esta alrededor de 5,17 % según el estudio hecho por Diniz (1989) se caracterizan por ser suelos minerales de perfil AC, muy raro la presencia de horizontes A (B) C, originario de roca calcárea que se sitúan por debajo de 15 a 20 cm. de profundidad, hay presencia de proporciones variables de carbonato de calcio, con Grado de saturación en bases próximo a los 100 %, de textura fina con arcilla de tipo silíatica. En general son suelos de coloración parduzca, pudiendo ocurrir acumulación de carbonato de calcio además de su distribución en el perfil. Estos suelo tienen gran incidencia en la cuenca sedimentaria de Kwanza (noroeste del país), estos suelos corresponden a los Calcisoles y Cambisoles en la clasificación pedológica de la FAO-UNESCO (1988).

Aridisoles:

Son suelos de regiones áridas, casi siempre con regime de humedad arídico. En su mayoría presenta epipedon ochrico, y horizonte subsuperficial argillico, nátrico con frecuencia presentan horizonte producidos por la acumulación de sales cálcio, yésico y sálico y a veces con cementaciones petrocálcicas. En Angola su representación es de 4,82% según los estudios realizados Diniz (1989) se caracterizan por ser suelos mas o menos evolucionados, con perfiles A (B) C, o ABC, o AC de climas árido y semi-árido, con predominio de arcilla sialitica y minerales de tipo 2:1, elevado grado de saturación en bases y capacidad de cambio catiónico normalmente superior a 25 m.e. /100 g. Los suelos con horizonte (B) o B pueden o no presentar acumulación de carbonato de calcio y/o sulfato de calcio, o horizontes salinos, sódicos o sódico-salinos, en cuanto que en los perfiles AC ocurren en general acumulación de carbonato de calcio en los horizontes salinos, sodico o sodico-salinos. De coloración pardo-gris, pocas veces pardo-marrón, con bajos contenidos en materia orgánica, de espesores delgados a medios, no es rara la presencia de pedregosidad. Estos suelos tienen su representación en el sur y suroeste del territorio y en la franja litoral, relacionándose con sustrato rocoso gnéisico e granito-gnéisico, o todavía con sedimentos argilaceos de cretácico, en general con fuerte impregnación de calcáreo. Según la clasificación pedológica de la FAO-UNESCO (1988) corresponden a los Calsisoles, Gypsisoles y Solonetz.

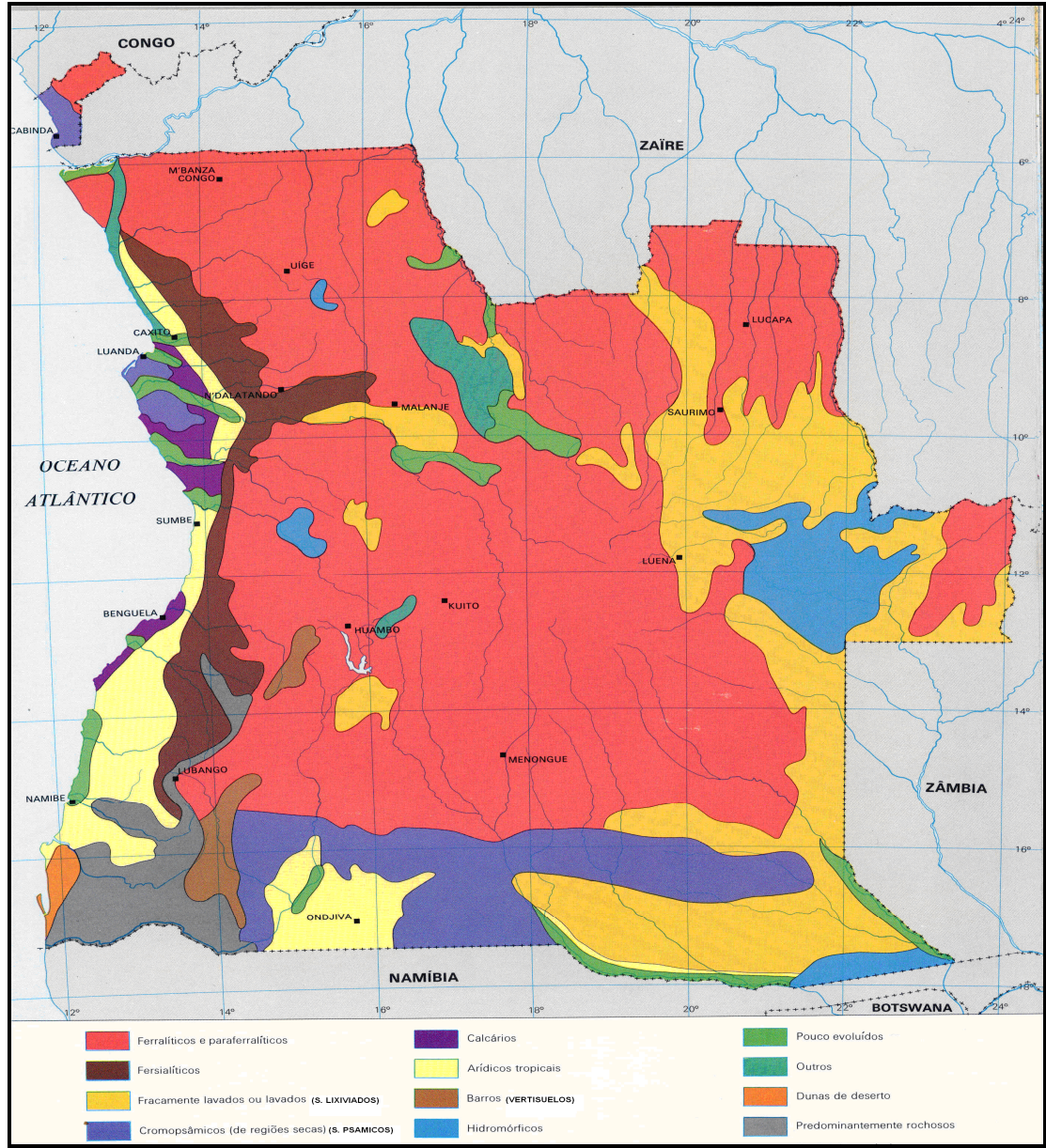


Figura 3. Representación geográfica de los suelos de Angola. Fuente: Atlas geográfica de Angola (1985).

1.1.5 DEGRADACIÓN, DESERTIFICACIÓN Y SEQUÍA

Entre los grandes problemas relacionados con la degradación de los suelos se identifican los siguientes:

- El sobre-pastoreo, como consecuencia provoca la erosión de los suelos, muy acentuado en el centro sur del país.

- La desertificación que va degradando tierras a medida que avanza, es un fenómeno que ocurre en el suroeste del país, precisamente en la provincia de Namibe.

- La deforestación, principalmente en la zona tropical húmeda, es la respuesta a la demanda de madera tropical y combustible fósil por parte de la población de las zonas rurales.

La erosión en cárcavas y barrancos “Badlands” nombre universal o “Ravinas” como es conocido en Angola, es un fenómeno erosivo derivado por la acción de la lluvia, es el estado más avanzado de la erosión en surcos. La erosión en surcos es la forma de erosión más fácilmente perceptible, tiene su origen a causa del escurrimiento superficial del agua que se concentra en sitios irregulares o depresiones superficiales del suelo desprotegido o trabajado inadecuadamente. En función de la pendiente y de la longitud de la ladera del terreno, el flujo concentrado de agua provoca el aumento de las dimensiones de los surcos formados inicialmente, hasta transformarse en grandes zanjas llamadas cárcavas.

En Angola existen “Ravinas” en las provincias de Cabinda, Zaire, Uige, Huambo, y Luanda con mayor incidencia en las provincias da Lunda Norte, Lunda Sul y Moxico.

La erosión por actividades agrícolas también se destaca como uno de los grandes problemas ambientales. Los sistemas tradicionales de producción contribuyen a la degradación de los suelos principalmente en el centro del país. La salinidad de los suelos en tierras irrigadas es un factor que provoca la degradación de los suelos, las provincias de Benguela y Luanda se destacan en este aspecto.

La desertificación aunque representa una pequeña porción del territorio, es un fenómeno que esta creciendo poco a poco. La falta de medidas de prevención a la disminución de su avance es notable. La zona desértica se sitúa en el litoral sur del país dentro de la zona árida donde las precipitaciones son inferiores a 100 mm/año. En esta zona se puede apreciar dunas formada por sedimentos movibles constituidos solamente por arena cuarzosa y otros aspectos que caracterizan la zona desértica. La necesidad de un estudio profundo para determinar las medidas necesarias para prevenir los suelos cultivables ante el avance del desierto es imprescindible.

Las escasas precipitaciones, el insuficiente aprovechamiento de los recursos hídricos, la falta de un programa eficiente para la construcción y gestión de infraestructuras hidrográficas como embalses, sistemas de irrigación etc. trae como consecuencia efectos desastrosos en el periodo de la sequía. La agricultura y la ganadería son los sectores mas afectados, como resultado de esto la baja productividad y la pérdida de cosecha, además de otras consecuencias de carácter social como la emigración de las

poblaciones. Las provincias de Namibe y Cunene son las más afectadas, con este fenómeno las producciones de cereales no sobrepasan los 300 Kg/ha, la previsión de cosecha es de 25% y se estima que cerca de 500 000 personas son afectadas por la sequía en esta zona.

1.2 RESIDUO VEGETAL “CÁSCARA DE CAFÉ” COMO MEJORADOR DEL SUELO

1.2.1 GENERALIDADES

El café es la segunda mercancía comercializada en el mundo, tras el petróleo se estima en 125 millones el número de personas que viven de este cultivo, incluyendo 25 millones de pequeños productores. Cada año se beben 400 000 millones de tazas de café. Casi la totalidad de la producción mundial de café es obtenida en zonas tropicales y subtropicales, en su mayoría en países en vías de desarrollo.

Hay varios estudios que destacan el efecto de diferentes tipos de cobertura vegetal para mejorar la calidad del suelo y controlar la degradación del mismo. Ha habido un gran interés por la investigación de éstos para comprobar su eficacia, así como el uso del residuo vegetal de plantas tropicales que vienen a despertar un gran interés por parte de los investigadores.

Según, el Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria CIPAV (2008). Un estudio que se hizo en la Universidad Nacional de Colombia titulado "La utilización de sustratos para disminuir el impacto de uso de suelo importado para Producir Plántulas de Chachafruto *Erythrina edulis* en condiciones de vivero", consistió en evaluar diferentes sustratos disponibles en el Valle del Cauca para sustituir o disminuir la utilización de suelo en el establecimiento de plántulas de chachafruto en condiciones de Vivero, entre ellos, se utilizó la cáscara de café; en el Centro Nacional de Investigación del café en Brasil (Leifa et al., 2001) se llevó a cabo una investigación donde se utilizó la cáscara de café como sustrato para la producción de hongos comestibles; Quiala et al., (2004) hizo estudios de la composición química de este residuo vegetal.

1.2.2 ESTRUCTURA Y COMPOSICIÓN

La cáscara de café no es mas que el resultado del procesamiento en secado del café cereza, este tiene todos los subproductos pero de forma deshidratada (epicarpio, pulpa, mucílago y la cascarilla). Es un elemento que se obtiene en gran cantidad en los países africanos y através de agricultores con pocos recursos, porque el procesamiento en secado es poco costoso y sencillo y no requiere grandes gastos de energía y agua además de no presentar problemas de contaminación ambiental (ríos y aguas subterráneas) en comparación con el procesamiento en húmedo.

Según Calegarí (1989), la cáscara o paja de café tiene 1,65 por ciento de nitrógeno; 0,18 por ciento de P_2O_5 y 1,89 por ciento de K_2O . El mucílago representa alrededor de 5 por ciento del peso seco de este (Brezan et al., 1972) es una capa de 0,5 a 2 mm de espesor que esta entre la pulpa y la cáscara del grano de café, es un sistema coloidal líquido, liofílico, siendo por otro tanto un hidrogel. Químicamente contiene agua, pectinas, azúcares y ácidos orgánicos. Durante la maduración el pectato de calcio localizado en la laminilla media y la protopectina de la pared celular, es convertido en pectinas, esta transformación o hidrólisis de las protopectinas resulta en la desintegración de la pared celular, dejando un plasma celular libre, en este plasma, además de pectinas, se encuentran azucares y ácidos orgánicos derivados del metabolismo y la conversión del almidón.

El pergamino del café o cascarilla es la parte plateada que envuelva el grano y representa alrededor de 12 por ciento del grano en base seca. Es una excelente fuente de celulosa y lignina.

La pulpa tiene grandes cantidades de potasio según Castro (1960), 100 libras de pulpa de café en base seca equivale a 10 libras de fertilizante inorgánico 14-3-37.

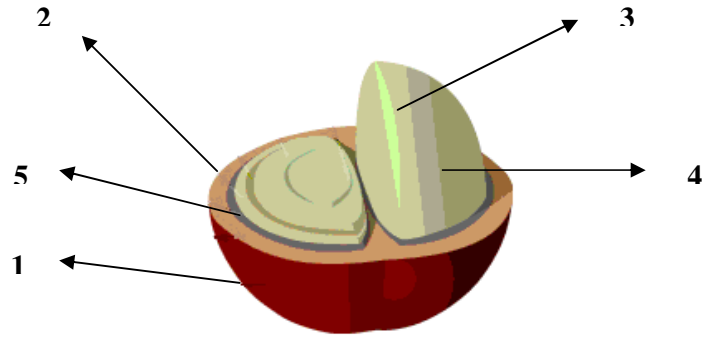


Figura 4. Estructura del café: 1.epicarpio; 2.Mesocarpio o pulpa; 3. Endocarpio; 4. Espermodermo o película plateada (pergamino o cascarilla); 5. Endospermo o grano limpio.



Figura 5. Frutos, cáscara y granos

Compuesto	Base seca (%)
Tanino	1,80-8,56
Sustancias pécticas totales	6,5
Azucares reductores	12,4
Azucares no reductores	2,0
Cafeína	1,3
Ácido clorogénico	2,6
Ácido cafeico total	1,6

Tabla 3. Composición química de la pulpa de café. Fuente: Elías (1978).

Partes estructurales	Materia seca del grano (%)
Pulpa	26,5
Cascarilla	10,0
Mucílago	13,7
Fruto de café	50,0

Tabla 4. Distribución porcentual de las estructuras principales del café en cereza (Base seca). Fuente: Bressani (1978).

1.2.3 PROCESAMIENTO

Procesamiento en secado:

Se emplea el proceso seco para el café Robusta y gran parte del café Arábigo de Brasil y Etiopía. Se secan los granos al sol y luego se separan el grano y la parte exterior en la peladora. El secado se practica sobre superficies preparadas para el efecto, donde se rastrillan las cerezas de café y se extienden regularmente. Es un proceso simple y barato, sin impacto negativo al medio ambiente.

Procesamiento en húmedo (fermentación):

El proceso húmedo, se emplea para obtener el café Arábigo de más alta calidad. Los granos maduros se lavan primero para eliminar los más livianos y la basura, luego se reducen a pulpa para quitar la capa exterior y parte del mucílago que se encuentra debajo de ésta. A continuación, los granos despulpados por pases de rastrillo pasan a unas mallas vibradoras que los separan de las cerezas sin despulpar o imperfectamente despulpadas, y de cualquier otra fracción grande de pulpa que hubiera pasado con ellas. De estas mallas, los granos despulpados pasan a los canales de preselección y lavado, donde se lleva a cabo otra separación por flotación antes de la fermentación. El despulpado mecánico significa que queda una parte de la pulpa y de mucílago pegajoso pegado al pergamino que cubre los granos. Como el mucílago no se puede eliminar fácilmente con agua, se elimina mediante fermentación con enzimas. Este proceso descompone las otras capas de mucílago, formando un afluente que puede causar serios problemas de contaminación, al descargarlo directamente a los arroyos o ríos. Luego de un lavado final, el café ahora llamado “vitela”, se seca al sol o artificialmente. Posteriormente se descasca para quitar la

capa plateada (cascarilla de café o pergamino), produciendo el café en grano “limpio” que se comercializa internacionalmente.

1.2.4 USOS ALTERNATIVOS DE LOS RESIDUOS Y SUBPRODUCTOS DEL CAFÉ

En África precisamente en Angola la cáscara de café y otros residuos y subproductos del café provienen del procesamiento en secado, así que no hay casos de contaminación ambiental de estos residuos en los ríos y aguas subterráneas. Al obtener la cáscara de café como resultado del descasque de los granos secos, se amontonan y no se da uso de los mismos, en algunos casos la quema es una de las forma para eliminar estos residuos. Brasil el mayor productor de café en el mundo usa la cáscara de café como combustible fósil. Desde mediados del siglo pasado varios país han tratado de inventar métodos de utilizarlos como materia prima para la producción de piensos, bebidas, vinagre, biogás, cafeína, pectina, enzimas pécticos, proteína, y abono.

Según la Organización Internacional del Café, un estudio hecho por Rathinavelu y Graziosi (2005) describen los posibles usos de diferentes partes constituyentes del café:

La pulpa:

La pulpa del café es un material de desecho que procede de la industria del café. Esta puede reemplazar hasta un 20% de los concentrados comerciales en la alimentación del ganado lechero, sin efectos perjudiciales y con un ahorro del 30%. La inclusión de ensilaje de pulpa de café en el régimen alimenticio de algunos animales de granja podría contribuir a reducir los costos de producción de leche y carne, especialmente en los países en desarrollo.

Biogás procedente del agua residual del café en el procesamiento en húmedo:

En este caso se aprovecha la descomposición del agua drenada del extracto de las cerezas, en este proceso se crean las condiciones necesarias para la producción de CO₂, metano y otros gases que en seguidamente se aprovecha a través de un digestor. Se obtiene el biogas, y los residuos orgánicos restantes (fertilizantes orgánicos) también llamados como “biol” se pueden utilizar en las cosechas o en la lombricultura.

Sólidos de la pulpa de café para ensilaje:

La pulpa del café es realmente una sustancia muy versátil, pero el hecho de que contenga cafeína se vio hasta ahora como un factor negativo que la hacía inutilizable como pienso animal. Con un leve drenaje de la pulpa, inoculación con aditivos comerciales de ensilaje y envase en forros de plástico dentro de contenedores de reciclaje, o en contenedores de carga flexible de una tonelada, puede conseguirse en 3 á 4 meses un pienso excelente, adecuado para forraje de ganado.

Sustrato de hongos:

La pulpa fermentada y secada parcialmente puede ser usada como sustrato para el cultivo de hongos exóticos. De interés especial es la mezcla de cáscara y pulpa semi seca para el cultivo rápido, en unas cuantas semanas, de Shiitake, Linchi y otras setas que habitualmente tardan muchos meses en crecer en leños de roble. Más rápida aún es la producción de Pleurotus o setas Ostra que habitualmente crecen en árboles podridos en los matorrales. En zonas en que las hongos son bocado delicado y apreciado.

Cascarilla de café como combustible:

La composición lignocelulosa de la cascarilla de café y su bajo poder fertilizante hace posible su utilización en hornos toscos para secar el café en pergamino, en algunas zonas de Sudamérica se usa como combustible fósil en la confesión de alimentos.

Sólidos de la pulpa de café como estiércol:

Los sólidos de la pulpa del café contienen solamente una quinta parte de los nutrientes que se sacan del suelo con la exportación del grano verde. Sin embargo, son una buena fuente de humus y de suelo de carbono orgánico. Si se da la vuelta a la pulpa del café cada pocos días y se pone en un montón que se conserva durante unos cuantos años, que es la forma habitual de hacer el estiércol, se convertirá en abono en tres semanas con una quinta parte del volumen original y como un material firme que huele a tierra y no atrae moscas. Si se deja madurar durante tres meses cubierto, se reducirá más hasta convertirse en un abono muy agradable de tierra seca que es un buen factor de mejora y enmienda del suelo. Es entonces, al empezar a calentarse el montón por segunda vez, después del primer volteo, cuando ocurre el colapso de la estructura y hay una liberación masiva de líquido negro y pegajoso que contiene la mayoría de los nutrientes y es el auténtico material fertilizante. No debiera permitirse que ese líquido se vaya, sino que, para conseguir una fuente adicional de ingresos, debiera recogerse y venderse como un factor de nutrición vegetal orgánico de alto valor y disuasivo de plagas.

Bebidas alcohólicas y refrescantes:

Es muy poco lo que se descubrió sobre el uso de la pulpa de la cereza del café para la elaboración de bebidas alcohólicas o refrescantes. En este caso la cafeína no supondría un problema, ya que se añade con frecuencia a las bebidas refrescantes y hay licores fuertes conocidos a base de café (Kahlua en México, Caffè Borghetti en Italia).

Mucílago de café:

De los residuos industriales del café pueden obtenerse, en distintos estados de pureza, los siguientes tipos de sustancias:

- Pectinas sin refinar: Esas pectinas pueden estar en forma de gel soluble termorreversible o en forma de eslabón en cruz no reversible, con un sabor exquisito.
- Azúcares naturales del fruto del café, procedentes principalmente del agua del despulpe reciclada: Son en su mayor parte monosacáridos, glucosa, galactosa, ramosa y arabinosa, con un sabor distinto, que recuerda al de las ciruelas, y podrían comercializarse.
- Compuestos antioxidantes y flavonoides: Estos son principalmente los compuestos de antocianina de color del fruto, pero también contienen todos los demás polifenólicos, tales como los ácidos clorogénicos y, por supuesto, cafeína. Esas sustancias pueden combinarse de varias maneras para hacer una serie de aditivos de los alimentos que pueden tener interés para la industria del 'alimento saludable'.
- Pro-antocianinas incolora: podrían usarse como recurso básico para la fabricación de otros alimentos o quizá para la síntesis más sofisticada de otras sustancias químicas.

Aspectos relativos a la salud:

Los subproductos del café tienen muchas propiedades medicinales. Se enumeran a continuación algunas de ellas:

- Fibra soluble dietética: Las pectinas del café elevan el nivel de las lipoproteínas de alta densidad, que son las beneficiosas en las afecciones arteriales. Es bien sabido que las pectinas encierran los ácidos de la bilis (de donde proceden el colesterol que se almacena en las arterias) y son transportados través del intestino delgado hasta el intestino grueso o el colon, donde algunos de ellos se convierten en alimento para las bacterias, que a su vez protegen contra el cáncer de colon.

- **Propiedades de intercambio de cationes:** Las pectinas, en forma de oligosacáridos galacturónicos, son un poco como resinas de intercambio de iones. Son capaces de formar complejos con calcio puro, hierro y otros iones de carácter divalente en la dieta y llevarlos fuera del cuerpo, reduciendo considerablemente el nivel de esos importantes elementos nutritivos.

- **Antioxidantes:** El mucílago del café, pero más en especial la pulpa, no es toda pectina o protopectinas. Contiene también una serie de azúcares eslabonados y las sustancias químicas polifenólicas, antocianinas, proantocianinas, y cianuros, bioflavonoides y taninos, además, por supuesto, de cafeína y ácidos clorogénicos. Estos elementos importantes en la nutrición humana.

- **La cafeína está perdiendo la mala imagen que tenía:** La cafeína y muy en especial esos ácidos clorogénicos son muy buenos antioxidantes. “Una taza de café es equivalente a tres naranjas”.

Sustituto de la grasa:

Una técnica bien establecida consiste en el uso de emulsiones de pectina para reemplazar las emulsiones de grasa para cocinar y en la fabricación de aliños de ensalada y mayonesa. Se adjunta un documento corto sobre una formulación patentada como indicación de los usos de este material.

1.3 IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE LA CÁSCARA DE CAFÉ Y SUBPRODUCTOS PARA ANGOLA

El gran proyecto de relanzamiento de la agricultura angoleña para erradicar el hambre y diversificar la economía que en gran medida depende de los recursos agotables pone de manifiesto la creciente necesidad de formación profesionales en diversas áreas de la agricultura para enfrentar los grandes desafíos en este sector y resolver diferentes problemáticas, como la implementación de un sistema moderno de tratamiento de información con recurso a los Sistema de Información Geográfica (SIG), un inventario del medio biofísico (tierra, agua, vegetación etc.), crear bases para el estudio de la conservación de suelo y agua, impulsión del laboratorio de suelo y agua, relanzamiento de las unidades de detección remota, etc.

En Angola el crecimiento del desierto, el surgimiento de nuevas zonas áridas, el aumento de problemas de sequía en varias regiones, hace que la investigación sobre

sistemas de labranza y prácticas auxiliares de manejo y conservación de suelos orientados a enfrentar los graves y acelerados procesos actuales de degradación de suelo sea de vital importancia. Esto permitiría mejorar los recursos naturales y el medio ambiente de estas áreas afectadas a través de prácticas que permitirían eliminar ciertas limitaciones de los suelos que afectan a la producción sostenible de los cultivos, tales como la compactación, encostramiento, infiltración, drenaje pobre, régimen de humedad, temperatura desfavorable, y otras técnicas actuales.

Durante la década de los años 70, antes de la guerra civil, 2 500 granjas comerciales y 250 000 pequeños productores angoleños producían hasta 228 000 toneladas de café por año, y el país era el cuarto exportador mundial, el café robusta (figura 6) es considerado el mejor del mundo. Esta tradición cafeicola sigue hasta ahora aumentando las producciones año tras año con el propósito de relanzar la agroindustria y dar empleo a miles y miles de personas.

Una de las problemática de la producción de café no sólo en Angola sino en todo el mundo es el destino de los subproductos. En Angola es evidente la quema de éstos contribuyendo a la contaminación del medio ambiente así como de otras regiones del mundo. Este estudio viene a demostrar las bases científicas para su utilización como mejorador y protector del suelo, dando complemento a la investigación de las prácticas de conservación de suelos y solucionando el destino de grandes cantidades de éste subproducto, haciéndola bioreciclable con grandes benéficos al medio ambiente y que el método enterrado estudiado sería aplicable por la presencia de mano de obra barata en estas zonas.

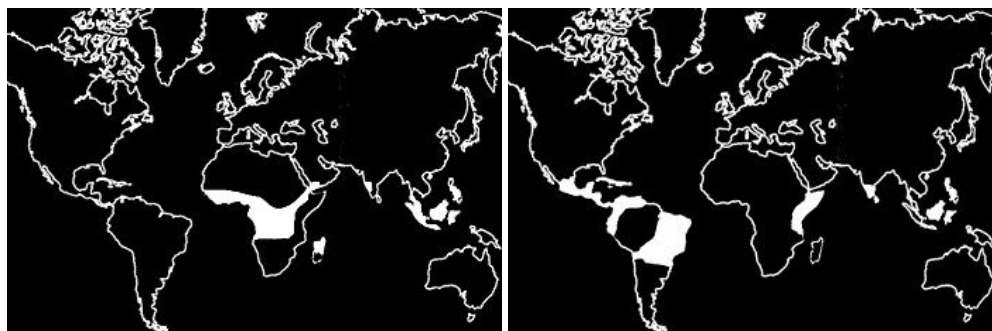


Figura 6. Producción de café Robusta y Arabia (de izquierda a derecha) en el mundo

1.3.1 EL SUELO COMO SUMIDERO DE CARBONO DE LOS SUBPRODUCTOS DE CAFÉ

Se entiende por sumidero “cualquier proceso, actividad o mecanismo que absorbe un gas de efecto invernadero, un aerosol o un precursor de un gas de efecto invernadero de la atmósfera” (Naciones Unidas, 1992). Los elementos capaces de generar este flujo de carbono desde la atmósfera son el suelo, los océanos y los bosques; pero la fijación de carbono por parte de los océanos, además de ser difícil de contabilizar, no depende directamente de la actividad humana, por lo que el Protocolo de Kyoto considera como sumideros, a tener en cuenta en las variaciones de emisiones, las actividades de uso de la tierra, el cambio de uso de la tierra y la silvicultura (García et al., 2005).

El almacenamiento del carbono en el suelo se produce a través de la formación y descomposición de la materia orgánica. Los residuos vegetales se depositan en el suelo y se van descomponiendo, formando la materia orgánica activa que, en función del tipo de suelo, la cantidad de agua y de otros nutrientes se irá convirtiendo en materia orgánica estable, capaz de almacenar el carbono durante milenios. De esta forma, los suelos constituyen un sumidero permanente, frente a la biomasa forestal que tiene un carácter temporal.

El café es producido en más de 70 países en el mundo. La producción mundial es actualmente de en torno a los 7 058 028 TM siendo Brasil y Colombia los principales exportadores. En África la cultura de producir café se extiende a varios países (tabla 5). La cáscara de café representa el 50% de masa seca de café cereza, es decir que la producción de la cáscara de café en toneladas es considerable principalmente en África donde el procesamiento en seco es casi generalizado. Solo Angola tuvo una producción aproximada de 14 960 TM durante la campaña 2008-2009. En este caso el uso del suelo como sumidero de carbono a través de la incorporación de este residuo vegetal daría muchos beneficios al medio ambiente aumentando la cantidad de humus y materia orgánica que mejoraría la calidad del suelo y la cantidad de carbono almacenado. Además es un actividad que se encuadra dentro del conocido LULUCF (land use, use land-change and forestry).

Países	Área (has)	Producción (TM)
<i>Total mundial</i>	11 519 678	7 058 028
<i>Angola</i>	90 000	*17 000
<i>Benin</i>	1 000	200
<i>Burundi</i>	28 000	18 500
<i>Camerún</i>	300 000	70 000
<i>R. Centroafricana</i>	25 000	12 900
<i>R.D. congo</i>	145 000	36 000
<i>Congo</i>	3 400	1 400
<i>Costa de Marfi</i>	2 050 000	365 000
<i>Etiopía</i>	250 000	229 980
<i>Gabón</i>	500	120
<i>Ghana</i>	21 000	8 000
<i>Guinea</i>	50 000	20 888
<i>Guinea ecuatorial</i>	9 500	3 500
<i>Kenya</i>	170 000	85 020
<i>Liberia</i>	15 000	3 000
<i>Mozambique</i>	1 000	600
<i>Nigeria</i>	8 000	4 000
<i>Tanzania</i>	116 000	49 980
<i>Togo</i>	26 000	17 000
<i>Uganda</i>	265 000	195 000
<i>Zambia</i>	3 200	5 000
<i>Zimbabwe</i>	6 500	9 100

Tabla 5. Producción de café en los países africanos fuente: FAO (2000)
* Datos de la campaña agrícola 2008-2009

1.4 OBJETIVO DEL ESTUDIO

El objetivo general de esta tesis es determinar las bases científicas de la mejora del suelo mediante el uso de un residuo vegetal (cáscara de café).

Objetivos pormenorizados:

- Hacer un estudio del comportamiento de la humedad en diferentes suelos, en Condiciones normales y con encostramiento en todos los tratamientos.

- Determinar el efecto del residuo vegetal sobre la escorrentía y la erosión de diferentes suelos.

- Determinar el efecto de la incorporación de este residuo sobre la infiltración en los suelos en estudio.

- Evaluar la importancia del mecanismo de incorporación del residuo vegetal (superficial o enterrado) en la reducción y prevención de la degradación de diferentes tipos de suelo.

- Analizar las propiedades físicas, la erosión y la escorrentía de los suelos en estado normal y con encostramiento.

- Analizar el comportamiento de la humedad y la resistencia a la penetración en la fase de secado de los suelos en estudio.

2 ANTECEDENTES

2.1 DEGRADACIÓN DE LOS SUELOS

2.1.1 GENERALIDADES

La degradación de los suelos sin duda es un motivo de preocupación para la humanidad. Cada año la erosión de los suelos y otras formas de degradación de las tierras provocan una pérdida de entre 5 y 7 millones de hectáreas de tierras cultivables. La erosión del suelo se está acelerando en todos los continentes y está degradando unos 2000 millones de hectáreas de tierra de cultivo y de pastoreo, lo que representa una seria amenaza para el abastecimiento global de los seres vivos (Celis y Soyo, 2005).

Varios factores permiten la aceleración de la degradación de los suelos, (climáticos, biológicos, edáficos, topográficos, y otros) pero precisamente los factores antropológicos aceleran la tasa natural de la degradación de los suelos; la deforestación, la degradación de la superficie del suelo por prácticas agrícolas incorrectas, etc. Las consecuencias son evidentes, principalmente en algunos continentes como Asia, África donde se registran valores considerables de pérdida de suelo al año y el surgimiento de nuevas zonas desérticas trayendo grandes problemas de carácter ambiental, social y económico.

2.1.2 DEGRADACIÓN DE LOS SUELOS EN EL MUNDO

Un tercio de la superficie mundial se halla incluida en las zonas áridas que representan aproximadamente 40 a 45 millones km² (Porta, 2003).

Según la FAO (2008), la investigación más exhaustiva realizada hasta la fecha sobre el estudio de la degradación del suelo en el mundo, fue por el proyecto GLASOD (Global Assessment of Human Induced Soil Degradation) dentro del programa de las naciones unidas para el medio ambiente PNUMA. Este proceso tiene ahora más de diez años de antigüedad, GLASOD calculó que un total de 1.964 millones de ha estaban degradadas, 910 millones de ha estaban al menos hasta un grado moderado (con una reducción importante de la productividad) y 305 millones de ha estaba muy degradadas o hasta un punto extremo (no siendo ya adecuadas para la agricultura). La erosión por el agua era el

problema más corriente, que afectaba a casi 1 100 millones de ha, seguida por la erosión eólica que afectaba a casi 600 millones de ha.

Las consecuencias de la degradación sobre la productividad también son difíciles de evaluar. Su gravedad varía ampliamente de un lugar a otro, incluso a cortas distancias y en el mismo lugar, en función de la meteorología, vegetación y técnicas de cultivo locales. La degradación es un proceso lento que puede enmascarse aplicando otros fertilizantes o cambiando los cultivos.

La degradación también tiene costes colaterales, tales como el entarquinamiento de lechos fluviales y pantanos, etc. Sin embargo, no todos los efectos colaterales de la degradación son negativos: las pérdidas en un lugar pueden producir ganancias en otro, como ocurre cuando el suelo erosionado en las tierras altas aumenta la productividad en las llanuras aluviales donde se deposita.

La degradación de tierras conduce a una disminución significativa de su capacidad productiva. Las actividades humanas que contribuyen a esa degradación incluyen la utilización inapropiada de tierras agrícolas, prácticas deficientes en la ordenación de suelos y agua, deforestación, remoción de la vegetación natural, uso frecuente de maquinaria pesada, pastoreo excesivo, rotación incorrecta de cultivos y prácticas deficientes de riego. Los desastres naturales, tales como sequías, inundaciones y deslizamientos de tierras, hacen su aporte también.

La tala de los bosques también contribuye significativamente para aumentar los índices de degradación de los suelos. Según la FAO (1999), para satisfacer las necesidades energéticas se consume alrededor de 1 730 millones de m³ de leña de bosques y plantaciones por año. La leña representa la principal fuente de energía en muchas regiones en desarrollo.

Según Thiam (2001), la mayoría de los factores que acentúan la degradación de tierras y la vulnerabilidad de las regiones áridas de África a la desertificación son similares a los de Asia y de América latina y se pueden agrupar en dos grupos: el aumento de la densidad humana, animal y el uso inadecuado de los recursos naturales. Alrededor de 18% de las regiones áridas de África están severamente afectadas por la degradación. La mayoría de estas tierras afectadas son pastizales y tierras de cultivo de secano en el sur de Sahara (Dregne, 1986) las llanuras y montañas en el norte de África, 30 % de las tierras de regadío del Nilo, que están moderada y levemente afectadas (Khaled et al., 1975). En los 680 millones de hectáreas de pastoreo excesivo se ha perjudicado cerca del 20 por ciento de las pasturas y pastizales del planeta. Las pérdidas recientes han sido más graves

en África y Asia. Según la FAO cerca del 90 % de los suelos del Cercano Oriente y África al Norte del ecuador sufren procesos de erosión acelerada (Ibáñez, 2002).

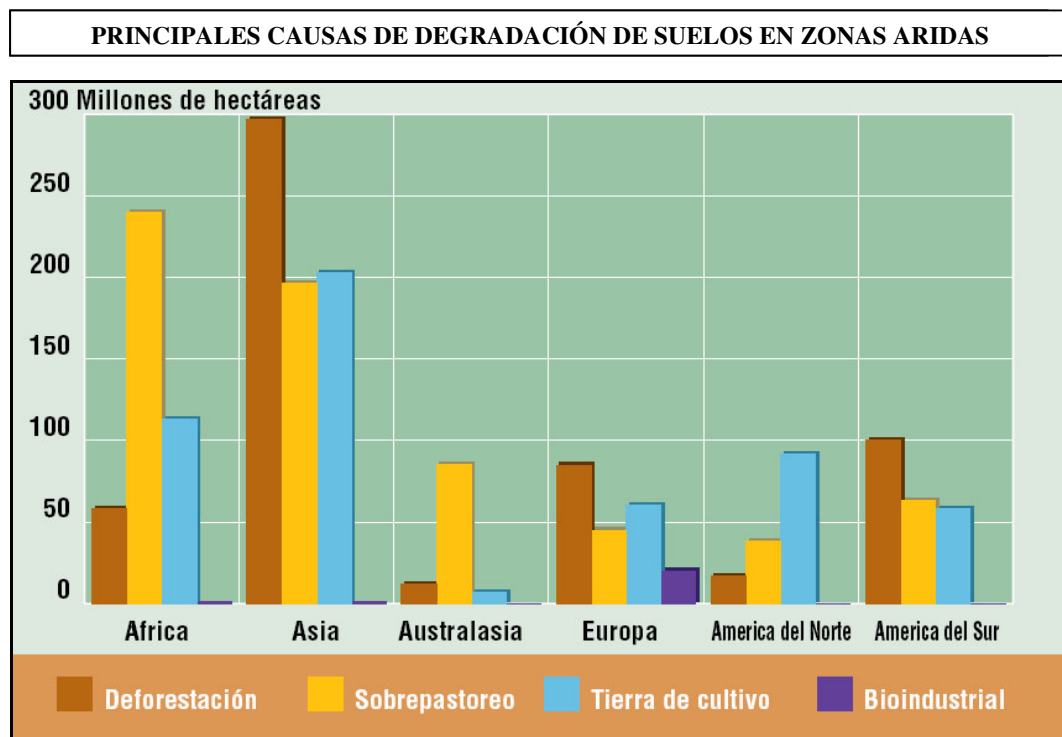


Figura 7. Causas de la degradación de suelos

Según la UNCTAD (United Nations Conference on Trade and Development), la recesión económica de África se ha visto agravada por un deterioro ambiental de inmensas proporciones en el que deforestación, desertificación y degradación de los suelos se conjugan y refuerzan mutuamente. Según datos proporcionados por este organismo los desiertos avanzan sobre las tierras agrícolas a una tasa de 6 a 7 millones de hectáreas por año, afectando los medios de subsistencia de 60 millones de personas.

En América del Norte la degradación de los suelos es considerable. Canadá, Estados Unidos y México pertenecen a regiones áridas. Aproximadamente dos tercios de esta superficie esta moderadamente degradada menos de un tercio esta degrada severamente, y una considerable área levemente degradada. En general las regiones áridas del norte son moderadamente degradadas y las del sur severamente degradadas.

En América del sur cerca de 22 % de las regiones áridas están severamente o muy severamente afectada por la degradación (Thiam, 2001).

En Europa la degradación de suelos esta ocasionada generalmente por los incendios, forestales, sequía y actividades humanas como la sobre explotación, sobre pastoreo y la contaminación. El aumento de las concentraciones de sal y la alcalinidad afectan a casi 4 millones de hectáreas, principalmente en los países mediterráneos y de Europa oriental. En este continente, alrededor de 115 millones de hectáreas están amenazadas por la erosión hídrica y 42 millones de hectáreas lo están por la erosión eólica. La desertificación se produce, en particular en la región mediterránea a causa de sus frágiles condiciones medioambientales (AEMA, 1998). A modo de ejemplo del ritmo de pérdida irreversible de los suelos europeos, señalaremos que el desarrollo urbano, durante el decenio de 1970 tuvo como consecuencia la pérdida de tierras potencialmente productivas a un ritmo cercano a 120 hectáreas por día en Alemania, 35 ha. por día en Austria y 10 ha. por día en Suiza (Van Lynden, 1995).

La degradación de suelos en Asia se caracteriza por el sobre pastoreo. En el medio oriente y Asia central, la erosión hídrica en las zonas de cultivo de secano que se extiende desde el Este de china hasta el mar mediterráneo, y la salinidad afecta a Irak, Pakistán, China y Rusia. La degradación es ampliamente variada, desde una degradación leve hasta muy severa. Pero cerca de la mitad de las tierras degradadas son clasificadas como leve (Dregne, 1986).

Australia contiene únicamente el 10 % del total de zonas áridas a escala global, pero éstas ocupan el 75 % de su superficie y albergan al 25 % de su población. Así pues, estas zonas son claves a la hora de determinar la economía, cultura y clima (Reynoldes et al., 2005).

2.1.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS ÁRIDAS

Según Thiam (2001) y Porta (2003) las características de las zonas áridas son las siguientes:

- Las zonas áridas se caracterizan por una falta acentuada de agua para los seres vivos, con lluvias escasas y extremadamente irregulares tanto en espacio y en el tiempo. las precipitaciones son de tipo torrencial con elevada intensidad y corta duración, se registran grandes pérdidas por escorrentía superficial.
- En estas zonas la práctica de la agricultura de secano es muy difícil, al menos que tenga una posición topográfica accesible para recibir suplemento de agua procedente de la escorrentía superficial.

- Los desiertos de montaña se caracterizan por un predominio de ladera como formas del terreno. Debido a la falta de agua la meteorización se ve frenada y por consiguiente impide el establecimiento de la vegetación, en estas condiciones la erosión del suelo puede eliminar todo el material resultante de la meteorización física.
- Los desiertos de gravas o Regs. Se caracterizan por el cubrimiento de gravas o gravillas, en algunos casos constituyen llanuras y en otros se forman vertientes en glacis.
- Las hamadas son otras formaciones que se pueden observar en algunas zonas áridas y precisamente en el desierto, están constituidas de rocas duras y de tamaño reactivamente grande cubiertos de cantos con deflatación.
- Los suelos fluviales en algunas zonas cercanas a los cursos de agua permiten una agricultura de regadío.
- Los desiertos de arena mas conocidos como “erg”, se caracterizan por su alto contenido de cuarzo y contiene pequeños porcentajes de granos meteorizables. En estos desiertos la formación de campos de dunas es un proceso general, las dunas pueden tener la forma de cordones o de forma lunar (barjan).
- La vegetación es escasa y dispersa, están constituida por arbustos y árboles del genero *Acacia*, *Bocsia* adaptados a condiciones de escasez hídrica entre otros. En algunas partes y en los meses lluviosos se establece una cobertura vegetal herbácea.

2.2 PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO

2.2.1 GENERALIDADES

Esta parte de la edafología que estudia la física del suelo, es de gran interés para la comprensión de varios aspectos relacionados con el principal sustrato de las plantas que es el suelo, desde su composición hasta su influencia en el desarrollo de las plantas.

La física del suelo estudia el conjunto de factores y procesos físicos que ocurren dentro del suelo y en su superficie que son importantes para el crecimiento de las plantas. El manejo del suelo y agua y otras actividades que se llevan a cabo en los suelos agrícolas, determina la fertilidad y la capacidad productiva de este importante recurso natural que sirve de soporte a la planta.

Las prácticas de labranza influyen en todas las condiciones físicas del suelo. El laboreo excesivo causa erosión, compactación, pérdida de agua del suelo, mala estructura y deterioro de otras propiedades físicas que impiden el desarrollo del sistema radicular de la planta.

A partir del conocimiento de las leyes de la física de suelos y de la determinación de sus propiedades físicas, se puede desarrollar técnicas que permitan modificar adecuadamente las condiciones del suelo para resolver problemas de producción de cultivos.

El conocimiento de la estructura del suelo, su origen y clasificación y otros aspectos que influyen en el crecimiento de la plantas han sido tema de varias publicaciones por parte de la comunidad científica. Varios autores como Baver et al. (1991) detallaron de forma precisa la física del suelo.

La física del suelo estudia tanto las propiedades estructurales y mecánicas del suelo como el régimen de agua, aire y temperatura que son importantes en agronomía. También estudia algunos mecanismos como el de la floculación de los coloides y procesos como el del movimiento del agua debido a gradientes de temperatura y de concentración de sales, y el de formación de la estructura que resulta de la interacción entre las fuerzas moleculares y electrostáticas de los iones. Estas fuerzas determinan la resistencia mecánica que se opone a los implementos agrícolas de laboreo. También permite conocer mejor el movimiento del agua, el calor, de las sales en el suelo en relación con el clima, la estructura, la porosidad, la densidad aparente y cubierta vegetal del suelo bajo diferentes condiciones de labores de cultivo, así como, los efectos y las interacciones del suelo y el clima en la determinación de la eficiencia del uso del agua por los cultivos.

2.2.2 DESARROLLO FÍSICO DEL SISTEMA RADICULAR

La degradación edáfica incide de forma significativa en el desarrollo del sistema radicular de la planta. Las propiedades físicas del suelo influyen en la relación aire- agua, estando obstaculizada al desarrollo de las raíces en profundidad si la densidad aparente exceda de 1,55 y 1,65 g cm⁻³ en suelos franco arcilloso y franco; 1,80 y 1,85 g cm⁻³ en suelos franco arenoso.

Los aspectos relacionados con el crecimiento del sistema radical, precisamente el peso y la longitud están extremadamente relacionados con la humedad del suelo, la

frecuencia o no de agua modificando el desarrollo del sistema radicular. La humedad del suelo ejerce una gran influencia en otras propiedades físicas como la resistencia a la penetración, la temperatura del suelo, etc.

Estas actúan directamente en el mecanismo de desarrollo de las raíces que consiste en que las células meristemáticas que están detrás del ápice se alargan longitudinal y radialmente. Donde el crecimiento se produce cuando la presión de turgencia dentro de las células en crecimiento es suficiente para vencer el confinamiento impuesto por las paredes celulares y cualquier limitación externa causada por la matriz del suelo. (Wild, 1992).

La profundidad del sistema radicular depende de la especie y de la fase de su ciclo vegetativo. En general para cultivos permanentes en suelos medios, puede superar 1,5 – 2 m. Los cereales y los cultivos industriales pueden llegar hasta 0,6 – 1 m., y de las hortalizas en general no superan los 35 – 50 cm. (Grassi, 1987).

Es importante que el suelo este en buenas condiciones físicas para el desarrollo normal de las plantas. Si esta presenta una estructura favorable, buena estabilidad de los agregados, aireación, ausencia de enconstramiento y drenaje eficiente, favorece el desarrollo normal del sistema radicular, evitando dificultades en el desarrollo de la planta.

2.2.2.1 AIREACIÓN

La aireación deficiente que resulta de un pobre drenaje y del anegamiento o de la compactación mecánica del suelo, puede inhibir el crecimiento del cultivo. La mayor parte de los cultivos sólo pueden desarrollarse de forma vigorosa si la concentración de CO₂ alrededor de sus raíces no es demasiado alta y la de O₂ no es demasiado baja. Por ello, las velocidades de transferencia de CO₂ desde la zona de la raíz a la atmósfera y de O₂ desde la atmósfera a la zona radicular son propiedades del suelo, de fundamental importancia para el cultivo.

Teniendo en cuenta la composición del aire del suelo, el 20,65% es oxígeno muy parecido a la cantidad en la atmósfera que es de 20,97%. El Nitrógeno también representa una similitud en relación a su presencia en la atmósfera que es de 79,0 % y 79,2% en el aire del suelo. El caso del Anhídrido de carbono difiere un poco, con valores de 0,03% en el aire atmosférico y 0,25% en el aire del suelo.

La aireación está ligada a la porosidad, estando la microporosidad ocupada por agua y la macroporosidad por aire. Un suelo en el cual la aireación se considera adecuada debe

tener por lo menos suficiente espacio vacío de sólidos, estando presente el agua; debe poseer una gran posibilidad para el movimiento fácil de los gases esenciales dentro y fuera de estos espacios.

Teniendo en cuenta su Dinámica, el aire del suelo está en continuo intercambio con el aire atmosférico y gracias a esta constante renovación, la atmósfera del suelo no se vuelve irrespirable. Este movimiento puede realizarse por movimiento en masa o por difusión.

Movimiento en masa: Se produce debido a variaciones de temperatura y de presión entre las distintas capas del suelo y entre éste y la atmósfera. Estos gradientes hacen que entre y salga aire del suelo. El viento impulsa el aire dentro del suelo y succiona aire de la atmósfera. También la lluvia al penetrar dentro de los poros expulsa el aire del suelo.

Difusión: La superficie del suelo actúa como una membrana permeable que permite el paso de los gases. Se intercambian selectivamente los gases del suelo con los de la atmósfera para tratar de equilibrar su composición. Así, cuando en el suelo aumenta el CO₂, se produce una difusión del CO₂ a la atmósfera y si en el suelo disminuye el O₂ se produce una difusión del O₂ de la atmósfera al suelo. Este es el factor principal en los intercambios de gases entre el suelo y el aire exterior y, por tanto, el causante principal de la renovación de la atmósfera del suelo.

La difusión depende de cada tipo de gas y de la porosidad del suelo. La cantidad de gas transferido de un medio a otro se puede expresar como:

$$Q = -DA \frac{c}{x}$$

Donde: *D*, Coeficiente de difusión; *A*, superficie a través de la cual se produce la difusión; *c*, Incremento de concentración; *x*, Distancia entre la cual se produce la difusión.

Los procesos de oxidación reducción están muy relacionados con la presencia del air en el sistema edáfico así como con el pH, ya que ambos condicionan tanto la actividad microbiana como el tipo de reacciones que acaecen en él. El agua influye en estos procesos al modificar la distribución del aire en el suelo, y por ello la difusión del O₂ y la concentración de CO₂. El metabolismo del suelo tiende a oxidarla, mediante la intervención de otros de sus elementos que pasan así a formas más reducidas. Del mismo modo, el oxígeno es el principal agente oxidante. En los suelos normales el ambiente es aireado y por tanto la tendencia general es oxidante. En los suelos hidromorfos la saturación en agua tiende a provocar un ambiente reductor.

Para determinar la capacidad de aireación del suelo además de otros métodos de diagnóstico existentes como la composición atmosférica del suelo, la tasa de difusión del oxígeno, la actividad biológica del suelo, también se puede medir cuantitativamente a través del potencial redox (Eh) expresados en milivoltios (mV) a través de mediante electrodos con características precisas para este tipo de mediciones introduciendo directamente en el horizonte a ser caracterizado.

Para un suelo bien aireado el intervalo de medida de Eh en el sistema suelo-agua va de 800 mV a -500 mV en función de las condiciones de aireación según Evangelou (1998).

<u>Condiciones del medio</u>	<u>Eh mV</u>
Muy bien aireado	800
Bien aireado	500
Pobrementemente aireado	100
Muy reducido	-200
<u>Extremadamente reducido</u>	<u>-500</u>

Tabla 6. Clasificación de la aireación del suelo

2.2.2.2 RÉGIMEN TÉRMICO DEL SUELO

La temperatura del suelo está determinada por un conjunto de factores externos y otros internos o propios del suelo. Los factores externos más importantes son: la radiación solar, la nubosidad, la temperatura y humedad del aire, el viento, la precipitación y la distribución tierra-mar. Entre los factores internos pueden mencionarse: el albedo y color de suelo, la exposición, la cobertura vegetal, la textura, el contenido de humedad de suelo, la materia orgánica y la rugosidad.

Desde el punto de vista de la textura, los suelos arenosos son más claros, de textura gruesa (mucho aire y casi nada de agua) lo que provoca una gran amplitud térmica en la superficie, pero se amortigua rápidamente en las profundidades debido a la baja conductividad calórica del aire intersiticial. Los suelos arcillosos son comúnmente oscuros, pesados, con buen contenido de agua, poco aire, finamente texturado. Esto provoca una disminución en la amplitud térmica diaria, pero se transmite mejor en profundidad que en los suelos arenosos. Los suelos francos son intermedios entre los

arenosos y arcillosos y conforman los más convenientes para la mayoría de las plantas. Buena conductividad calórica y capacidad calorífica, lo que implica un moderado coeficiente de difusividad térmica.

La humedad del suelo constituye un importante factor de regulación del contenido de aire y temperatura. Favorece la conductividad calórica (el agua desaloja al aire del suelo poco conductor del calor). En regiones templadas, en verano, las capas superficiales de suelos húmedos se muestran más calientes que las profundas; en tanto que en invierno es a la inversa. Disminuye la amplitud térmica diaria y además baja la difusividad térmica por aumento en la capacidad calorífica volumétrica, lo que ocasiona mayor amortiguamiento de las oscilaciones diarias de temperatura en profundidad.

La temperatura del suelo constituye un factor de control de la intensidad de una serie de procesos que alcanzan un máximo dentro de un valor determinado de temperatura. Por ejemplo en la planta, la germinación, crecimiento y disponibilidad de agua dependen del régimen térmico del suelo. Hernández et al., (1994) encontraron desuniformidad en el ritmo de germinación y comportamientos genotípicos diferentes cuando los cultivos fueron expuestos a temperaturas extremas del suelo (menores de 12 °C y mayores de 22 °C).

En el suelo la actividad microbiana se ve inhibida o favorecida según la temperatura. La nitrificación, y la descomposición de la materia orgánica es inhibida con las bajas temperaturas, la intensidad de la biodegradación de los pesticidas varía con la temperatura. Los procesos biológicos, el desarrollo del sistema radicular y la actividad microbiana del suelo están influenciados por el regime de temperatura (Jin et al., 2008).

En el suelo, el calor puede transmitirse a través de una y otra parte del mismo o a través de la atmósfera, por diversos procesos como la conducción molecular, convección térmica, evaporación y la condensación del agua.

La capacidad calorífica, Conductividad térmica y la Difusividad térmica son las propiedades térmicas del suelo.

Según Porta (2003), la *capacidad calorífica*: se define como la capacidad del suelo para almacenar calor por unidad de volumen o de masa.

Capacidad calorífica volumétrica: donde q , es el calor absorbido y t , tiempo

$$c_v = \frac{1}{V} \left(\frac{dq}{dt} \right) \quad \text{J m}^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Capacidad calorífica másica (calor específico):

$$c_p = \frac{1}{M} \left(\frac{dq}{dt} \right) \quad \text{J kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$$

La capacidad calorífica de un suelo húmedo sería:

$$c_v = \theta_a c_{va} + \theta_w c_{vw} + \sum_{i=1}^n \theta_{si} c_{vsi}$$

$$c_v = \rho_w^b c_p = \rho^b (1 + \theta_m) c_p = \rho^b (c_{ps} + \theta_m c_{pw})$$

Donde:

a = aire, w = agua, s = sólido

θ_a = fracción de volumen de la fase a

c_{va} = Capacidad calorífica volumétrica de la fase a

ρ_w^b = Densidad aparente en húmedo

c_p = Capacidad calorífica por unidad de masa

θ_m = Contenido de humedad másico

c_{ps} = Capacidad calorífica media por unidad de masa de constituyente

La *conductividad térmica* es la capacidad de una sustancia de transferir el movimiento cinético de sus moléculas a sus propias moléculas adyacentes o a otras sustancias con las que está en contacto.

Esta depende de la composición del suelo, forma, tamaño de los granos, organización de los granos (estructura), contacto en interfase, contenido de agua que es inversamente proporcional (figura 8).

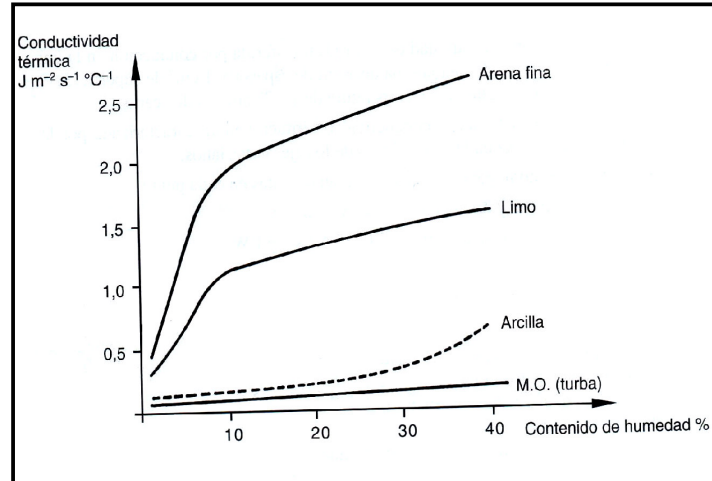


Figura 8. La conductividad térmica en diferentes componentes del suelo. Fuente. Porta (2003).

La otra propiedad térmica es la *difusividad térmica* que se expresa como:

$$D_t = \frac{\lambda}{c_v} \quad \text{m}^2 \text{s}^{-1}$$

Medidas para modificar la temperatura del suelo:

- Cambio de color de suelo y prácticas de cultivo

Al oscurecer el suelo con el agregado de abonos orgánicos y sustancias inertes oscuras como por ejemplo carbón, disminuye el albedo y por consiguiente una mayor cantidad de radiación solar es absorbida para ser transmitida a las capas profundas en forma de calor por conducción.

La labranza altera el régimen térmico en dos sentidos, primero el coeficiente de reflexión que influye en la entrada y salida de energía calorífica lo cual varía modificando la cobertura vegetal; segundo modifica la densidad aparente, porosidad y la humedad del suelo (Marelli y Arce, 1996; Ferreras et al., 1999). Con el aumento de la porosidad el suelo aumenta su capacidad aislante.

- *Irrigación y drenaje*

El agua puede ser aprovechada para aumentar la difusividad térmica del suelo. Para ello es conveniente realizar un riego que permita conducir el calor más rápidamente a las capas profundas del suelo, pero puede ser contraproducente si no existe buen drenaje debido a que si el agua se queda en superficie se acelera el proceso de evaporación con la consecuente pérdida de calor.

- *Cubiertas artificiales*

Se pueden utilizar pantallas o abrigos artificiales para minimizar las pérdidas de calor del suelo por radiación terrestre. Estos elementos se construyen generalmente de paja, lona, juncos, cartón, papel encerado, plásticos, etc. cerrados casi totalmente.

Las prácticas conservacionistas, con adecuado contenido de cobertura de residuo vegetal, modifican la temperatura del suelo por variación del intercambio de energía entre la superficie del mismo y la atmósfera. En dichos sistemas se verifica un mayor contenido hídrico como consecuencia de una infiltración más elevada y menor evaporación (Grant et al., 1995; Chidichimo y Asborno, 2000).

2.2.2.3 PROPIEDADES DINÁMICAS DE LOS SUELOS

2.2.2.3.1 RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN

La resistencia a la penetración es un buen índice para evaluar problemas de restricción en el desarrollo radicular de las raíces de los cultivo, por la presencia de capas compactas y/o baja porosidad. En estos suelos hay dificultades en el crecimiento de las plantas y cosecha de las producciones (Panayiotopoulos et al., 1994; Mapfumo et al., 1998; Masle, 1998; Coelho et al., 2000). Según Bathke et al. (1992) el desarrollo de las raíces están entre los valores de 0,8 a 5 mpa (8 a 50 kg/cm²).

La penetrabilidad del suelo permite conocer la facilidad con que un objeto puede ser introducido en el, es decir, la resistencia mecánica que ofrece el suelo a la expansión lateral y al corte que produce dicho objeto. Esta resistencia no es propiedad particular del material, sino que es la suma de los efectos de diferentes características y propiedades, tales como la densidad aparente, contenido de humedad, resistencia a la penetración y al corte. Son consecuencia de la distribución del tamaño de partículas, de la estructura, y de la composición mineral y orgánica presentes en el suelo (Nacci y Sentis, 1991).

Según Barner (1991), la resistencia de un suelo a la penetración de un instrumento de sondeo es un índice integrado de la compactación de suelo, contenido de humedad, textura y tipo de mineral de arcilla. Es un índice de la resistencia del suelo en condiciones de la medición. La resistencia al esfuerzo cortante y la resistencia a la penetración son buenos indicadores de la estabilidad estructural de los suelos (Poesen, 1990).

Es evidente la variación de la resistencia a la penetración teniendo en cuenta la cantidad de agua en el suelo (Kodesova et al., 1998, 1999; Vaz et al., 2001; Meek et al.,

1992), materia orgánica y de óxidos de hierro (Barral et al., 1998; Becher, Breuer y Klingler, 1997), componentes regulados por la presencia de la vegetación.

2.2.3 ESTRUCTURA DEL SUELO

2.2.3.1 NIVELES DE ORGANIZACIÓN ESTRUCTURAL

La estructura es el ordenamiento espacial de las partículas minerales y su eventual unión por la materia orgánica y los hidróxidos de hierro y aluminio (Bonneau y Souchier, 1978; Eschrich, 2000). Podemos encontrar varios tipos de estructura como las laminar que son heredada en materiales depositados bajo el agua, originadas por el impacto de las gotas de lluvia en sellos y costras superficiales; las prismática son típicas de horizonte enriquecidos en arcillas Bt con endopediones argílicos, estas estructuras pueden presentar una gran dureza y impedir la penetración de las raíces; la forma estructural columnar que es típica de suelos alcalinos; los bloques angulares que son formas frecuentes en endopediones cámbicos, con intercesiones curvas; los bloques subangulares típicos de suelos de zonas semi áridas y áridas con suelos pobres en materia orgánica con aristas agudas y caras curvas como esferas imperfectas; las granulares compuesta típicas de un medio biológicamente ricos en bases y con materia orgánica; y la estructura de tipo migajosa de forma granular compuesta, my porosa, con epipediones con materia orgánica bien evolucionada.

Los niveles de organización teniendo en cuenta la unidad estructural se pueden distinguir en agregados a partir de 5 mm; microagregados 200 a 1000 μm ; crusters o flóculos 50 μm ; dominios tactoides (montemorllonita) 1 a 5 μm ; cristales de arcilla 0,05; laminas de arcilla 0,002 μm .

2.2.3.1.1 MECANISMO DE FORMACIÓN DE LOS AGREGADOS

La agregación de partículas elementales cementadas de la matriz del suelo (arcilla, limo finos, carbonatos, materia orgánica, etc.) en torno a un esqueleto o soporte (arenas de diferentes tamaños, limos gruesos, restos vegetales hifas ...etc.) para conformar en el tiempo y en el espacio unidades secundarias jerarquizadas denominadas agregados (Hillel, 1980) va a depender de la ocurrencia de fenómenos tales como la absorción y adsorción de agua y sustancias químicas, el intercambio iónico, la contracción, hinchamiento, dispersión, floculación y por ultimo la capilaridad.

La formación de agregados está estrechamente relacionada con la floculación y comportamiento de la doble capa eléctrica. Los suelos que poseen una doble capa eléctrica favorable tienden a regenerar los agregados y producir una estructura favorable. Las que contienen proporciones altas de sodio en la doble capa eléctrica tienden a permanecer dispersos y los agregados no se regeneran por medio de procesos naturales, por lo que tales suelos tienen una capacidad estructural deficiente. La formación de agregados de suelos estables y buenos requiere que el material coloidal sea primeramente floculado y luego estabilizado o cementado

La superación de la barrera de energía de repulsión por parte de las partículas a través de su energía cinética, hace disminuir el potencial de interacción permitiendo que se produzca las fuerzas de atracción de Van der Waals y la floculación. Esta interacción da lugar al fenómeno de atracción-repulsión, con procesos de Floculación-dispersión y con formación-destrucción de unidades de fábrica. La presencia ilimitada de agua de las superficies de Na^+ son repulsivas, mientras que en la superficie el Ca^{2+} el potencial neto presenta un mínimo a partir de la cual predomina la atracción (figura 9).

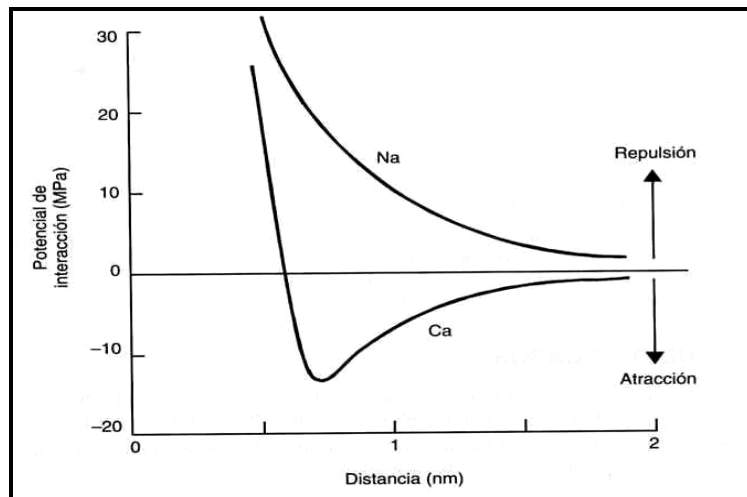


Figura 9. Fenómeno de atracción –repulsión de las arcillas para la formación de los agregados. Fuente: Porta, (2003).

La combinación con los cationes apropiados en el complejo del suelo, la materia orgánica, los silicatos y las arcillas forman los ingredientes básicos de los cementos. Aunque bajo ciertas condiciones los hidróxidos de hierro y aluminio pueden cementar partículas y unir las. En algunos suelos calcáreos, el carbonato de calcio mantiene juntas a las partículas. Los principales cementantes inorgánicos son los sesquioxidos de hierro y aluminio que forman coloides irreversibles o muy lentamente reversibles, y que ayudan a formar agregados estables a la acción del agua. En suelos tropicales (oxisoles), los óxidos de hierro, al cementar partículas de limo dan lugar a pseudoarenas. Si la cementación se generaliza forman alios (arenisca de cemento ferruginoso). Estos horizontes en la superficie forman lateritas o corazas ferruginosas por cristalización irreversible de óxido de hierro (Porta et al., 2003).

Cuanto más arcilla haya en un suelo, se tendrá mayor número de agregados porque une a las partículas de tamaños mayores para formar agregados. En ausencia de coloides la formación de agregados estables no se realiza en arenas y limos. El efecto agregante de las arcillas se debe a su acción cementante y a su propiedad de hinchamiento y contracción con los cambios de humedad. La caolinita flocula más rápido que la montmorillonite debido a su pequeño potencial electrocinético. El aumento del potencial electrocinético hace que las partículas se repelan entre sí.

El ion calcio (Ca^{2+}) y en menor grado el ion magnesio (Mg^{2+}), inducen la floculación de la arcilla y, al mismo tiempo, son importantes en la nutrición y favorecen el crecimiento de las raíces y microorganismos en el suelo. Generalmente los iones calcio y magnesio tienen efecto peptizante. Un suelo sin materia orgánica no se agrega fácil y rápido al agregarle el ion calcio. El ion sodio (Na^+) tiende a flocular la arcilla y a crear una reacción en la que muchos de los nutrientes presentes no pueden ser aprovechados, por lo que disminuye el crecimiento de raíces y microorganismos, causando una mala aireación en el suelo.

La materia orgánica tiene efecto agregante en el suelo y se hace mayor a medida que decrece el contenido de arcilla, y además ayuda a estabilizar la estructura del suelo. La materia orgánica forma quelantes con los metales que ayudan a formar agregados. Por ejemplo, el ion férrico (Fe^{3+}) en los suelos de podzol. La materia orgánica al interactuar con algunos metales como el calcio forma Ca - humus que produce agregación y es más reversible que el H-humus.

Las plantas ayudan a agregar las partículas de suelo de diferentes maneras, con la excreción de compuestos orgánicos gelatinosos por las raíces, que sirven de ligamento entre las sustancias inorgánicas. Las pequeñas raíces mantienen juntas las partículas de

suelo, la deshidratación de esta por las raíces causan grietas al contraerse el suelo lo que origina el rompimiento del suelo y la formación de agregados. Los residuos vegetales proporcionan alimento a los microorganismos del suelo que son uno de los principales factores agregantes del suelo.

2.2.3.2 ESTABILIDAD DE LOS AGREGADOS

La estabilidad de los agregados es el resultado de una compleja interacción biológica, química y física de los procesos del suelo (Tisdall and Oades, 1982). Oades (1984) define el agregado del suelo a un conjunto de partículas donde las fuerzas de unión entre sí superan a las existentes entre este y otros grupos adyacentes y por estructura, al arreglo u ordenamiento espacial de los agregados y poros en el suelo. En suelos donde las partículas están agregadas, el diseño y la perdurabilidad del espacio poroso dependen en gran medida de la forma, tamaño, distribución y estabilidad de los agregados (Lynch, Brass, 1985; Quirk y Murria, 1991).

La estabilidad de los agregados es la capacidad de estos en mantener su forma al estar sometidas a factores adversos como la humectación, la acción de las gotas de lluvia, etc. También se pueden romper a través de cuatro mecanismos como los humedecimientos diferenciales, impacto de las gotas de lluvia y dispersión físico-química (Bissonnais, 1996).

Delgado et al., (2000) indican que la materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico y el contenido de potasio intercambiable sí aumentan la estabilidad de los agregados, mientras que el porcentaje de arena, la densidad aparente y el contenido en carbonato cálcico provocan su descenso.

El aumento de la materia orgánica favorece el mejoramiento de la estabilidad de los agregados en suelos, son directamente proporcionales (Tisdall y Oades, 1982; Kolar et al., 2000). Según Cerdá (1998), la vegetación también favorece la formación y estabilidad de los agregados. Como ya se explico anteriormente la presencia de sodio en el complejo de cambio catiónico disminuye la estabilidad de los agregados (Emerson, 1967; Kazman, Shainberg y Gal, 1983; Frenkel y Goerzen, 1978; Shainberg et al., 1992).

2.2.3.3 DENSIDAD REAL

La densidad real de los suelos minerales varía mucho menos que la densidad aparente. La mayor parte oscilan entre 2,6 y 2,7 g/cm³. Suele suponerse que la densidad real de los suelos minerales es de 2,65 g/cm³ (Thompson y Troeh, 1988).

En un horizontes orgánicos el valor oscila entre 1100 a 1400 kg m⁻³, en horizontes rico en mineral pesado la densidad es de 2750 kg m⁻³.

El valor de la densidad real es el resultado de la división de la masa del sólido y el volumen del mismo.

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad \text{kg m}^{-3}$$

2.2.3.4 DENSIDAD APARENTE

La densidad aparente se utiliza para calcular la porosidad total del suelo y en estudios de relación suelo agua, aunque también se emplea para la interpretación de análisis de laboratorio para el campo (Forsythe y Díaz-Romeo, 1969).

En horizonte arenoso los valores de densidad aparente oscilan entre 1 450 a 1 600 kg m⁻³, en horizontes arcillosos con estructura alcanza valores de 1 050 a 1 100 kg m⁻³ y en horizontes compactados de 1 900 a 1 950 kg m⁻³. La división de la masa y el volumen total es el resultado de la densidad aparente de la muestra.

$$\rho^b = \frac{M_s}{V_t} \quad \text{kg m}^{-3}$$

En un estudio hecho por Alvarado y Forsythe, (2005) se constato que la densidad aparente aumentaba con la profundidad del suelo debido a la reducción de la actividad biológica desarrollada en el horizonte superficial. Los suelos ricos en materia orgánica tienden a formar agregados fácilmente y por consiguiente la disminución de la densidad aparente, además es mucho más ligero que el material mineral.

Trabajos hechos por varios autores para evaluar las variaciones de la densidad aparente del suelo bajo distintos sistemas de labranza han llegado a diferentes resultados. Vidal y costa, (2000); Gudelj y Masiero, (2000); Elisondo et al. (2001), encontraron valores altos de densidad aparente en siembra directa, Ellis et al. (1979); Sánchez y García (1998) obtuvieron menores resultados bajo siembra directa mientras Miglierina et al. (1998) no encontraron diferencias de la densidad aparente entre los tratamientos de siembra directa.

La relación de la densidad aparente y la estructura del suelo son evidentes, su interés desde el punto de vista de manejo del suelo nos informa sobre la compactación, dificultades de emergencia, enraizamiento y circulación del agua y aire en el suelo.

La densidad aparente del suelo aumenta con la humedad de suelo, se puede decir que se logra una densidad máxima a una determinada humedad del suelo (humedad óptima). Por otro lado existe una relación estrecha entre la densidad y la cohesión interna de los terrones (dureza) cuando más denso, mayor es la densidad. Según Sojka et al. (2001); Salako et al. (2007) la consistencia del suelo está relacionada con la humedad del suelo y la densidad aparente, que podría variar en diferentes profundidades.

Si el suelo no se presenta compacto solo hay un aumento significativo de la densidad aparente cuando se acumula arcillas iluviadas en los horizontes argílicos, donde la arcilla se deposita sobre los agregados del suelo reduciendo los espacios vacíos. Esto ocurre con frecuencia en los Alfisoles y Ultisoles (Porta et al., 2003; Alvarado y Forsythe, 2005).

En los Vertisoles los valores de densidad aparente están determinados en gran medida por la presencia de montmorillonita ($2,5 \text{ Mg m}^{-3}$). Estos valores dependen en gran medida si la muestra se tomó en ciclo húmedo o seco, teniendo en cuenta el grado de expansión de la masa del suelo y la presencia o no de ciertas grietas en la muestra de suelo a ser determinada en el laboratorio. (Ahmad, 1983).

2.2.3.5 POROSIDAD

Según Dexter et al. (2008) la porosidad es el volumen de los poros por unidad de volumen del sólido (mineral o orgánico). La porosidad total se define como la suma de la porosidad residual y la macroporosidad (pequeños y grandes poros) con la suma de la porosidad de la matriz del suelo que es el espacio poroso entre las partículas minerales y por último la porosidad estructural que se define como el espacio poroso entre los microagregados y los agregados incipientes.

$$e_{total} = e_{residual} + e_{matrix} + e_{estructural} + e_{macro}$$

La porosidad estructural de la mayoría de los suelos esta compuesta por micro grietas (elongated transmission pores) Pagliai et al. (2007) y tiene una gran importancia en la vida microbiana del suelo.

Como consecuencia de la textura y estructura del suelo tenemos su porosidad, es decir un sistema de espacios vacíos o poros. Los macroporos son de notables dimensiones, y están generalmente llenos de aire, en efecto, el agua los atraviesa rápidamente, impulsada por la fuerza de la gravedad. Los microporos en cambio están ocupados en gran parte por agua retenida por las fuerzas capilares.

Los terrenos arenosos son ricos en macroporos, permitiendo un rápido pasaje del agua, pero tienen una muy baja capacidad de retención. Mientras que los suelos arcillosos son ricos en microporos, y pueden manifestar una escasa aeración, pero tienen una elevada capacidad de retención del agua.

Las técnicas de no laboreo o siembra directa pueden ver compensadas por sus bajos porcentajes de porosidad estructural, debido a la alternancia de ciclos de humectación-deseccación, que resultan suficientes para alcanzar un buen balance aire-agua y facilitar el desarrollo de las plantas (Cerisola et al., 2005).

El efecto del cultivo sobre la porosidad es evidente. Las labores de cultivo, aumentan la densidad aparente temporalmente pero poco a poco el suelo se compacta y termina siendo más denso que los adyacentes. El cultivo provoca una reducción del contenido de materia orgánica. La exposición del suelo a las gotas de la lluvia, la acción de la maquinaria y otros factores afectan la estabilidad de los agregados y reducen el tamaño de los poros (Thompson y Troeh, 1988).

El agua solo se mueve libremente en poros mayores de 0,3 mm., que necesitan succiones menores de 1 kPa para vaciarse, las raíces de plantas jóvenes también necesitan poros alrededor de este tamaño para penetrar fácilmente en el suelo. Bajo la acción de la

gravedad el agua drena a través de poros mayores de 60 a 30 μm , poros que necesitan succiones de 5 a 10 kPa para vaciar el agua.

Las arcillas mas finas tienen la mayoría de sus poros menores de 0,1 μm de diámetro y son difíciles de manejar, con tendencia a permanecer húmedas durante períodos largos, cuando son muy débiles y se enlodan fácilmente, aunque al secarse se vuelven muy fuertes y duras (Wild, 1992).

2.2.3.6 COMPACTACIÓN

La compactación no es más que el aumento de la densidad aparente como resultado de una carga aplicada o de presión. “La compactación del suelo es un comportamiento dinámico del suelo por el cual este estado de compactación aumenta” (Gill y Vanden Berg, 1967).

Draghi (2000), define la compactación como la compresión de suelo no saturado con el aumento consiguiente de la densidad de los mismos y simultáneamente una reducción del volumen de aire; ocurriendo claramente una modificación de la estructura del suelo, producto de la cual se alteran los procesos físicos, químicos y biológicos que conducen a la modificación de todos los ciclos de interés para la producción agropecuarias y forestal.

Uno de los factores externos que provoca la compactación en los cultivos es el tránsito de la maquinaria agrícola (Hamza and Anderson, 2005). Según Chamen et al., 2003 esto depende del tipo de suelo, contenido de agua, peso del vehículo, velocidad y la cantidad de pases. En un estudio hecho por Claverie et al. (2000) sobre el efecto del tráfico de cosecha sobre las propiedades físicas del suelo en una determinada plantación constato que la resistencia a la penetración (uno de los indicadores de compactación) en las zonas transitadas resultó significativamente mayor hasta los 150 mm de profundidad, siendo el efecto del tráfico detectable hasta los 380 mm. A partir de los 150 mm., los tratamientos superaron valores de 1,5 MPa que reducirían el crecimiento radical.

La disminución de la macroporosidad del suelo produce una baja capacidad de aireación y oxigenación del suelo. Esto provoca una disminución de la actividad de las raíces y, consecuentemente, un menor crecimiento de éstas. Se nota un menor volumen de suelo explorado y una menor absorción de agua y nutrientes, los cuales son la causa del

rápido descenso de la productividad de los suelos agrícolas que ciertamente viene afectado por la compactación.

Es evidente la implicación de este fenómeno en el desarrollo de los cultivos, afectando principalmente el abastecimiento de agua y nutrientes a la planta. También altera la capacidad de infiltración, su redistribución en el perfil del suelo, la aireación, la transferencia de calor y el movimiento de nutrientes. La reducción de la tasa de infiltración aumenta las pérdidas por escorrentía y disminuye la reserva disponible para los cultivos (Gil et al., 1993).

La medición de la densidad aparente y la resistencia a la penetración resulta ser un mecanismo importante para el estudio de la compactación teniendo en cuenta el desarrollo normal del sistema radical de la planta. Varios actores han empleado estas mediciones para estudiar la compactación como De León et al. (1998).

Múltiples investigaciones fueron realizadas para constatar la relación de esta propiedad física con la siembra directa, Domínguez et al. (2000), constató mayor compactación en tratamientos con siembra directa, autores como Senigalesi y Ferrari (1993); Leiva y Hansen (1984) también llegaron a la misma conclusión. El efecto que produce la compactación sobre el suelo puede describirse como un reordenamiento en la matriz porosa del suelo, es decir, disminuye el volumen de poros totales, produciendo cambios en la distribución del tamaño de los mismos, ocasionando un mayor porcentaje de poros pequeños (Breland y Hansen, 1996).

2.2.3.7 SELLADO Y ENCONSTRAMIENTO

2.2.3.7.1 CONCEPTO Y PROCESOS

ISSS (1996) define el sellado como la capa delgada de unos pocos milímetros de espesor, cuyo origen se asocia al efecto de las gotas de agua de lluvia sobre la superficie del suelo desnudo. Con una densidad aparente alta en relación al suelo subyacente, presenta una porosidad mucho menor que la del suelo subyacente a causa de la reorganización de las partículas individuales, ya sea por colapso de la estructura superficial por expansión de las arcillas al humectarse, por compactación mecánica o por

dispersión de arcillas. En este proceso se observa una baja porosidad frecuentemente de tipo vesicular por el aire atrapado durante la humectación. Las arcillas dispersadas por el impacto de las gotas de lluvia durante la destrucción de los agregados se pierden tanto en el escurrimiento como en la infiltración (Gamiño y Walthall, 2000).

Hay dos tipos de sellados o encostramiento relacionado con la escorrentía. El sellado sedimentacional (Slattery y Bryan, 1994) que está asociado con zonas sometidas a un flujo de escorrentía suficientemente intenso para causar la movilización y reordenación superficial de las partículas; y el sellado de costra laminar o también conocido como “afterflow seal”. Ésta se produce a partir de la deposición de las partículas más finas movilizadas por el flujo de escorrentía, constituyendo una capa delgada e impermeable. Este proceso está relacionado con el flujo de recesión de la escorrentía tras el cese de la lluvia.

Como consecuencia del sellado se observa una baja velocidad de infiltración debido a la disminución de la macroporosidad, lo que hace aumentar la escorrentía superficial y la erosión al tiempo que disminuye el almacenamiento de agua en el suelo y reduce la conductividad hidráulica al agua y al aire. En terrenos llanos se produce encharcamiento y en pendiente da lugar a escorrentía superficial. La dispersión de agregados de los suelos por factores físicos o químicos, durante el encostramiento del suelo, es el resultado de una alteración de la morfología de la superficie del suelo (Gamiño y Walthall, 2001). Las características morfológicas más afectadas son la porosidad, distribución del tamaño de las partículas y su orientación (Bresson y Boiffin, 1990).

En la formación de costra la textura desempeña un gran papel según Kemper y Koch, (1966); Lado et al. (2004). La tendencia del suelo para formar costra depende de la estabilidad estructural, la cual se incrementa con el aumento del contenido de arcilla. Según Regués (1995); Regués et al. (2000); Regues y Torri (2002) en los suelos arcillosos especialmente si presentan porcentajes significativo de esmectitas, los procesos de humectación-desección están más relacionados con el encostramiento que con la meteorización física, y como consecuencia de la retracción que experimentan las arcillas al deshidratarse se produce una reordenación estructural y una disminución de la porosidad.

El ISSS (1996) define el encostramiento a partir de un sello superficial de unos pocos milímetros hasta quizás tres centímetros de espesor con estructura laminar con baja porosidad frecuentemente de tipo vehicular, alta densidad aparente, poco permeable al agua y al aire, extremadamente compacto, consistencia dura aumentando a medida que se va secando. Este endurecimiento ocurre como consecuencia de la dispersión de las partículas

edáficas (McIntyre, 1958; Morin et al., 1981; Stern et al., 1991). El viento al incrementar la velocidad de las gotas también contribuye a la dispersión de las partículas (Silva, 2007).

Según Baver et al. (1991) las costras del suelo se forman por compactación superficial debida a una fuerza externa. Esta fuerza es primariamente el choque de las gotas de lluvia y de la energía radiante del sol durante la desecación. Cuando las gotas de lluvia caen en un suelo seco, se produce una manera casi instantánea de disgregación de los agregados seguida por la dispersión y orientación de las partículas más finas y la oclusión de los poros al penetrar estas partículas en el suelo. Agassi et al. (1985) demostró que cuando el suelo esta expuesto a lluvia con energía cinética menor de $0,01 \text{ J mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$ el sellado no se forma.

Es notable la relación que existe entre la formación de costra y la estabilidad de los agregados del suelo, y de los factores que dependen de ella como el contenido de arcilla, oxihidroxidos libre, composiciones iónicas del complejo de cambio catiónico y, la materia orgánica (Kay y Angers, 2000) éste último influye en el impacto de las gotas de lluvia. Según Ekwe (1990), el desprendimiento de partículas de la matriz del suelo por la acción del impacto de las gotas disminuye exponencialmente al aumentar el contenido de materia orgánica de 0 a 12%.

Estudios realizados por Alonso et al. (2003) en la comunidad madrileña constataron que el encostramiento superficial, y por lo tanto su erosionabilidad esta relacionada con el factor roca madre, condicionador de la textura, principalmente en los suelos poco evolucionados. En la relación encostramiento – textura, la fracción arena es un factor de riesgo (Poesen, 1992).

Regués y Torri (2002), considero la rugosidad superficial como indicador principal del grado de encostramiento o sellado superficial. Pues la disminución de la rugosidad implica una serie de transformaciones que afectan las propiedades mecánicas e hidráulicas de la superficie del suelo, dado que condiciona la intensidad y la velocidad de escorrentía, especialmente para flujos con reducido radio hidráulico.

El encostramiento también tiene una gran relación con la infiltración y la resistencia mecánica, mientras mayor sea el espesor de la costra mayor es la resistencia mecánica y menor es la infiltración (figura 10). El incremento de la resistencia mecánica causada por el encostramiento dificulta el crecimiento de las plantas (Panayiotopoulos et al., 1994; Beemster and Masle, 1996), ya que generan problemas para el nacimiento de las plantas por la dureza superficial y la poca disponibilidad de agua en la superficie.

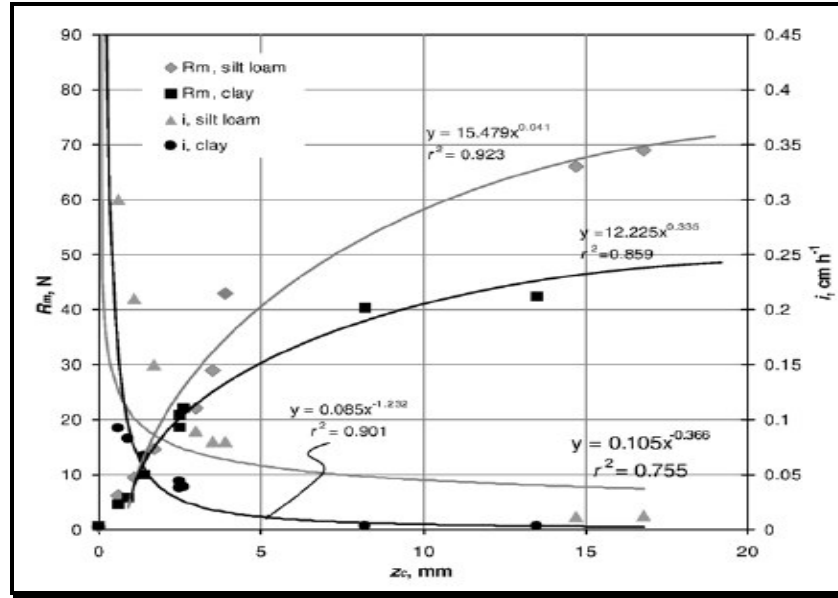


Figura 10. Efecto del espesor de la costra (Z_c) sobre la resistencia mecánica (R_m) y velocidad de infiltración (i) en suelo franco limoso y arcilloso. Fuente: Bedaiwy (2008).

La formación de las características de la costra como el grosor no es lo mismo en cada suelo. Bedaiwy, (2008) concluyó en estudios realizados que el grosor de la costra es mayor en el suelo franco limoso que en el suelo arcilloso. La formación de costra está muy relacionada con la textura, siendo las partículas tamaño limo y arena fina las que más fácilmente se separan de la matriz del suelo (Poesen, 1992).

2.2.3.7.2 MÉTODO DE ESTUDIO Y PREDICIÓN DEL RIESGO

Varios autores utilizaron el penetrómetro para predecir los cambios estructurales relacionados con la superficie del suelo como la resistencia mecánica, relacionado con el sellado, encostramiento, compactación etc. (Sun et al., 2006; Stelluti et al., 1998; Carrara et al., 2007; Dexter et al., 2007; Bengough and Mullins, 1990).

Gamiño y Walthall (2000) utilizaron el microscopio electrónico para la caracterización de cambios morfológicos durante el encostramiento de la superficie en suelos de México y Louisiana. Chen et al. (1980) hizo observaciones con un microscopio de barrido en muestras inalteradas.

El módulo de ruptura se puede medir en costras de suelo y se ha encontrado que está relacionado con la emergencia de plántulas y el rendimiento de algunos cultivos

(Gavande, 1973). En este sentido, se puede mencionar que valores del módulo de ruptura mayores de 3 kg/cm², indican posibles problemas a los efectos de alta cohesión en seco, antes señalado (Pla, 1977). Los estudios de la inestabilidad de los agregados, la variación del movimiento del agua a lo largo de la lluvia y la evaluación de la variación de la conductividad hidráulica del sello superficial, también se utilizan para predecir el riesgo de sellado y encostramiento. Vandervaere et al. (1998) utilizó infiltrómetro de disco para realizar predicciones acerca de la escorrentía superficial inducida por el encostramiento.

La FAO, (1983) desarrolló un índice empírico para predecir el riesgo del encostramiento a través del porcentaje de limo fino y grueso en relación al porcentaje de arcilla y materia orgánica.

$$En = \frac{1,5 \cdot Zf + 0,75 \cdot Zc}{C + (10 \cdot MO)}$$

Siendo:

En: Índice de encostramiento;

Zf: porcentaje de limo fino;

Zc: porcentaje de limo grueso;

C: porcentaje de arcilla;

MO: materia orgánica.

Se considera leve, cuando $En < 1$: este no impide la emergencia de las plántulas, aumenta ligeramente el escurrimiento superficial. El fenómeno de la arenilla se manifiesta moderadamente; se considera moderado, cuando el $En = 1,1$ a $1,5$: Impide la emergencia de las plántulas, aumenta moderadamente el escurrimiento superficial y el fenómeno de la arenilla es grave con caída de plantas, exige resiembra y labores superficiales para generar rugosidad para la protección de las plantas; se considera alto cuando $En > 1,6$: Impide la emergencia de las plántulas, aumenta fuertemente el escurrimiento superficial. El fenómeno de la arenilla es muy grave con caída de plantas, exige resiembra y labores superficiales para generar rugosidad para la protección de las plantas.

2.2.3.7.3 PRACTICAS DE PREVENCIÓN

El surgimiento del sellado y encostramiento es fruto de un proceso de degradación del suelo, en muchos casos es consecuencia de las actividades agropecuarias como el riego, sobrepastoreo, sobreexplotación y manejo inadecuado de los suelos. Generalmente el bajo contenido de materia orgánica, fracción arcilla de baja actividad, elevado contenido en limo y arena fina, susceptibilidad a la liquefacción (arcillas susceptibles a humectarse) contribuyen en la formación del sellado y encostramiento. Sobre las condiciones climáticas se puede señalar la intensidad de la lluvia, el tamaño de las gotas, la energía cinética y el viento que seca rápidamente la superficie del suelo (Awadhwal y Thierstein, 1985).

Langmaack, et al. (2000) estudiaron el efecto de la mesofauna en la rehabilitación de la superficie de suelo con sellado, a través de la acción de 500 individuos de *Collembola* y *Enchytraeidae* en un suelo bajo lluvia simulada. La utilización de restos de cultivo (mulching); la protección del suelo por medio de un cultivo; la necesidad de realizar laboreo mínimo para aumentar la infiltración, aireación y disminuir la escorrentía cuando el suelo lo permite; reponer elementos como el nitrógeno mediante la implantación de leguminosas son unas de las medidas muy utilizadas. Para mejorar la estructura del suelo se incorpora materia orgánica, y otros mejoradores de las propiedades físicas del suelo. La utilización de boquillas que producen gotas pequeñas (nebulizadores) y el riego con bajas intensidad evita en gran medida la formación de costra en los suelos, algunos cuidados como evitar el encharcamiento en zonas sembradas puede facilitar la germinación de las semillas.

2.2.4 TEXTURA DEL SUELO

Según el I.G.A.C. (1990), el término textura hace referencia a la proporción relativa en que se encuentra un masa del suelo, varios grupos de granos individuales asociados por tamaño. Se refiere específicamente a las proporciones relativas de las partículas o fracciones de arena, limo y arcilla en tierra tamizada con diámetro inferior a 2 mm. La textura representa la composición granulométrica de las partículas elementales del suelo, las mismas se clasifican por el tamaño de las partículas desde un punto de vista edáfico y no mineralógico (Cobertera, 1993). Esta propiedad es una expresión sintética de las

características de cada horizonte que dependen de la proporción de los distintos tamaños de partículas (Porta et al., 2003). Según Carpena y Rodríguez (2005), define la textura como una propiedad fundamental del suelo ya que permite inferir en otras propiedades como: la capacidad de retención hídrica; facilidad de circulación del agua; en el laboreo del suelo; susceptibilidad en la formación de costra; riesgo de erosión eólica; capacidad de almacenamiento de nutrientes, etc...

La textura tiene una gran influencia en el comportamiento del suelo (tabla 7) la tendencia de un suelo a tener una permeabilidad elevada o no depende de la fracción granulométrica, en este aspecto existe una gran relación entre la granulometría y su comportamiento.

Fracción predominante	Interpretación
Elementos gruesos	Disminuyen la cohesión en horizontes muy arcillosos, lo que favorece la penetración de las raíces en la interfase elemento grueso-matriz. Aumentan la permeabilidad si se hallan en proporción suficiente. Si son porosos retienen humedad. Frenan la erosión y las pérdidas de agua si recubren el suelo. Liberación potencial de nutrientes al meteorizarse. Suelos pedregosos. Dificultan el movimiento de la fauna en el suelo. Menor almacenamiento de agua. Menor cantidad de nutrientes asimilables. Efecto abrasivo para los aperos y sembradoras. Roturas en dientes de segadoras por pedregosidad superficial. Deformaciones en el crecimiento de raíces gruesas.
Arena gruesa	Macroporosidad alta. Permeabilidad alta. Compacidad baja. Poca inercia térmica. Facilidad de laboreo. Energía de retención de humedad baja. Almacenamiento de nutrientes bajo, CIC baja. Capacidad de retención de agua disponible para las plantas (CRAD) baja.
Arena fina	Propiedades intermedias entre arena gruesa y limo. Minerales poco meteorizables. Riesgo de erosión eólica alto.
Limo (franco-limoso)	Fertilidad física deficiente. Riesgo de sellado y de encostramiento superficial. Velocidad de infiltración baja. Inestabilidad estructural alta. Permeabilidad de media a baja. Compacidad media. Erosionabilidad alta. Almacenamiento de nutrientes medio. CRAD de media a baja.
Arcilla	Fertilidad química alta, según mineralogía. Superficie específica muy alta. Capacidad de intercambio catiónico alta, dependiendo de la mineralogía de arcillas. CRAD alta. Permeabilidad baja, dependiendo que se puedan formar pseudolimos o pseudoarenas. Microporosidad alta. Compacidad alta. Dificultad de laboreo, debido a su elevada plasticidad (estado húmedo) o compacidad (en seco). Energía de retención de humedad alta. Gran inercia térmica. Dificultad a la penetración de las raíces.

Tabla 7. Granulometría y su comportamiento. Fuente: Porta et al., (2008).

2.2.5 PROPIEDADES HIDRÁULICAS DEL SUELO

2.2.5.1 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

El suelo como medio de aporte de agua a los cultivos depende no tanto del volumen que ofrece para su almacenamiento, si no de la rapidez con que se movilizan las raíces hacia el agua antes que se vaya a los estratos subterráneos o se pierda de la superficie del suelo a la atmósfera. Si el movimiento del agua dentro del suelo es más lento que la velocidad de absorción por las plantas, existirá la posibilidad de que los poros tiendan a permanecer llenos de agua y se impida o limite la oxigenación del suelo. Si el movimiento del agua es rápido, comparado con la expansión y absorción radicular, se corre el riesgo de un limitado suministro de agua a los cultivos. Si la penetración del agua al suelo es lenta comparada con el escurrimiento superficial, el proceso erosivo será mayor. Y si la velocidad con que asciende el agua del nivel freático es mayor que la velocidad de absorción de agua por las plantas, o que la evaporación potencial, determinada por las condiciones atmosféricas, el suelo tiende a salinizarse (Norero, 1974; IGAC, 2000).

Como se puede constatar la importancia del conocimiento de las propiedades hidráulicas del agua es muy importante para el manejo eficiente de los recursos hídricos evitando la degradación de los suelos y obteniendo altos rendimientos. Es evidente el exceso o déficit hídrico como limitante de la productividad agraria. Varios autores aportaron conocimientos valiosos en relación al estudio de la conductividad hidráulica del suelo como Klute et al. (1986); Ghildyal y Tripathi, (1986); Smith y Mullins, (1991); Clarke et al. (1992).

Al analizar la conductividad hidráulica es importante referirnos de esta propiedad en suelo saturado y en suelo insaturado. El primero se refiere claramente al movimiento de agua en un suelo donde los espacios porosos están llenos de agua, en este caso se pone en evidencia el flujo con capa freática circundante para alimentar las plantas. La ley de Darcy hace referencia al flujo de agua en condiciones saturadas, donde planteo que la descarga de agua es directamente proporcional a la sección transversal de la columna y a la diferencia de carga o potencial hidráulico. Y es inversamente proporcional a la longitud de la columna (cilindro con suelo saturado). La conductividad hidráulica expresa la capacidad de un medio poroso (suelo) para transmitir agua.

$$Q = -K \frac{h_2 - h_1}{L} \cdot A = -K \frac{\Delta\psi_H}{L} \cdot A$$

Donde:

Q : es el caudal

A : sección transversal de la columna

Ψ_H o H : potencial hidráulico

$\Delta\Psi_H$: diferencial de potencial hidráulico

L : longitud de la columna

La resistencia del suelo al flujo de agua es debido a las fuerzas entre las moléculas del líquido y entre éste y las paredes de los poros. Cuando mayor es la tortuosidad (τ) del sistema de poros, menor es la conductividad hidráulica.

$$\tau = l/L$$

Donde:

l , es la trayectoria real del agua en el cilindro

L , es la distancia en línea recta de de la trayectoria del fluido.

La conductividad hidráulica en condiciones no saturadas que es el segundo caso, se expresa por la ley Buckingham – Darcy, la misma resulta difícil de medir con precisión en relación al suelo saturado, y no existe un método cuya validez sea general para todos los suelos.

$$q = -k(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \quad \text{m}^2 \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$$

Donde:

q : es el flujo o volumen de agua que circula (conductividad hidráulica) a través de una superficie unidad por unidad de tiempo.

K : es la conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad

H : es el potencia

Z : la distancia

También hay que tener en cuenta varios factores que afectan el movimiento del agua o conductividad eléctrica como:

Tamaño de las partículas:

Es uno de ellos, teniendo en cuenta la constitución mineral predominante en los suelos, la forma más o menos esférica de las partículas o el tamaño influyen en el sistema capilar de los poros. Según la ley de Poiseville un incremento en el diámetro causa mayor descarga, esta proporcionalidad se observa hasta la cuarta potencia del diámetro del poro, un incremento del tamaño del diámetro del poro significa una disminución de éstos. Para una porosidad con una misma forma de poros, el número de éstos por unidad de sección transversal es inversamente proporcional al cuadrado de su diámetro. Park and Smucker (2005) verificó que el valor de la conductividad hidráulica se incrementaba con el aumento del tamaño de los agregados cada vez que se incrementaba, y verificó que el incremento de 2 a 4 hasta de 4 a 6 mm., no afectó el valor de la conductividad hidráulica.

La porosidad del sistema:

La variación de forma, volumen y orientación de los poros del suelo modifican el carácter del movimiento del agua. La conductividad es mayor cuando los poros son más grandes.

Forma de las partículas:

La arena tiene diferentes formas teniendo en cuenta su esfericidad y redondez dependiendo de su origen, medio de transporte, grado de alteración etc. La forma de las partículas tienen influencia en el perímetro de la sección transversal de los poros, y constituye un factor determinante en la compactación de los suelos y en la conductividad hidráulica.

Distribución de las partículas:

Cuando las partículas son de diferentes tamaños las más pequeñas pueden acomodarse a las más grandes, bloqueando una gran cantidad de poros, y disminuyendo el movimiento del agua, al contrario que cuando tiene la misma dimensión.

Contenido y distribución de las arcillas:

Las montmorillonite tienen mayor capacidad de retención de agua que las illitas y presenta gran capacidad de bloqueo relativo a su peso. La agregación de las partículas de arcillas raras veces es continua ya que están colocadas lenticularmente entre las arenas, pese a no obstruir el movimiento del líquido sí produce una disminución del gradiente hidráulico, a causa del camino tortuoso y largo que tiene que seguir el agua.

Zhang y Horn (2002) estudiaron la influencia del desplazamiento de suelo inducido en el cambio de la conductividad hidráulica en suelo humedecido. Este estudio concluyó que el rompimiento por deslizamiento aumento la agregación del suelo debido a la reorganización de las partículas y consecuentemente cambió la porosidad del suelo en la mayoría de los suelos estudiados, por lo demás disminuyó la conductividad hidráulica de los suelos cultivados.

En algunos casos se usa mejoradores del suelo como “liming” que es la aplicación de calcio y magnesio en forma de marga, tiza, piedra caliza, o cal hidratada para neutralizar la acidez del suelo y aumentar la actividad de las bacterias. Según Kirkham et al. (2007) el “liming” aumenta la conductividad hidráulica.

Gerke y Kohne (2002), estudio la diferencia entre la conductividad hidráulica en el interior y exterior de las laderas este autor sugiere que la discontinuidad de los poros en los macroagregados es el resultado de la acumulación de arcilla en los agregados superficiales del suelo retardando el movimiento del agua entre el interior y exterior de los agregados.

2.2.5.2 INFILTRACIÓN

Uno de los aspectos importantes en la agricultura es el abastecimiento de agua a los cultivos, sea por el riego o por las precipitaciones. La infiltración es el proceso por el cual el agua superficial se introduce en las capas internas del suelo debido básicamente a las fuerzas gravitatorias, aunque también intervienen fuerzas de tipo capilar así como otras de naturaleza más compleja como química, etc.

Durante el transporte del agua en el suelo se puede señalar varios factores que afectan este proceso, uno de ellos es el sellado. La entrada del agua a la superficie del suelo puede obstruirse por sellamiento u ordenamiento de las partículas del suelo, impidiendo o retardando el flujo del agua dentro del mismo. Estudios hechos por Moore (1981); Morin et al. (1981); Thompson y James (1985); Mohammed and Kohl (1987); Basahi et al. (1998) ponen en manifiesto la relación de la infiltración a través de la formación del sellado y enconstramiento provocado por el impacto de las gotas de lluvia.

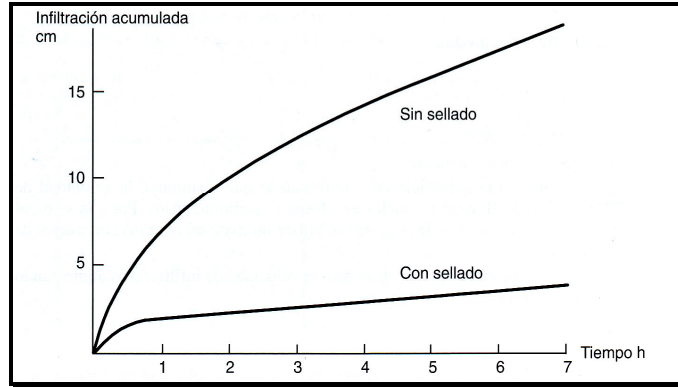


Figura 11. Efecto de la infiltración acumulada sobre un Suelo con o sin enconstramiento. Fuente: Porta et al. (2003)

La capacidad de almacenamiento puede afectar directamente las tasas de infiltración durante la lluvia. Éstas están controladas por los horizontes del suelo, y por la disminución de la reserva de humedad disponible para las plantas. Es decir las características del suelo constituyen otro factor que afecta a la infiltración, entre ellos se destaca la textura, estructura, cantidad y tipo de arcilla y los contenidos de materia orgánica.

Autores como Hakansson y Lipiec (2000); Van Dijck y Asch (2002), estudiaron la relación entre la compactación y la infiltración. Alaoui y Helbling (2006) hizo un análisis cuantitativo de la infiltración bajo diferentes niveles de saturación que permitió ofrecer información de la compactación sobre la estructura del suelo. La conductividad hidráulica de los distintos horizontes, el contenido inicial de humedad, la salinidad-sodicidad, influyen en este proceso. Mediante el uso y manejo de los suelos se puede modificar la infiltración dentro de unos límites relativamente amplios y convenientes. Ouattara et al. (2007); Govaerts et al. (2006) destacan la importancia de la aplicación de la materia orgánica como compost para mejorar la infiltración.

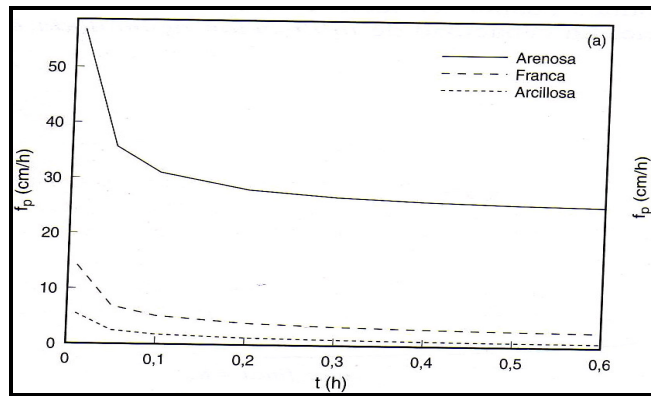


Figura 12. Efecto de la textura sobre la infiltración del agua. Fuente: Porta et al. (2003)

El contenido de material en suspensión en el agua también afecta en poca medida la infiltración. Estudios hechos demostraron que la escorrentía es menor en áreas donde el suelo esta cubierto por pastos o bosque, debido a que el agua tiene poco material en suspensión, mientras que en áreas cultivadas el contenido de material en suspensión es relativamente alto, ocasionando taponamiento de los poros mas finos y permitiendo mayor escorrentía y menor velocidad de infiltración. La temperatura y la viscosidad también afectan la infiltración. Según Chu et al. (1987); Portas et al. (2003), la característica de la lluvia o del riego como la intensidad, tamaño de las gotas, energía cinética de la lluvia también influyen en la infiltración.

La pendiente y la vegetación son factores influyentes, teniendo en cuenta las características del medio; y otros factores interferentes como el aire atrapado, laboreo reciente y el pisoteo también se destacan entre los factores que afectan la infiltración.

Hay varias razones que cabe imputar una mayor infiltración en un sistema con cubierta vegetal como es el caso de la reducción del impacto de las gotas de lluvia y la energía cinética sobre la superficie del suelo por lo que la estructura de la capa más superficial del suelo sufre una mínima degradación, evitándose así la formación de la costra responsable de la drástica reducción de la infiltración; la cobertura vegetal también disminuye la velocidad del agua de escorrentía sobre la superficie del terreno, lo que hace posible un mayor almacenamiento; la vegetación aumenta la macroporosidad del suelo, lo que unido a la acción de las raíces, contribuyen a crear conductos preferenciales al agua, lo que igualmente aumenta la infiltración; El sistema radicular de la cubierta vegetal contribuye gradualmente a lograr la descompactación de las suelas de labor, por lo que con el tiempo y en una situación de no laboreo se mejora la infiltración en profundidad.

2.3 EL AGUA DEL SUELO

2.3.1 GENERALIDADES

El conocimiento del comportamiento del agua es importante para el entendimiento de la mayoría de los fenómenos físicos del suelo. El agua participa en diferentes procesos de formación y destrucción de la estructura del suelo como en el hinchamiento (expansión) y contracción de los coloides provocados por el humedecimiento y secado del suelo; el agua provoca tensión superficial entre las partículas (cohesión y adhesión); el agua favorece la formación de electrolitos en el suelo y al aumentar el potencial

electrocinético de la arcillas se dispersarán debido a la dilución; el mantenimiento de una humedad adecuada en el suelo favorece la formación de la estructura del suelo.

El agua es considerada como uno de los componentes más dinámicas del suelo, el agua afecta intensamente muchas reacciones físicas y químicas que se suceden en el suelo, como también el crecimiento de las plantas. El contenido del agua influye en el aire y los movimientos de los gases en el suelo, afectando así los fenómenos de respiración, la actividad de los microorganismos y el estado químico del suelo (reacciones de oxidación - reducción).

Según Hillel (1982), la variación del contenido de agua en una unidad de masa o volumen y el estado de energía del agua en el suelo, son los factores más importantes que afectan al crecimiento de las plantas. Otras propiedades del suelo también dependen del contenido de humedad, entre ellas las propiedades mecánicas, tales como la consistencia, la plasticidad, la compactación y la penetrabilidad.

Para analizar el estado de energía del agua en el suelo, hay que señalar que el agua que se encuentra en los intersticios está afectada por diversas fuerzas que tienen su origen en la presencia de sales disueltas en ella, en fenómenos de interfase en los poros y entre las partículas coloidales y otras fuerzas exógenas como la gravedad, la presión hidrostática y la presión barométrica. Estas fuerza hacen que el agua sea adsorbida y retenida temporalmente por el suelo; que sea transferida o distribuida de un punto a otro en el perfil; que drene o percole; que fluya hacia la superficie y sea evaporada o que se desplace hacia las raíces de las plantas y sea transpirada por estas hacia la atmósfera (IGAC, 1990).

2.3.2 HUMEDAD DEL SUELO

El estudio de la humedad del suelo es muy importante para entender un gran número de procesos hidrológicos que, a su vez, están implicados en una gran variedad de procesos naturales (geomorfológicos, climáticos, ecológicos, etc.) que actúan a diferentes escalas espacio-temporales (Entin et al., 2000; Fernández, 2003). La humedad del suelo interviene en la infiltración, escorrentía. Interviene directamente en la separación de la radiación neta entre calor sensible y latente. Determina la cantidad de agua disponible para la evapotranspiración. Controla el flujo y la migración de productos químico hacia el interior (Fernández, 2003).

Según Mahmood (1996); Gomez (2000), el contenido de agua en el suelo es una variable de estado con múltiples implicaciones sobre el funcionamiento de los sistemas naturales. Desde una perspectiva hidromorfológica, independientemente de las características de la lluvia, la división de la precipitación entre infiltración y escorrentía esta directamente relacionada con el volumen de espacios porosos no ocupados por el agua al inicio del evento. La estabilidad de los agregados del suelo y por lo tanto su erosibilidad o susceptibilidad a ser erosionado, estará condicionada por la humedad (Cerda, 1997; Martínez-Mena et al., 1998; Ceballos et al., 2005)

La principal limitación de la agricultura en zonas áridas es la escasa disponibilidad de humedad en el suelo para el desarrollo de los cultivos (Hoogmoed, 1999) de hay surge la necesidad de explorar posibilidades para aumentar la conservación de la humedad en el perfil del suelo. Para ello hay muchos trabajos realizados relacionados con la aplicación de técnica para conservar la humedad del suelo, uno de ellos es la aplicación de cobertura vegetal con rastrojo en la superficie, estableciendo una barrera que provoca la reducción del agua que se evapora desde el suelo. Cuando mas rastrojo hay y cuando menos se halla movido el suelo, mejor conservación del agua tendremos para que sea aprovechada por el cultivo especialmente en periodo crítico (FAO 2000; Shaxson y Barber, 2003).

El contenido de agua en el suelo está caracterizado por dos variables medibles. El contenido de agua volumétrica y el gravimetrico. Con algunas técnicas como el TDR (*Reflectometría en el Dominio del Tiempo*) y FDR (*Reflectometría en el Dominio de la Frecuencia*) podemos obtener medidas de la humedad volumétrica y por el método directo se obtiene valores de humedad gravimetrica (gravimetría).

El contenido volumétrico de agua es la relación entre el volumen de agua que existe en el material y el volumen total de la muestra.

$$\theta_v = \frac{V_w}{V_{total}} \cdot 100 \quad (\%)$$

Siendo:

V_w : Volumen de agua contenido en la muestra.

V_{total} : Volumen de la muestra.

El contenido gravimétrico de agua es la relación entre la masa de agua contenida en la muestra y la masa de la muestra seca.

$$\theta_m = \frac{m_w}{m_s} \cdot 100 \quad (\%)$$

Siendo:

m_w : masa de agua contenido en la muestra.

m_s : masa de la muestra seca

La Correlación entre los contenidos gravimétrico y volumétrico del agua en el suelo consiste en convertir el contenido gravimétrico de agua al volumétrico, o viceversa con el valor de la densidad aparente de la muestra.

$$\theta_v = \theta_m \cdot \frac{\rho_a}{\rho_w} \quad (\%)$$

Donde:

$$\rho_a = \frac{m_s}{V_{total}} \quad \text{Densidad aparente}$$

ρ_w : Densidad del agua

2.3.3 MÉTODOS DE MEDICIÓN

2.3.3.1 TÉCNICA DE REFLECTOMETRÍA EN DOMINIO DE TIEMPO

Los estudios anteriores de muchos investigadores mostraron que la constante dieléctrica del suelo está relacionada con el contenido de agua del mismo. Una medida sencilla y segura de la constante dieléctrica, representa pues una medida práctica y eficaz del contenido de agua del suelo. Esto es posible utilizando el método de reflectometría en dominio de tiempo (TDR) el cual permite una medida de la humedad volumétrica “in situ”, tantas veces como sea preciso, sin destruir el lugar de muestreo, en el mismo sitio, y en un tiempo muy corto. Esto supone una gran ventaja, ya que la humedad del suelo es

una variable raramente estática, estando sujetas a variaciones temporales que es importante conocer. Para lo cual se necesita medidas repetidas en el mismo lugar, este método nos permite hacer un seguimiento de los cambios rápidos en la humedad del suelo. Además, cuando el porcentaje de agua en el suelo varía considerablemente en el espacio, la interpretación de los datos hace necesarias medidas simultáneas en diferentes puntos.

El TDR permite mediciones de humedad en distintos tipos de materiales, como suelo, materias químicas o pulverulentos, alimentos, emulsiones, grano etc., que no se podían realizar con los métodos anteriores. Además se puede utilizar distintos tipos de sondas de diferentes formas y tamaños para adaptar el sensor a las distintas condiciones.

Resumiendo el TDR es, por lo tanto, un método no destructivo que nos permite seguir con los cambios rápidos de humedad en el suelo y obtener el gran número de medidas necesarias para caracterizar la distribución del contenido de humedad en un suelo heterogéneo, todo ello en un tiempo muy corto.

2.3.3.1.1 PRINCIPIOS Y DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO TDR

El TDR es una técnica cuyos principios físicos fueron establecidos a finales de la década de los 60 básicamente, el método determina el contenido volumétrico de un material (% o m^3/m^3), midiendo el tiempo requerido por una onda electromagnética para atravesar un par de varillas metálicas introducidas en ese material. La medición del tiempo se realiza por los cambios más o menos bruscos producidos por las variaciones en la impedancia conforme la onda pasa del cable al suelo; lo que produce una reflexión parcial de la onda que regresa al reflectómetro, y un segundo reflejo que se produce cuando dicha onda alcanza el campo abierto al salir del extremo final de las varillas. El tiempo transcurrido entre ambas reflexiones está determinado por la denominada constante dieléctrica aparente ϵ , que depende del material. El fundamento de éste método es que la constante dieléctrica del agua es muy alta (80) en comparación con la del suelo seco (5), y del aire (1) (Topp et al., 1980; Notorio, 2001). El contenido de agua predomina sobre los tres valores, siendo determinado por el tiempo de paso de la señal electromagnética en la sonda (Zegelin et al., 1989). De modo que la variación del contenido de agua en el suelo es proporcional a la variación de la constante dieléctrica del suelo.

La técnica de TDR esta basada en el hecho de que la velocidad de tránsito, y por lo tanto el tiempo, depende únicamente de dos constantes del material. La constante dieléctrica ε , y la permeabilidad electromagnética μ :

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}}$$

La onda electromagnética viaja en el vacío a la velocidad de la luz, $C_0=3 \cdot 10^8$ m/seg., y la permeabilidad en suelos es generalmente igual a 1. Por lo tanto, el tiempo de tránsito sólo depende de la constante dieléctrica.

Al utilizar el TDR para medir la humedad, el pulso del voltaje aumenta rápidamente y la señal magnética es guiada a través de una transmisión lineal l , que al final del transcurso hace nuevamente el mismo recorrido (Topp et al., 1980; Souza et al., 2001 y 2003). sí la determinación del tiempo recorrido por la señal es t , el envío del impulso nos permite obtener la velocidad durante dos recorridos si medimos el tiempo de tránsito t , a velocidad de propagación del pulso c , vendrá dado por:

$$c = \frac{2 \cdot l}{t}$$

Cuando se combinan las ecuaciones obtenemos la constante dieléctrica en términos del tiempo de tránsito, el recorrido de la onda y la velocidad de la luz en el espacio:

$$\varepsilon = \left(\frac{c \cdot t}{2 \cdot l} \right)^2$$

La diferencia entre la alta constante dieléctrica del agua, la baja constante dieléctrica de los suelos y del airé hace posible derivar el contenido de agua de la constante dieléctrica medida. Una vez conocida la constante dieléctrica, la ecuación de Toop et al. (1980) nos permite calcular el contenido de agua del suelo.

$$\theta = -5.3 \cdot 10^{-2} + 2.93 \cdot 10^{-2} \varepsilon + 5.5 \cdot 10^{-4} \varepsilon^2 + 4.3 \cdot 10^{-6} \varepsilon^3$$

2.3.4 DESCRIPCIÓN DE OTROS MÉTODOS

Técnica de reflectometría en dominio de la frecuencia:

Los FDR (Reflectometría en Dominio de la Frecuencia) son también conocidos como sensores de capacitancia ya que utilizan esta técnica par medir el coeficiente dieléctrico ε , de la matriz del suelo. Los circuitos del sensor oscilan con una frecuencia

que depende de la capacitancia del suelo, determinada por la humedad del mismo. Es decir se basan en las propiedades del suelo como condensador eléctrico y miden el coeficiente dieléctrico aparente del mismo, el cual es fundamentalmente función de la humedad, dado que la constante dieléctrica ϵ , del aire es 1, el suelo tiene la constante dieléctrica ϵ , con valores de 2 a 5, y el agua 80.

Según Carpena y Rodrigues (2005), un sensor FDR hace un barrido de frecuencia de manera que esta indica el contenido de humedad del suelo. Con esta técnica el principio físico de la medida (generación de una corriente alterna a través del suelo) es distinto al del TDR, lo que se traduce en que el aparato resulta ser más económico.

Existen distintos tipos de sonda FDR como las sondas simples Theta probe ML2x, Wet-2, ECH2O, Aquaflex, etc. y sonda múltiples como EnviroScan, C-probe, y el mismo Theta probe cuyo diseño habitual es el de anillos concéntricos que se colocan a diferentes profundidades en el suelo.

También existen sondas FDR portátiles (Sentry, Diviner), en las que el sensor se desliza manualmente a lo largo del tubo de acceso, de forma similar a la sonda de neutrones, y permite así medir la humedad puntualmente a diferentes profundidades o bien obtener el valor medio a lo largo de todo el recorrido.

Determinación de la humedad del suelo por tensión o potencial del agua:

La disponibilidad de agua para las plantas no es función, del contenido, sino de la energía o potencial, ψ con que el agua esta retenida en el suelo. Esta fuerza, que debe vencer el sistema radicular para absolver el agua, es tanto mayor cuanto menor agua y cuantas más sales hay en el suelo. El potencial o tensión del agua, en un suelo no saturado, es la suma del efecto de las fuerzas de adhesión y cohesión en la matriz porosa del suelo (ψ_m), denominado tensión o potencial matricial, y del efecto de las sales (ψ_o): denominado tensión o potencial osmótico:

$$\psi_s = \psi_m + \psi_o$$

Uno de los instrumentos más utilizados para la determinación del potencial matricial del suelo son los tensiómetros, aunque hay otros como Piezómetros, Psicrómetros.

El bloque de yeso y el Watermark se utiliza para determinar indirectamente el potencial y el contenido de agua en el suelo por el método de la resistencia eléctrica. La resistencia al paso de la corriente eléctrica en un medio poroso, es proporcional al contenido de agua y a la concentración de sales. Los sensores de matriz granular (Watermark) son una adaptación del bloque de yeso, empleando materiales alternativos

(matriz granular) que no se disuelven tan fácilmente como el yeso, en su interior van los electrodos separados por una membrana y el conjunto se reviste exteriormente con una malla de acero inoxidable, tienen una vida útil 5 a 7 años.

Su intervalo de funcionamiento oscila entre -10 y -200 cbar. No responden muy bien a procesos de humedecimiento parcial y son precisos en el rango de suelo más húmedo (ψ_m mayores de -10 cbar), lo que limita su uso en riego localizado en suelos, arenosos o gravosos, de baja capacidad de retención de agua. Tienen un retraso en la respuesta al riego mayor que los tensiómetros.

2.3.5 COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS

En general el uso de las sondas FDR es similar al TDR, con el matiz de que en la instalación hay que ser especialmente cuidadoso para conseguir un buen contacto entre la sonda y el suelo. Este sensor también permite obtener lecturas con niveles altos de salinidad, en los que el TDR no funciona (Carpena y Rodríguez, 2005), porque en condiciones de salinidad muy alta atenúan la señal.

Los sondas TDR miden el tiempo que tarda un pulso electromagnético en atravesar la línea de transmisión (electrodos) insertada en el suelo. Como el tiempo es función de la constante dieléctrica se pueden obtener relaciones lineales entre el tiempo y el contenido de agua del suelo. No obstante, su funcionamiento es complejo y suelen ser caros. En el TDR se puede utilizar la atenuación de la amplitud como una indicación de la conductividad eléctrica (Muñoz-Carpena et al., 2005). Estos dos métodos mencionados tienen su semejanza por ser dieléctricos, rápidos, sencillos, y no destructivos, miden la humedad a tiempo real, en comparación con el método directo (gravimétrico) que es el más preciso y es el método de referencia o estándar para el estudio de otros, a pesar de ser destructivo lento y laborioso. A 105°C no se consigue eliminar las moléculas de agua atrapadas entre las laminas de arcilla (Gardner, 1986) y a esta temperatura se pierde parte del agua de cristalización de componentes importantes en algunos suelos como el $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ en suelos yesosos; el $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ y otras sales en suelos salinos (Porta et al., 2003).

En la determinación de la humedad del suelo por tensión o potencial del agua hay que hacer referencia a los tensiometros y los sensores de resistencia eléctrica para obtener valores de humedad del suelo, con ellos hay que disponer de una curva de succión. el fenómeno de histéresis puede inducir errores en la lectura, de forma que no presentan gran ventaja en relación a otros métodos como el FDR y TDR.

2.4 EROSIÓN HÍDRICA

2.4.1 GENERALIDADES

La erosión del suelo es sin duda uno de los mayores problemas medioambientales a escala mundial y la amenaza más importante para la sostenibilidad y el mantenimiento de la capacidad productiva de la agricultura. A nivel mundial tiene gran trascendencia la erosión hídrica por ser más representativa y tener efectos nefastos a mayor escala. Reduciendo la profundidad de los suelos al ser eliminados los horizontes superficiales por trocamiento del perfil poniendo en riesgo su productividad. (FAO, 1967; Sims, 1990).

Aunque el proceso de la erosión ha tenido lugar a lo largo de toda la historia de la agricultura, se ha intensificado considerablemente en la segunda mitad del siglo XX. Fundamentalmente como consecuencia de un laboreo excesivo que deja el suelo desmenuzado, más susceptible al arrastre y sin ninguna protección frente a los agentes causantes de la erosión (las gotas de lluvia, el agua de escorrentía y el viento).

La aplicación de técnicas para disminuir el efecto de la erosión hídrica, ha sido de gran referencia para proteger y volver a dar vida a grandes superficies de tierras afectadas por esta causa.

2.4.2 FACTORES DE LA EROSIÓN HÍDRICA

2.4.2.1 AGRESIVIDAD DE LA LLUVIA

La frecuencia de la lluvia y la intensidad son factores determinantes de erosión hídrica, Hudson (1965) demostró que la erosión se produce casi en su totalidad con precipitaciones de intensidad mayor que 25 mm/h, aunque este valor varía teniendo en cuenta la zona en cuestión. Arbitrariamente se han utilizado umbrales de 10,9 y 1 mm/h en Inglaterra (Morgan, 1980), para Alemania (Richter y Negendank, 1977) y Bélgica

(Bollinne, 1977) el valor umbral varia con el proceso erosivo estas cifras son validas para erosión por flujo superficial, en regueros y movimiento de masas.

El impacto de las gotas sobre la superficie de un suelo desnudo, provoca la disgregación de los macro y micro agregados separando las partículas del suelo. El material resultante de la rotura de los agregados como la arena fina, el limo y la arcilla son fácilmente arrastrados por a escorrentía. La arena gruesa y las partículas de tamaño mayor necesitan más energía cinética para ser depositados en otros lugares. En fases posteriores, el ataque puede producirse en profundidades atacando a todo o parte del perfil, pudiendo arrastrar toda la masa en lo que se denomina movimiento de masas, deslizamiento, etc. (Herrero et al., 1994; Thiam, 2002).

El tamaño de la gota es directamente proporcional a la velocidad, pudiendo llegar hasta 30 km/h. En cada fase de la erosión se necesita una acción mecánica que equivale al gasto de energía para romper los agregados, y el desprendimiento de las partículas y su transporte. Esta energía se suministra por las gotas de la lluvia y el agua de la escorrentía, aunque es mucho menor que de las gotas (Hudson, 1991).

2.4.2.2 EROSIONABILIDAD DEL SUELO

Morgan (1997), define la erosionabilidad como la resistencia del suelo a los procesos de desprendimiento y transporte. Aunque la resistencia de un suelo a la erosión depende en parte de su posición topográfica, pendiente y grado de alteración, como por ejemplo mediante el laboreo las propiedades del suelo que son los determinantes más importantes. La erosionabilidad varía con la textura del suelo, la estabilidad de los agregados, la resistencia al esfuerzo cortante, la capacidad de infiltración y los contenidos minerales y orgánicos. la resistencia al esfuerzo cortante o la resistencia a la penetración ayudan así mismo a evaluar las condiciones estructurales de los suelos.

Existen varios factores que influyen sobre la erosionabilidad del suelo entre los factores físicos podemos señalar el tipo de suelo. Sobre la textura es importante señalar que las partículas mayores son resistentes al transporte debido a la mayor fuerza necesaria para su arrastre, al contrario que las partículas finas, son resistentes al desprendimiento por su cohesión. Los suelos con alto contenido de limo son muy erosionables porque las partículas menos resistentes son los limos y las arenas finas. Aunque Evans, (1980) señala que suelos con 9 a 30% de arcilla son más susceptibles a la erosión. El contenido de arcilla al combinarse con la materia orgánica para formar agregados o terrones y por el

facto de que la resistencia del suelo viene determinada por este aspecto hace que el análisis de la erosionabilidad del suelo a través del porcentaje de arcilla sea la más acertada.

Según Pall et al. (1982) dentro de la categoría de características físicas del suelo o factores de tipo edáfico heredados de la naturaleza del material de partida, la textura y la estructura. Estos son considerados los más relevantes, siendo propiedades de las que dependen tanto la porosidad del suelo, y por lo tanto de su capacidad de aceptación del agua o capacidad de infiltración (Lauren et al., 1988); como la energía de unión entre las partículas y la estabilidad de los agregados (Imeson y Jungerius, 1976), con lo que rigen la resistencia del suelo a la desagregación y el transporte y, con ello, la formación de costras y sellados superficiales (Moore y Singer, 1990).

La pendiente del terreno (Bryan y Poesen, 1989) o la pedregosidad (Poesen et al., 1990) inciden junto con la cantidad y tipo de lluvia en la generación de flujo de agua superficial, siendo por ello su estudio de especial relevancia con relación a la pérdida de suelos (Ibáñez, 2001).

La humedad del suelo es uno de los factores que influyen en la erosionabilidad del suelo. Según Truman et al. (1990) el humedecimiento rápido puede también producir ruptura de agregados por hidratación, el resultado del humedecimiento de suelos inicialmente secos, es de mayor ruptura de los agregados que si ya estuviera húmedo, porque en estos casos queda menos aire atrapado en el interior. La illita y esméctica forman agregados más rápidamente, pero su estructura cristalina más abierta y las mayores dilataciones y contracciones que se producen con la humectación y desecación, hacen sus agregados menos estables que los formados con caolinita (Morgan, 1997). Los componentes orgánicos son importantes debido a su influencia en la estabilidad de los agregados.

2.4.2.3 VEGETACIÓN

Es notable el efecto de la vegetación sobre la erosión hídrica, esta actúa como una capa protectora o amortiguadora entre la atmósfera y el suelo. Los componentes aéreos, como hojas y tallos, absorben parte de la energía de las gotas de lluvia del agua en movimiento y del viento, de modo que su efecto es menor que si actuaran directamente en el suelo, mientras que los componentes subterráneos, como los sistemas radiculares, contribuyen a la resistencia mecánica del suelo (Morgan, 1998).

En cualquier caso, sin embargo, se puede afirmar que en condiciones de equilibrio con el ambiente, la cobertura vegetal actúa comunicándole al suelo un aumento progresivo de materia orgánica y nutrientes y una mejora de la estructura (Ortiz, 1990); tanto es así que los terrenos que han estado mucho tiempo cubiertos por una densa capa vegetal poseen un horizonte superficial oscuro, con un alto contenido en carbono orgánico y bases, un buen desarrollo del perfil y una elevada estabilidad estructural (Ibáñez, 2002).

Valladares (2004), plantea que la eliminación de la vegetación es la principal causa de degradación del suelo y de la pérdida de su capacidad de tolerar la erosión en el bosque y matorral mediterráneos. Y esto es así porque el suelo queda desnudo y sufre las consecuencias del impacto de las gotas de lluvia y del aumento de la escorrentía, produciéndose una pérdida neta de suelo y de su capacidad de mantener la vida. Cada suelo, en función de sus características, de su localización en el paisaje y del régimen climático, posee un umbral crítico de equilibrio entre la erosión que soporta y la vegetación que puede mantener. Si se sobrepasa, el sistema entra en una espiral de disminución de la cobertura vegetal y aumento de la erosión que puede conducirle a un estado irreversible de desertificación.

2.4.2.4 PENDIENTE

La erosión aumenta al aumentar la inclinación y la longitud de la pendiente. Como resultado del incremento de la velocidad y volumen de la escorrentía superficial, favorece el arrastre de sedimento resultado del deterioro de los agregados y separación de las partículas provocada por el impacto de las gotas del agua sobre el suelo.

Sobre una superficie plana las gotas de lluvia salpican las partículas del suelo aleatoriamente en todas las direcciones. En un terreno en pendiente salpican más pendiente abajo que pendiente arriba, aumentando la proporción en función de la inclinación de la pendiente (Morgan, 1997).

2.4.3 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN

Según Lal (1994), hay tres razones básicas de la modelización para la evaluación de los procesos de erosión que son las siguientes:

- Se puede utilizar como herramienta de preedición en la evaluación de las pérdidas de suelo, en la planificación de conservación de suelos, en los proyectos de planificación, inventario de zonas erosionadas, etc...
- Los modelos matemáticos con base física, a través de distintos soportes informáticos, pueden predecir donde y cuando ocurre la erosión, por lo tanto, ayudan al planificador en las tareas relacionadas con la reducción de la erosión.
- Pueden utilizarse como meras herramientas que ayuden a comprender los procesos erosivos y sus interacciones, estableciendo las prioridades para futuras investigaciones.

En la tabla 8, se describen los modelos cuantitativos, los modelos cualitativos tienen como objetivo estimar la erosión real, en este tipo de método la herramienta fundamental es la cartografía, a través de los parámetros suelo, vegetación, topografía, etc. se da una atribución de categorías, niveles o clases, en los que la subjetividad juega un papel fundamental. Hoy en día se maneja gran información que es necesario el empleo de los sistemas de información geográfica (S.I.G) para el efecto.

Evaluación Directa	Evaluación Indirecta		
	Físicos	Conceptuales	Empírico
<ul style="list-style-type: none"> - Agujas de erosión - Perfiladores - Espesor sedimentos - Flujo de agua y sedimentos - Parcelas de erosión - Simuladores de lluvia - Cesio 137 - Redistribución del C orgánico - Mediciones volumétricas de surcos y cárcavas - Medida de los signos de erosión 	EUROSEM (Morgan et al. 1995) WEPP (Line y Nearing, 1989)	CREAMS (USA., 1980) ANSWERS (Beasley et al., 1980)	USLE (Wischmeier y Smith 1965) MUSLE (Williams, 1975) SLEMSA (Elwell,1977) RUSLE (Renald et al., 1994)

Tabla 8. Modelo cuantitativo de la evaluación directa e indirecta de la erosión y referencias.

2.4.3.1 MEDICIÓN DIRECTA EN EL CAMPO

En las principales mediciones directas en el campo se destacan las parcelas de erosión que pasaremos a describir posteriormente. Entre otros métodos según la tabla 8 se puede observar el volumétrico que consiste en medir la pérdida de suelo basado en mediciones tridimensionales del volumen, utilizado en surco o vías de escurrimiento. Se mide la longitud de la sección erosionada y los cambios en el área transversal, otros métodos miden el depósito en un pozo de capacitación o embalse.

Las agujas de erosión son una de las técnicas más sencillas para medir pequeños cambios en la altitud de la superficie del terreno. Consiste en introducir parcialmente en el suelo una piqueta o varilla y medir cada cierto intervalo de tiempo la altura del extremo superior de la varilla con respecto a la superficie del suelo.

Los perfiladores microtopográficos se basan en el estudio de las variaciones temporales microtopográficas en dos o tres dimensiones. Para ello es preciso situar unos puntos de referencia sobre los que se apoya el perfilador en las sucesivas medidas. Este consta de unos indicadores (por lo general varillas) que pueden moverse en vertical o en horizontal en función del objetivo propuesto y que reproducen las variaciones de las topografías. De este modo mediante un tratamiento adecuado de los registros obtenidos es posible lograr magnitudes de rebajamiento superficial y de acreción. Por último, se pueden realizar medidas volumétricas en canales de regueros y cárcavas, se trata de un conjunto de técnicas que permiten estimar el volumen de suelo perdido mediante el cálculo del volumen ocupado por los canales de regueros y cárcavas (MMA, 2008).

2.4.3.2 PARCELAS EXPERIMENTALES Y EL SIMULADOR DE LLUVIA

Las parcelas experimentales permiten el estudio dinámico de los procesos erosivos. Son esencialmente instrumentos de campo que permiten medir la producción de escorrentía y sedimentos en una superficie de terreno delimitada, en la que conocemos sus características edáficas, topográficas, recubrimiento del suelo, estado de la vegetación, sistemas de manejo aplicados y usos del suelo.

Los primeros trabajos científicos son atribuidos al edafólogo alemán Wollny, quién entre 1877 y 1895 trabajó con parcelas experimentales en el estudio de los flujos de agua, el deterioro de la estructura, la función protectora de la vegetación y la erosión de los suelos como consecuencia de los procesos hidrológicos generados en la esorrentía. Las características de las denominadas parcelas de esorrentía han ido variando con el tiempo como consecuencia de los diferentes objetivos previstos en las experiencias. Aspectos tales como el tipo de límites (abiertas o cerradas), el tamaño (grandes, de aproximadamente 50 m² o superiores; pequeñas, de entre 2 m² y 10 m²; y microparcels desde 0,25 m² hasta unos 2 m² de superficie), los materiales empleados (madera, ladrillo, chapas de aluminio, tierra, etc.), el sistema de recolección (caja Gerlach o colector troncoidal, con o sin depósito de recolección) y la toma de muestras (totalizadoras o muestreadoras de parte alícuota, con o sin muestreador automático) son variables. En cierto modo su elección está determinada tanto por la disponibilidad de recursos como por la dependencia o no de la lluvia natural, influyendo además unos aspectos en otros (Ibáñez, 2000).

	VENTAJAS	INCONVENIENTES
PARCELAS GRANDES	Elevada representatividad de los resultados	Subestima de la erosión
	Estudio de usos del suelo y medidas de conservación	Instalación y Mantenimiento caros
PARCELAS PEQUEÑAS	Representatividad media	Imposibilidad de toma de medidas globales
	Estudios medios	Instalación y Mantenimiento medios
MICROPARCELAS	Rapidez y reproducibilidad elevadas	Imposibilidad de toma de medidas globales
	Instalación y Mantenimiento económicos	Agotamiento materiales
	Elevada homogeneidad de la zona estudiada	Poca representatividad
	Medidas parciales	Sobreestimas de la erosión
		Vegetación "peculiar"

Tabla 9. Diferencias entre las parcelas experimentales. Fuente: Ibáñez (2001)

El simulador de lluvia consta de un sistema formador de gotas, un mecanismo de impulsión de agua y un dispositivo para disponer el suelo y recoger los flujos de escorrentía y sedimentos. El simulador nos permite estudiar en profundidad y de forma muy controlada algunos de los factores y condiciones que afectan a los procesos de erosión y además realizar las repeticiones necesarias de los experimentos en un corto espacio de tiempo. Entre otros aspectos que se estudian se destacan el efecto de distintas características de las gotas de lluvia (energía cinética, velocidad de caída, diámetro,...) de la lluvia en sí (cantidad, intensidad, etc.). Estos permiten estudiar el proceso de erosión por salpicadura y algunos parámetros responsables de la erosionabilidad del suelo, y finalmente evaluar el efecto de distintas formas de control de la erosión, para un tipo de suelo y una determinada precipitación.

Desde su origen los simuladores de lluvia han pretendido reproducir las características de la precipitación pluvial lo más fielmente posible (Cerdá, Ibáñez y Calvo, 1997; Calvo et al., 1988). Siendo a partir de los años 60 cuando, tras haberse logrado conocer realmente la dinámica y física de la lluvia, se intenta reproducir tanto la distribución del tamaño de las gotas como su energía cinética de impacto (Meyer, 1958).

Los simuladores de lluvia habitualmente se clasifican en atención al mecanismo generador de las gotas, diferenciándose en simuladores goteadores (generan gotas individuales mediante diversos mecanismos - agujas hipodérmicas, pequeños tubos de cristal, goteros de riego, etc.) y simuladores pulverizadores o de boquilla (el agua es pulverizada por una boquilla, generalmente de riego); mientras que en los primeros las gotas parten con velocidad cero, en los segundos la salida del agua es con presión (Ibáñez, 2001).

Las ventajas del gotero o simuladores de lluvia sin presión es que el tamaño de las gotas y su velocidad de caída son constantes, la distribución de la lluvia a través de la parcela de ensayo es uniforme y se puede lograr con baja presión del agua. Las desventajas son que, si el dispositivo se coloca muy alto, las gotas golpean la parcela de prueba a una velocidad muy inferior a la velocidad terminal de la lluvia natural y, en consecuencia, los valores de la energía cinética son también reducidos. Una gota grande de cinco mm. de diámetro necesita una altura de caída de unos 12 metros para alcanzar la velocidad terminal y esto es difícil de lograr en condiciones de campo. En cierta medida, esto se puede compensar utilizando gotas de mayor tamaño que las de la lluvia natural.

Según Hudson (1997), las principales ventajas e inconvenientes de los simuladores de lluvia son las siguientes:

Ventajas:

- La capacidad de tomar numerosas mediciones rápidamente sin tener que esperar las precipitaciones naturales;
- La posibilidad de trabajar con precipitaciones constantemente controladas, eliminando de ese modo la errática e imprevisible variabilidad de la lluvia natural;
- En general es más rápido y sencillo establecer un simulador sobre los tratamientos de los cultivos existentes que establecer tratamientos sobre parcelas de escorrentía.

Todos los inconvenientes están relacionados con la magnitud:

- Es barato y sencillo utilizar un pequeño simulador sobre una parcela de ensayo de unos pocos metros cuadrados, pero los simuladores para cubrir parcelas de campo de, por ejemplo 100 m², son grandes, caros y voluminosos;
- Las mediciones de la escorrentía y de la erosión a partir de pruebas con simuladores efectuadas en pequeñas parcelas no pueden extrapolarse a condiciones de campo; es preferible limitarlas a comparaciones, como cuál de tres tratamientos de cultivo sufre menor erosión en las condiciones de los ensayos con simulador, o a la comparación de valores relativos de la erosionabilidad de diferentes tipos de suelos;
- es probable que los simuladores se vean afectados por el viento; la necesidad de montar parabrisas reduce la ventaja de la simplicidad.

2.4.3.3 PREDICCIÓN A PARTIR DE MODELOS

Modelos físicos:

Son los más extendidos en la actualidad, su objetivo es representar una serie de componentes individuales que afectan la erosión, incluyendo las complejas interacciones de los diferentes factores que intervienen, así como su viabilidad espacial y temporal TRAGSA (2003). Es decir se basa en principios fundamentales de la mecánica de la erosión, transporte de sedimentos y hidrología.

En este apartado se destacan los modelos WEPP (USDA., Water Erosion Prediction Protect) que está basado principalmente en los resultados de las investigaciones en USA por Line y Nearing, (1989) y Nearing et al., (1989). Es un modelo de simulación diaria

que predice la tasa de erosión y de sedimentos en diferentes escalas. Se aplica tres versiones a diferentes escalas que son: Perfil, Watershed y Gris, (perfil, cuenca y malla) y el EUROSEM (European Soil Erosion Model) que esta basada principalmente en la investigación de la erosión del suelo en Europa (Morgan et al ., 1995). Este último es el mas reciente de los modelos, incluye los efectos de la cubierta de la vegetación en intercepción y la energía de la lluvia, los efectos de los fragmento de las rocas, la velocidad de flujo y la erosión en splash, y los cambio en la forma y el tamaño de los regueros como resultado de la erosión y la deposición.

Modelos conceptuales:

Son aquellos parcialmente empíricos ó mixtos, que están entre empíricos y físicos, basado en la integración de los modelos hidrológicos, de erosión y de transporte de sedimentos, con el objetivo de obtener la emisión de sedimentos a la salida de una cuenca hidrográfica. El principal objetivo logrado por este modelo fue la introducción de las leyes de conservación de masas y de la energía, así como la integración del área de interés en un numero de elementos de una red, con el fin de describir las variaciones espaciales de los proceso de erosión y deposición. Se destacan también el CREAMS (Chemical, Runoff and Erosión from agricultural Management Systems. USA (1980) es un modelo de simulación de las aportaciones de contaminantes del agua en la agricultura que conta de tres grandes componentes (hidrológica, erosión-sedimentación y química) y ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Envroment Simulation) desarrollado por Meyer y Wischmeier y fue ampliado por Beasley et al. (1980) para simular el comportamiento hidrológico y erosivo de las pequeñas cuencas agrícolas durante las lluvias y inmediatamente después de ellas.

Modelos empíricos:

La mayoría de los modelos empíricos se basan en datos provenientes de observaciones de campo, a través de laboratorios estándar de escorrentía, de pendiente uniforme y distribuida estadísticamente en la naturaleza. Entre ellos el USLE (Universal Soil Loss Equation) desarrollada por Wischmeier y Smith (1965), RUSLE es la revisión de USLE por Ronald et al. (1994), MUSLE (Williams, 1975) y el SLEMSA (Elwell, 1977) es último desarrollado en Zimbabwe a través de datos aportados por parcelas de erosión.

La USLE es el primer modelo empírico extendido en su aplicación, a sido el mas conocido y mas utilizado por su facilidad de aplicación. La aplicación de este modelo tiene como objetivo dar a los agricultores y los especialistas de conservación de suelo la posibilidad de elegir combinaciones de usos de la tierra, practicas de cultivo y practicas de conservación de suelos que mantengan la perdida de suelo en niveles aceptables.

Las desventajas del USLE son las siguientes:

- No puede predecir la cantidad total de sedimentos de una cuenca hidrográfica, porque no incluye relaciones de depósito y de distribución. Solo valora la erosión laminar.
- No puede predecir la pérdida del suelo resultado de una sola tormenta porque los factores son promedios a largo plazo que atenúan las grandes variaciones.
- No puede separar los factores como si fueran independientes.

$$A = R \times K \times S \times L \times C \times P$$

Donde:

A: la pérdida de suelo por unidad de superficie expresada en Tm/ha y año; se obtiene por multiplicación de los seis factores

R: es el factor erosividad de la lluvia; refleja el potencial de la lluvia para producir erosión.

K: es el factor erosionabilidad del suelo; representa la susceptibilidad del suelo a ser erosionado por la lluvia

L: es el factor longitud de la pendiente; representa la influencia sobre el proceso de erosión del mayor o menor recorrido del agua de escorrentía superficial.

S: es el factor ángulo de la pendiente; representa la influencia del grado de inclinación de las laderas sobre la generación de escorrentía y la capacidad erosiva de la misma.

C: es el factor cultivo y ordenación; representa la influencia del manejo del suelo sobre el proceso de degradación.

P: es el factor prácticas de conservación; representa la influencia de las medidas preventivas y correctoras implantadas para el control de la erosión.

El índice de erosividad pluvial (*R*):

Wischmeier, (1959) estableció y representa la potencia del aguacero para erosionar superficialmente el suelo, esta se define como el producto de la energía cinética del

aguacero por su máxima intensidad en 30 minutos dividido por cien. La energía cinética en J/m^2 viene dado por la expresión:

$$E = (210,2 + 89 \log I) (IT) \quad (Jm^{-2})$$

Donde:

$(210,2 + 89 \log I)$ representa la energía cinética del aguacero de intensidad I , por cm. de lluvia y m^2 de superficie ($J/cm.m^2$) y T , es la duración del aguacero en horas.

$$R = \sum_{j=1}^n (210,2 + 89 \log I_j)(I_j T_j) I_{30} \quad (J/m^2.cm/h)$$

Siendo:

R : índice de erosividad pluvial en $(J.cm)/(m^2.h)$

T_j : es el periodo de tiempo en horas, para intervalos homogéneos de lluvia durante el aguacero.

I_j : es la intensidad del aguacero en los intervalos citados en cm/h .

J : son los intervalos homogéneos del aguacero.

n : es el numero de intervalos.

Factor de la erosionabilidad del suelo (K):

Además de expresar la susceptibilidad de un suelo para erosionarse, es función de la textura, estructura, mineralogía de las arcillas, velocidad de infiltración, conductividad eléctrica, entre otras características edáficas. Ella expresa la pérdida anual media de suelo por unidad del factor R . En el monograma para la determinación de K , figura 13, Wischmeier y Smith (1978) se basaron en las propiedades del epipedón mas relacionado con la susceptibilidad del suelo a la erosión teniendo en cuenta la textura (limo USDA, arena muy fina, Arena fina a muy gruesa), materia orgánica, tipo de estructura y la permeabilidad del suelo.

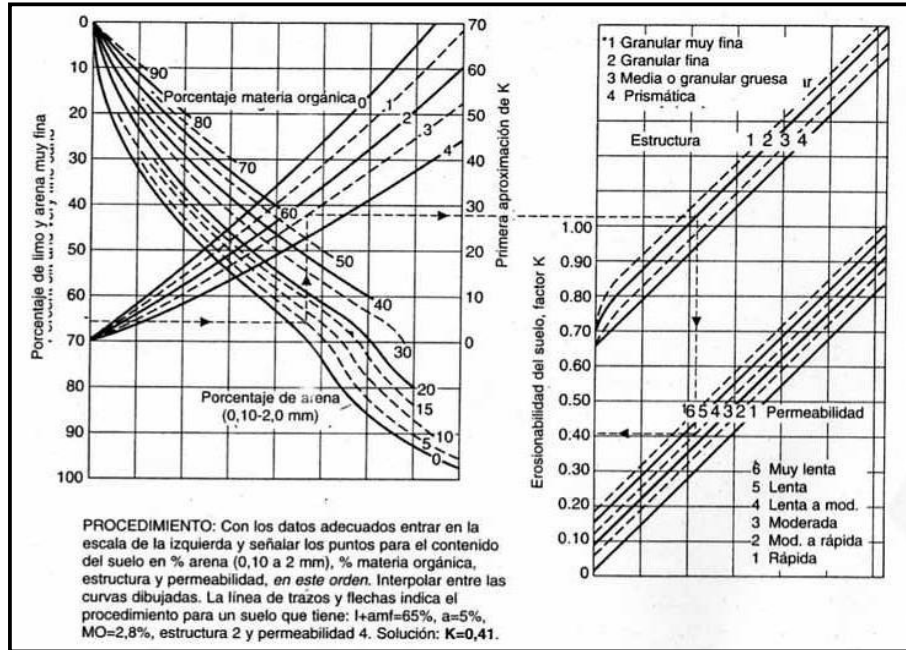


Figura 13. Monograma para la determinación del valor K. Fuente: TRAGSA (2003)

Estudios hechos por Roose (1977), indican que el índice es adecuado para los suelos ferralíticos y ferruginosos de África, si embargo existe una correlación estrecha entre los valores medidos en la parcela y calculados en el monograma como comprobaron Ambar y Wiersum, (1980) en Java, Indonesia. Ha habido casos en que la utilización del monograma de Wischmeier es imposible en estos casos se recurre a otros métodos como la determinación de K, por el diámetro medio de las partículas (Kenneth G.R et al., 1991).

Factor longitud inclinación (LS):

El planteamiento de Wischmeier y Smith (1965), para la determinaron del LS, fue mejorado por Mc Cool et al., (1982) resultando las expresiones siguientes:

- Para pendientes (s) menor de 9 y longitud (λ) menor de 350 m

$$LS = \left[\frac{\lambda}{22,1} \right]^{0,3} \cdot \left[\frac{0,43 + 0,30s + 0,043s^2}{6,613} \right]$$

- Para pendientes (s) mayor de 9 y a cualquier longitud (λ)

$$LS = \left[\frac{\lambda}{22,1} \right]^{0,3} \cdot \left[\frac{s}{9} \right]^{1,3}$$

Mintegui, (1983) planteo una tabla mediante el cual solo es necesario saber el rango de pendiente para obtener el valor LS.

Pendiente, S (%)	Factor LS
100	28,5
70	21,8
60	18,5
30	10,7
24	6,7
18	4,4
12	2,4
3	0,5

Tabla 10. Valores del LS según el rango de pendiente.

Fuente: TRAGSA, (2003)

Factor Cobertura vegetal (C):

El factor C, expresa la relación entre las pérdidas de suelo en una parcela con una determinada cobertura vegetal y las que tiene lugar en una parcela con barbecho continuado a igualdad de las demás condiciones (Porta et al., 2003) lluvia, suelo y topografía etc. Hay algunos valores del factor C, para la ecuación universal de pérdida del suelo obtenidos a través de estudios hechos por Wischmeier y Smith (1978); Roose (1977); etc. Pero aun así son muy escasos teniendo en cuenta la importancia de los distintos tipos de vegetación natural en el control de la erosión.

Prácticas de conservación (P):

Este factor incorpora la eficacia en disminuir las pérdidas de suelo que presentan las diferentes técnicas de conservación como el laboreo a nivel, el cultivo a nivel en fajas alternantes, las terrazas y los canales encespedados. Este valor expresa la relación entre la cantidad de suelo perdido utilizando tal práctica y la que se perdería labrando según máxima pendiente, en el caso que no se aplica practica de conservación el valor a utilizar en la ecuación universal de perdida de suelo seria 1,00.

Factor P (Kent <i>et al.</i> , 1980) Cultivo a nivel		
Pendiente (%)	Factor P	Máxima longitud (m)
1-2	0,60	120
3-5	0,50	90
6-8	0,50	60
9-12	0,60	35
13-16	0,70	25
17-20	0,80	20
21-25	0,90	15

Factor P (Wischmieier y cols., 1978)		
Pendiente (%)	Cultivo en fajas	Terrazas
1-2	0,30	0,12
3-8	0,25	0,10
9-12	0,30	0,12
13-16	0,35	0,14
17-20	0,40	0,16
21-25	0,45	0,18

Tablas 11 y 12. Valores del factor P según Kent, Wischmieier y Cols. Fuente: Porta *et al.* (2003)

2.5 TÉCNICAS DE CONSERVACIÓN DE SUELOS

2.5.1 GENERALIDADES

El conocimiento de varias medidas y técnicas de conservación de los suelos permite evitar la degradación de los mismos. Todas ellas están condicionadas por varios factores como: el clima, la geomorfología, factores edáficos, agrotecnicos y hidrológicos. La aplicación de estas técnicas requiere un estudio particularizado de cada caso en cuestión.

También es importante hacer referencia a las medidas asociadas con la agricultura de conservación que permite la utilización eficiente y sostenible de los recursos edáficos sin causar graves problemas de degradación a través de sus diversas prácticas agronómicas. Estas consisten en un manejo del suelo agrícola alterando lo menos posible su composición, estructura y biodiversidad, y evitando también su erosión y degradación. En términos generales, con las técnicas de conservación, el suelo queda protegido de la erosión y escorrentía, se aumentan la formación natural de los agregados del suelo, la materia orgánica y la fertilidad, y a su vez se disminuye la compactación debido al

tránsito de la maquinaria agrícola. Además, tiene lugar una menor contaminación de las aguas superficiales (AEAC. SV, 2008).

2.5.2 CLASIFICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE CONSERVACIÓN DE SUELO

La clasificación de las técnicas de conservación de suelo varían dependiendo de cada autor pero de forma general se agrupan en tres estrategias. Estrategia para conservación de suelo en tierras cultivables, estrategia para conservación de suelo en tierras no cultivables y estrategia para conservación de suelo en zonas mineras, entre las tres se destaca la estrategia de conservación de suelos en zonas cultivadas (Figura 14), Que se agrupa en:

- Medidas agronómicas
- Medidas de manejo del suelo
- Métodos mecánicos (Infraestructuras etc.)

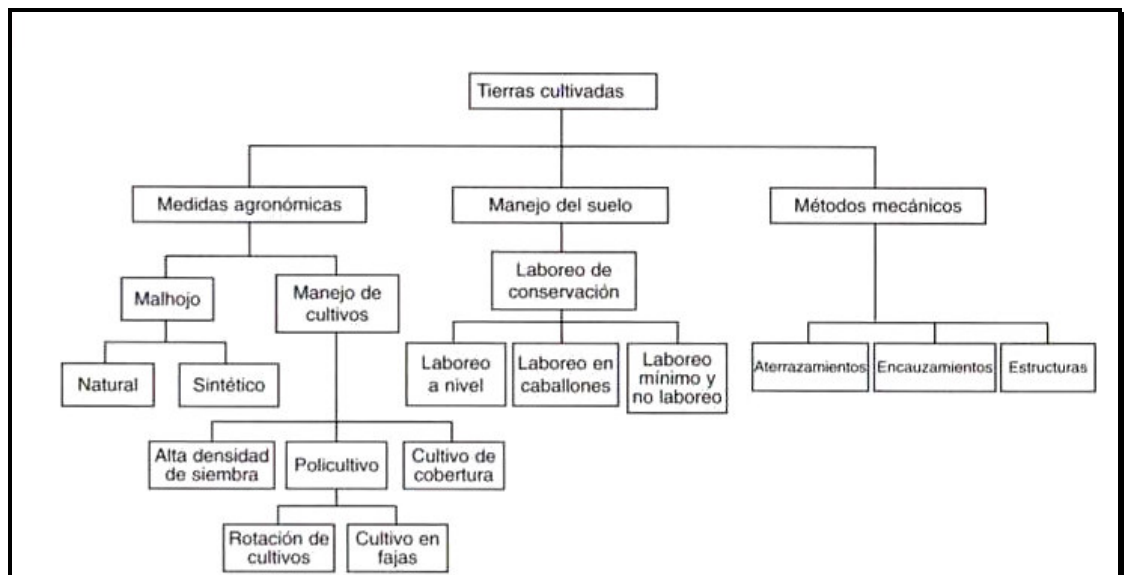


Figura 14. Estrategia para la conservación de suelos en tierras cultivadas según El-Swaify, Danger y Armstrong, (1982). Fuente: Morgan (1997).

TRAGSA, (2003) prefieren clasificar las técnicas de conservación en dos partes:

-Medidas preventivas de conservación de suelos: este apartado hace referencia a las practicas culturales como la fertilización orgánica, encalado, fertilización mineral, control fitosanitario, elección de alternativas de cultivo, labores mecanizadas superficiales, subsolado, aplicación de las dosis de riego, pastoreo, cubiertas vegetales vivas o muertas. Incluye las binas, el laboreo reducido o no laboreo y el laboreo mínimo.

-Medidas de defensa: se agrupan en cinco tipos de acción, cultivo a nivel, cultivo en franjas, terrazas, terrazas específicas (bancales), desagües.

2.5.2.1 MEDIDAS AGRONÓMICAS

Rotación de cultivos:

La conservación de suelo se apoya fundamentalmente en métodos agronómicos como la rotación de cultivo donde los riesgos de erosión son muy bajos y con la incorporación de gramíneas en la rotación mejora las aportaciones del suelo.

Distintos autores como Bachinger and Zander (2006); Dogliotti et al. (2003); Rounsevell et al. (2003); Stockle et al. (2003) han trabajado en modelos para el desarrollo de la rotación de cultivos. Actualmente existen técnicas de optimización matemática y programación lineal para aumentar la eficiencia del sistema de rotación en un sistema de planificación productiva. Otros predicen una rotación a través de una larga escala espacio-temporal como los trabajos de Klein Haneveld y Stegeman (2005).

Esta practica permite controlar el escurrimiento superficial y la pérdida de suelo en ladera; permite disminuir la producción de sedimentos en las áreas de cultivo; permite la reducción de la erosión eólica y el daño del viento a los cultivos; también conserva la humedad del suelo y lograr una mejor utilización de los terrenos de ladera, mejorando sus características físicas, químicas, de fertilidad y de aprovechamiento del agua de lluvia.

Cultivo de cobertura:

Según Morgan (1997), los cultivos de cobertura se siembran como una medida de conservación durante las estaciones del año en que no hay otros cultivos o como cubierta protectora bajo los árboles. En algunos casos después de su aprovechamiento suelen

enterrarse como un abono verde. La utilización de esta técnica de conservación no es nueva, hay registros del uso de la *Mucuna pruriens* desde el siglo XVII en Java, Bali y Sumatra, para recuperar suelos degradados.

Los cultivos de cobertura protegen el suelo y sofocan las malas hierbas, enriquecen el suelo de materia orgánica e otros elementos, proporciona un reciclaje de nutrientes, protegen el suelo de la erosión y escurrimiento. Entre las gramíneas más utilizadas se encuentra el centeno, la avena, la cebada, el trigo, el triticale y el raigras. Entre las leguminosas los tréboles y las vicias.

La materia orgánica es importante para mantener la fertilidad y estructura del suelo a través de la distribución de fracciones de ácido húmico y polisacáridos (Ding et al., 2005). Los cultivos de cobertura tienen que ser suficientemente agresivos para ahogar las malas hierbas y poseer un profundo sistema radicular para mejorar la macroporosidad del suelo y además, reducir la lixiviación del nitrógeno hacia los freáticos del suelo. Según Liebman y Davis (2000), la capacidad de los cultivos de cobertura de impedir el crecimiento de las malezas está relacionado con la cantidad de biomasa que producen. La liberación de sustancias inhibitoras también se destaca en este aspecto y otros como la reducción de la intersección de la luz, competencia por los nutrientes, consumo de agua, cambio en la temperatura del suelo e impedimento físico de la emergencia de las plántulas.

Las ventajas son evidentes la incorporación de materia orgánica (Ding et al., 2005); la incorporación de nutrientes como nitrógeno y azufre (Fernández et al., 2005) en el control de malezas (Fisk et al., 2001) y el aumento de la eficiencia en el uso del agua (Duarte, 2002).

Este método puede presentar algunos problemas en ocasiones como la posibilidad de no obtener una cubierta satisfactoria por la muerte de algunas plantas en el cambio de fuertemente soleado a umbría; la cubierta del suelo compite por el agua utilizable y en zonas áridas puede afectar negativamente la producción.

Cultivo en franja:

Según Morgan (1997) esta técnica fue introducida en Swazilandia en 1948. Esta permite controlar el escurrimiento superficial y la pérdida de suelo en laderas; disminuye la producción de sedimentos en las áreas de cultivo; reduce la erosión eólica y el daño del viento a los cultivos y conserva la humedad del suelo; también mejora las características físicas, químicas, la fertilidad y el aprovechamiento del agua. Esta se dispone en bandas alternadas con especies de siembra en líneas y cultivos de protección siguiendo curvas de nivel o perpendiculares a la dirección del viento. La erosión se limita únicamente a la

franja de cultivo en línea y el suelo extraído de estas franjas es retenido en la franja de protección.

Tipo de franja	Características del terreno		
	Cultivo a sembrarse	Pendiente	Agente erosivo
En contorno y rotación	Escarda y tupido, siguiendo las curvas de nivel y perpendiculares a la pendiente natural del terreno.	2-15 %	Agua
De contraviento	Escarda y tupido, de ancho uniforme. Se trazan en forma recta y perpendicular a la dirección de los vientos dominantes	> 1 %	Viento
De contención o amortiguadoras	Tupido (pastos o leguminosas), se localizan entre franjas de ancho uniforme donde se establecen los cultivos de escarda	Variación de pendiente en ambas direcciones.	Agua y viento
Perpendiculares a la Pendiente	Tupido y de escarda su ancho es uniforme y su trazo es perpendicular a la pendiente del terreno.	Variable y para relieve ondulado	Agua y viento

Tabla 13. Tipos de franja con relación a la pendiente del terreno, agente erosivo y cultivo a sembrar. Fuente: SAGARPA, (2000).

El principal inconveniente de esta técnica deriva en la necesidad de trabajar en pequeñas áreas que limitan el tipo de maquinaria a utilizar, es decir no es compatible con la agricultura altamente mecanizada.

Policultivo:

El policultivo usa cosechas múltiples en el mismo espacio, en la imitación de la diversidad de ecosistemas naturales, y evitando los grandes soportes de las cosechas únicas, o monocultivo. Incluye la rotación de cosecha. La diversidad de cosechas evita la susceptibilidad que los monocultivos tienen en la incidencia de plagas y enfermedades.

El aumento de la producción de las tierras al tiempo que se proporciona la protección al suelo frente a la erosión es visible, este método incluye el cultivo intercalado desarrollando dos o más especies durante el año, o el cultivo asociado sembrando dos o más especies en la misma parcela al mismo tiempo.

Revegetación:

La revegetación tiene por objetivo repoblar con especies herbáceas, arbustivas y arbóreas, sectores desprovistos de vegetación, bajo métodos de siembra directa, hidrosiembra, plantación o recubrimiento con capas orgánicas. Este método esta más indicado para el control de la erosión por cárcavas, deslizamiento de tierras, dunas de

arena, taludes de carretera, áreas de construcción y escombreras. Para su establecer es necesario un estudio minucioso del terreno en aspectos relacionados con su fertilidad, acidez del suelo, presencia de sustancias tóxicas, nivel de humedad. Estos aspectos disminuirían el riesgo de fracaso en la implementación del monocultivo, también es importante la selección de plantas autóctonas. Se garantiza el desarrollo de una formación vegetal autosostenible, muy similar a las formaciones naturales pre-existentes.

Mulching:

Mulching o malhojo es la cobertura del suelo con residuos inertes de cultivos como paja, cañotes de maíz, hojas de palma y rastrojos. Resulta de máximo interés como alternativa a la realización de cultivos de cobertura en zonas áridas donde la insuficiencia de las precipitaciones impide el establecimiento de una cubierta del suelo Morgan (1997). Esta técnica aporta varios beneficios como:

- Protección frente a las temperaturas extremas y cambios bruscos de tiempo.
- Reduce la erosión de la lluvia, escorrentía y aumenta la infiltración.
- Evita la proliferación de maleza.
- Ahorra agua: conserva la humedad del suelo en verano, evitando la evaporación.
- Favorece el desarrollo y conservación de la planta
- Los materiales orgánicos, nutren el suelo a través de su descomposición, mejorando la estructura del suelo.

Diversos trabajos científicos demostraron la eficiencia del mulch en la reducción de la erosión a través de la disminución del impacto de las gotas de lluvia en el suelo y posterior reducción de la escorrentía (Lal, 1979; Schuab et al., 1993) y el aumento de la infiltración (Bernet et al., 1967; Poesen et al., 1990, Valentín and Casenave, 1992; Kamar 1994; Fagerstrom et al., 2002; Doring et al., 2005; Adekalu 2006). Con estos hay que añadir los trabajos hechos por varios autores como: Benoit and Kikham, (1963); Modaihsh et al., (1985); Groenevelt et al., (1989); Kamar, (1994); Tejedor y Días, (2003) en la conservación de la humedad y reducción de la evapotranspiración.

En las medidas agronómicas también se destacan la utilización de mulching artificial y el aumento de la densidad de siembra.

2.5.2.2 MEDIDAS DE MANEJO DE SUELO

El objetivo del manejo adecuado del suelo es mantener la fertilidad y estructura del suelo. Los suelos con elevada fertilidad proporcionan cultivos con altos rendimientos, buena cobertura vegetal, y como consecuencia permiten minimizar el riego ante la erosión. Estos suelos tienen una gran estabilidad granular que no se ven afectados por el cultivo, y un aumento de la capacidad de infiltración aumentando y conservando sus recursos hídricos. El manejo de suelo para lograr una buena fertilidad viene siendo de gran importancia en la conservación del suelo (Morgan 1997).

Las técnicas de la agricultura de conservación se practican en cerca de 57 millones de hectáreas, es decir, cerca del 3 por ciento de los 1 500 millones de hectáreas de tierra arable en el mundo. Este consiste en diversas prácticas agronómicas que permiten un manejo del suelo agrícola alterando lo menos posible su composición, estructura y biodiversidad, y evitando también su erosión y degradación. Las técnicas de agricultura de conservación incluyen diversas modalidades tales como la siembra directa (no laboreo), el mínimo laboreo (reducido, en donde no se incorporan o sólo en muy breves periodos, los residuos de cosecha), y el establecimiento de cubiertas vegetales entre sucesivos cultivos anuales o entre hileras de árboles en plantaciones de cultivos leñosos. En términos generales, con las técnicas de conservación, el suelo queda protegido de la erosión y escorrentía, se aumentan la formación natural de los agregados del suelo, la materia orgánica y la fertilidad, y a su vez se disminuye la compactación debido al tránsito de la maquinaria agrícola. Además, tiene lugar una menor contaminación de las aguas superficiales, se reducen las emisiones de CO₂ a la atmósfera y se aumenta la biodiversidad (AEAC.SV, 2008).

Siembra directa o laboreo nulo:

El mayor exponente de la agricultura de conservación es la siembra directa o laboreo nulo, que se define como un sistema de producción consistente en sembrar sobre los rastrojos del cultivo anterior sin labores previas. De esta manera desaparece la capa arable, apareciendo en su lugar una capa enriquecida con los residuos de la cosecha, aumentando el contenido de materia orgánica del suelo y mejorando el ciclo de los nutrientes y el aprovechamiento del agua (EAC.SV, 2008).

La Siembra Directa permite producir sin degradar el suelo, mejorando en muchos casos las condiciones físicas, químicas y biológicas del mismo. Además logra hacer un uso más eficiente del agua, recurso que en cultivos de secano es generalmente el factor limitante en la producción. Así, el sistema logra niveles productivos altos con estabilidad temporal y en armonía con el ambiente.

Esta técnica tiene muchas ventajas frente al laboreo tradicional además de los ya mencionados se añade el aumento del nivel de materia orgánica en el suelo con el paso de los años; reducción de las necesidades de abono; menor incidencia de plagas y/o enfermedades sobre el cultivo; posibilidad de trabajar más superficie de terreno y mejor aprovechamiento del agua de lluvia o de riego (ASAJA, 2007). Según la FAO (2002) los residuos de cultivo en la siembra directa reducen hasta 90% de pérdida de suelo por erosión, a través de la reducción del impacto de las gotas de lluvia protegiendo el suelo, contra la compactación y pulverización de los agregados; aumento del índice de infiltración; estabilización de la temperatura del suelo favoreciendo los procesos biológicos y la vida del suelo; mantiene la humedad del suelo a través del efecto “mulch”; actúa como agente reciclador de nutrientes; asegurando la alta actividad biológica; aumenta la materia orgánica; mejora la CIC y la estructura del suelo; ayuda a controlar las malezas ya sea en supresión de la luz o por alelopatía (FAO, 2004).

Laboreo mínimo:

En laboreo mínimo se prepara el suelo previamente a la siembra, mediante arados de cincel, cultivadores, discos o gradas. El control de las malas hierbas se realiza mediante herbicidas y/o cultivadores, en esta práctica también se deja al menor 15 a 25 por ciento de residuo vegetal al suelo. En el laboreo sin volteo, el suelo se labra (sin invertir sus capas) inmediatamente después de la recolección para incorporar parcialmente los rastrojos o restos de los cultivos y promover la germinación de las semillas de las malas hierbas que suministran al suelo una cubierta protectora durante el período entre cultivos. Estas malas hierbas se destruyen posteriormente mediante herbicidas no residuales y se incorporan en la siembra, en una pasada, con sembradoras que no volteen la tierra. Autores como Siemens y Oschwald (1978); Jonson y Moldenhauer (1979); Chisci Zanchi (1981); Sanders et al., (2000) realizaron trabajos relacionados con la eficiencia del laboreo mínimo en la reducción de la pérdida de suelo.

Otras prácticas como la incorporación de materia orgánica, estabilizadores del suelo (sales polivalentes, yeso etc.), subsolado, laboreo a nivel, complementan lo referente al manejo del suelo.

2.5.2.3 MÉTODOS MECÁNICOS

El objetivo de éstos es reducir la erosión del suelo a través del control del movimiento del agua o del viento. Para ello hay varias técnicas como el cultivo a nivel, construcción de terrazas, canales, estructuras de estabilización, cortavientos, bancales,

movimiento de tierra, nivelación etc. En algunos casos estos métodos se utilizan complementando con medidas agronómicas.

Según TRAGSA (2003), el cultivo a nivel (*contour farming*) consiste en realizar las labores y otras prácticas de cultivo en el sentido de la curva de nivel del terreno, con objetivo de eliminar o reducir la escorrentía superficial y el correspondiente arrastre del suelo. en esta técnica se fuerza la infiltración a través del posicionamiento de las curvas de nivel, y en seguida reduciendo la escorrentía. Una de las inconvenientes de esta técnica es su eficacia solamente en los terrenos con menos de 12% en pendiente. Si la pendiente es superior, hay mayor posibilidad de la destrucción de los surcos por la fuerza de la lámina de agua, originando regueros y cárcavas. Estudios hechos por Rodrigues y Fernández de la paz (1992), respaldan este método en la reducción hasta la mitad de la erosión del suelo.

Entre las más usadas se destacan las terrazas, que son taludes de tierra construidos transversalmente a la dirección de la pendiente para conducir perfectamente la escorrentía, provocando la infiltración, evaporación o desviándola hacia un lugar determinado con una velocidad controlada.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS DEL MEDIO

Obviamente el clima es un factor fundamental en el desarrollo de la vegetación, así como en la evolución del suelo, siendo determinante para los tipos de cultivos en un área específica. Sin duda es una parte fundamental del ambiente físico ya que tiene una influencia determinante en los recursos naturales vegetación, suelo, agua y fauna.

Teniendo en cuenta las posibilidades de manejo de las condiciones climáticas en el invernadero, en el experimento tratamos de replicar las altas temperaturas y la evaporación de una región tropical como Angola. Además, estas condiciones influenciaron de cierta forma en varios aspectos relacionados con el residuo, como la capacidad de mantener la humedad, el tiempo de descomposición, y el desarrollo de la vida microbiana en el suelo.

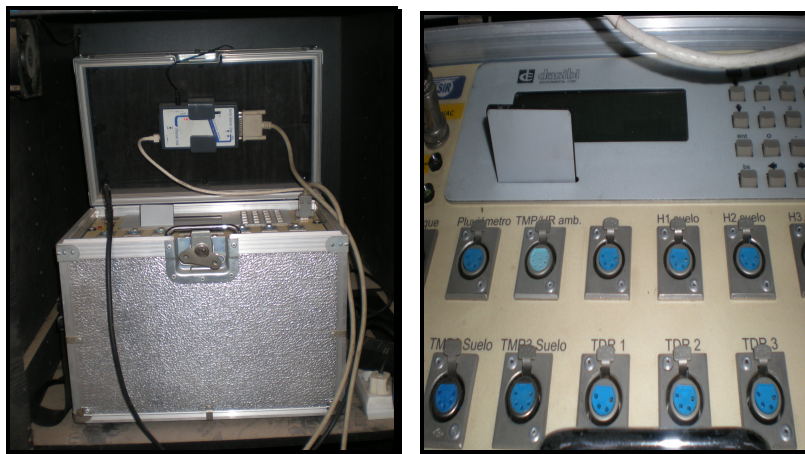


Figura 15. Equipos de adquisición de datos instalado en el invernadero

Para el efecto se utilizó el SIMAM (servidor de comunicaciones), sistema de información medio ambiental (versión 2.x) desarrollado por la empresa SIR, S.A. Este se encarga de comunicarse con el equipo de adquisición de datos instalado en el invernadero y transmitir la información a la base de datos del ordenador localizado en la unidad docente de suelos. Este mecanismo del SIMAM permitió la petición de datos del invernadero en cualquier momento. Esta se hizo de forma automática través del ordenador y fue el mismo sistema que se encargó de mantener la información actualizada y en orden.

3.1.1 TEMPERATURA DEL MEDIO

La temperatura del medio es un factor con gran influencia en el clima y varía teniendo en cuenta las condiciones climatológicas de cada región. Este influye en el desarrollo de la flora, en los cambios físico químicos que ocurren en el suelo, condiciona la proliferación de los microorganismos del suelo, en la conservación de la humedad y en la degradación de los residuos vegetales. Este experimento se realizó en condiciones altas de temperatura favoreciendo el experimento, puesto que la cáscara de café se produce en una región tropical con valores de temperatura y evapotranspiración alta.

Las mediciones fueron obtenidas a través del termómetro instalado en el invernadero. También se instaló un ventilador con un termostato para regular la temperatura del local a las condiciones experimentales recomendadas.

3.1.2 EVAPORACIÓN

Siendo Angola un país situado en la franja tropical, registra valores elevados de evaporación teniendo en cuenta la importancia energética de estas regiones donde la insolación es elevada y la nubosidad escasa (Cuadrat y Pita 1997). Los datos de la cantidad de agua por unidad de área y de tiempo que se evapora a través de una pequeña superficie puesta al aire libre, se obtuvieron a través del SIMAM. En la figura 16 se observa el evaporímetro que se instaló en el interior del invernadero.



Figura 16. Evaporimetro utilizado en la experiencia

La evaporación de la humedad de un suelo sin vegetación se produce en la capa superficial. Al disminuir la humedad de ésta, se produce un desequilibrio y hay una atracción de humedad subyacente, que asciende por capilaridad a la superficie, prosiguiendo la evaporación hasta que el agua capilar se agota. El agua higroscópica en equilibrio con la humedad atmosférica no se evapora. La evaporación es un cambio de estado, y precisa una fuente de energía que proporcione a las moléculas de agua, la suficiente para efectuarlo. Esta energía procede de la radiación solar, tanto de forma directa como indirecta.

3.2 UNIDADES EXPERIMENTALES

3.2.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS BANDEJAS DE EROSIÓN

Varios autores como Poesen (1986); Hernández y Florencio (2004) realizaron sus estudios en las bandejas de erosión. Las utilizadas en el experimento son de aluminio galvanizado, de característica porosa en su totalidad. Se hizo una abertura rectangular en los dos lados de las mismas, y se cubrió con un material poroso para evitar la pérdida de suelo en esta zona y facilitar la penetración del sensor de humedad en los últimos 5 cm de profundidad durante las mediciones. La base se cubrió con una tela fina para evitar la pérdida de partículas de suelo en el momento de la simulación de lluvia y facilitar el drenaje normal del agua. Las bandejas (figura 17) tienen una dimensión de 74,9 largo y 67,9 ancho con 10 cm de altura. La experiencia estuvo provista de 30 de ellas.



Figura 17. Las bandejas de erosión

Las bandejas estaban colocadas en la mesa de erosión (figura 18) de 74 cm de largo y 67 cm de ancho con una altura de 96 cm (hierro galvanizado). En la parte frontal estaba provisto de una estructura para la recolección de la escorrentía, que en el momento de la experiencia salía directamente por una manguera de silicona en el caso de la escorrentía superficial y por dos mangueras inferiores en el caso del agua infiltrada, desaguando a los recipientes. La pendiente de las muestras en la mesa de erosión era de 12 por ciento.



Figura 18. Mesa de erosión

3.2.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS CINCO TIPOS DE SUELO

En el apartado 4.2.1.1 del capítulo 4 se expone los resultados de los análisis físico y químicos realizadas en los cinco tipos de suelo. Ellas están enumeradas de 1 a 5. Estas nos permitieron hacer una comparación para tener diferentes conclusiones a cerca de los resultados del experimento.

3.2.2.1 ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DE LOS SUELOS ESTUDIADOS

3.2.2.1.1 EXTRACTO DE SATURACIÓN

La preparación de la muestra consistió en deshacer los terrones, eliminar los restos vegetales, secar a air libre en un periodo mínimo de 72 horas. Después de este procedimiento se seleccionó el suelo comprendido entre 1 y 2 mm de diámetro a través de un proceso de tamizado.

La obtención del extracto de saturación que fueron utilizadas en diferentes análisis, consistió en medir 250 gramos de suelo, añadiendo poco a poco agua destilada, mezclando el suelo y agitando con una espátula hasta que alcanzó el punto de saturación. Entonces fluía al inclinar la capsula, y brillaba por el reflejo de la luz. La misma se dejó reposar 24 horas, y posteriormente se transfirió la pasta al embudo Buchner vertiéndola sobre papel de filtro. Posteriormente se aplicó la bomba de vacío y se recogió el filtrado en un matraz Kitasatos.

3.2.2.1.2 POTENCIAL DE HIDROGENO (PH)

Es evidente la asociación del suelo a la presencia de cantidad relativa de cationes ácidos y bases en los sitios de intercambio en una micela, utilizando este término para designar una partícula solida cargada, ya sea de arcilla o de naturaleza orgánica, que se considera como parte del sistema acido-base-sal del suelo. La intensidad de la acidez se caracteriza universalmente por la medida de la actividad del ión hidrógeno (Soriano y

Pons 2001). Muchos suelos incrementan su acidez por un proceso natural de acidificación, como resultado de la pérdida de bases por lavado a través del perfil, debido a la absorción de iones nutrientes por parte de las plantas, y también por la producción de ácidos orgánicos por las raíces y los microorganismos (De la Rosa 2008). La determinación del pH cobra gran importancia teniendo en cuenta la sensibilidad de los cultivos a diferentes rangos de acidez.

En este experimento se caracterizó los suelos teniendo en cuenta su acidez. Para la determinación se utilizó el pH-metro previamente calibrado. A continuación se preparó la muestra pesando 10 gramos de suelo y añadiendo 25 ml de agua destilada. Después de 10 minutos en agitación se dejó reposar 30 minutos. Pasado el tiempo de reposo se volvió a agitar la suspensión inmediatamente antes de entrar en contacto con los electrodos, evitando la formación de burbujas, y posteriormente se efectuaron las mediciones.

3.2.2.1.3 CALCIO Y MAGNESIO

Para la determinación del Calcio y el Magnesio se utilizó el método de complexometría (por versanatos E.D.T.A). Este está basada en la estabilidad que forma la sal Disódica del Ácido Etiléndiamino-Tetracético con la sal de Ca^{+2} y Mg^{+2} dando lugar a compuestos muy estables. A través de esta estabilidad de los compuestos formados y mediante el empleo de indicadores o metalocromos determinamos las sales de los dos elementos.

El procedimiento consistió primero en valorar la suma de Calcio y Magnesio con el E.D.T.A en una bureta de 25 ml hasta producir el viraje de rojo vino a azul. Antes se reguló la muestra con 10 gotas de pH 10 y se usaron 5 gotas del Negro de Eriocromo T (N.E.T) como indicador. Posteriormente se determinó el Calcio con el mismo procedimiento pero se añadió 5 gotas de pH 12 y 0,1 gramos de indicador murexida, la valoración también fue con el EDTA a 0.01 hasta que las muestras alcanzaron un viraje de rosa a malva. El magnesio se determinó por la diferencia de volumen de EDTA consumido en la valoración del Calcio y el Magnesio.

Finalmente estos volúmenes se utilizaron en las siguientes formulas:

$$\text{mg / lCa}^2 = \frac{V_1 \times F \times 40 \times 1000}{V_{\text{muestra}}}$$

$$mg / l Mg^2 = \frac{(V_1 - V_2) \times F \times 24,31 \times 1000}{V_{muestra}}$$

Donde:

V_1 , volumen de calcio y magnesio

V_2 , volumen de calcio

F , constante (0.01)

3.2.2.1.4 POTASIO Y SODIO

Para la determinación de este elemento también se usaron las muestras del extracto de saturación. El método utilizado fue espectrofotometría de llama.

Las lecturas de las muestras se realizaron de forma directa sobre las mismas después de las diluciones, teniendo en cuenta las concentraciones iniciales de las muestras. Estas se hacían en matraces aforados de 50 ml. enrasados hacia el final. Posteriormente se obtuvo la curva de calibración a través de las lecturas realizadas con los patrones de Cloruro de Potasio en diferentes concentraciones. Los valores obtenidos en el espectrofotómetro se sustituyeron en la ecuación de la recta y se obtuvieron resultados de Potasio en milequivalentes por litro.

Para la determinación del Sodio se utilizó el mismo procedimiento, sólo que se sustituyeron los patrones en este caso, NaCl. Las muestras se diluyeron teniendo en cuenta su conductividad (inferior o superior a 8 ds/m).

3.2.2.1.5 PORCENTAJE DE CALIZA

Para la determinación de este elemento se utilizó el método de análisis de carbonatos. Esta consistió en pesar 0,5 a 1 gramo de tierra fina previamente triturada y

colocada en un matraz erlenmeyer de 500 cm³. En un tubo de ensayo se añadió, con el cuenta gotas, ácido clorhídrico al 50 por ciento, que fueron introducidos cuidadosamente dentro del erlenmeyer sin volcar su contenido. Se colocó el erlenmeyer al calcímetro y se abrió la llave para mantener el sistema de presión atmosférica, las veces había que ajustar la altura del depósito del calcímetro hasta enrasar la bureta del mismo con el cero. Posteriormente se cerraba la llave y se inclinaba el erlenmeyer con cuidado, vertiendo el ácido clorhídrico sobre la muestra, agitándose para favorecer el ataque del ácido sobre la misma. Esto producía una reacción del calcímetro, y había de mantener el mismo nivel del depósito móvil con el del líquido. Cuando el nivel del líquido permanecería estacionario, se dejaba de agitar y se tomaba la lectura del volumen, esta correspondía al CO₂ desprendido por la muestra.

La lectura patrón se hizo de la misma forma, en vez de muestra de suelo se añadió 0,2 gramos de CO₃Ca.

Posteriormente se determinó el porcentaje a través de la fórmula:

$$\%Caliza = \frac{L \times P'}{L' \times P} \times 100$$

Siendo:

L, lectura observada en el calcímetro para la muestra

L' lectura observada en el calcímetro para CO₃Ca

P, peso seco, en gramos de la muestra de suelo

P', Peso en gramos de CO₃Ca

3.2.2.1.6 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

En el suelo la presencia de sales solubles como el calcio, sodio, potasio, carbonatos, cloruros, y otros es el resultado de la meteorización de minerales primarios. Su distribución está relacionado con varios factores como la topografía, el drenaje, la intrusión salina etc. La determinación de la concentración de materiales ionizados en las soluciones se hizo midiendo la conductividad eléctrica.

Para su determinación se cogió una alícuota de la muestra en el extracto de saturación y con un conductímetro se realizó la experiencia. La misma consistió en llenar

la celda conductímetrica con el extracto de saturación. La mayoría de las células tienen una marca que indica hasta donde tiene que llenarse o sumergirse. Se hizo la lectura de la resistencia a la temperatura correspondiente y conociendo la constante f , de la celda, se utilizó la tabla de corrección para corregir la temperatura a 25 grados, se determinó la conductividad del extracto. Una vez efectuada la lectura se lavaba el electrodo con agua destilada.

3.2.2.2 EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS

3.2.2.2.1 MATERIA ORGÁNICA

El conocimiento de los complejos mecanismos de fijación de la materia orgánica en los suelos, así como sus interacciones con el material mineral y el papel de los microporos, presentan grandes lagunas y es motivo actual de investigación mediante las técnicas analíticas más novedosas como la resonancia magnética nuclear (NMR) aplicado por Knicker et al., (2006) citado por De la Rosa.

La materia orgánica tiene un papel fundamental en el comportamiento de los suelos. Contribuye a la formación y estabilidad de los agregados. Dicha agregación aumenta la porosidad, aireación, infiltración y precolación del agua y disminuye la escorrentía y el riesgo de erosión (Van Beers 1980), condiciona el desarrollo de los microorganismos, la degradación de restos vegetales, en fin son varias las ventajas que proporciona para mejorar las propiedades físicas. En este experimento se vio la necesidad de caracterizar los cinco tipos de suelo en cuanto a su composición en materia orgánica. Para su determinación empleamos el método del permanganato potásico. La misma consistía en pesar un gramo de tierra fina, desecado al aire y tamizado por un tamiz de 2 mm. de diámetro, se pasó a un erlenmeyer de 250 cc, y se diluyó hasta unos 100 cc con agua destilada y seguidamente se agitó durante unos minutos. Se añadió cuidadosamente 10 cc de H_2SO_4 agitándola unos minutos. Seguidamente se volvió a añadir desde una bureta 20 cc de $KMnO_4$ 0,1 N y se hirvió durante unos 20 minutos. Sin deshacerse el color morado del $KMnO_4$ se agregaba de nuevo 10 cc más, hasta que no desapareciera el color morado, continuando la ebullición durante 20 minutos. Terminado los veinte minutos a hervir se adicionaba suficiente $H_2C_2O_4$ 0,1 N hasta la total decoloración del $KMnO_4$, valorándose

de nuevo con $KMnO_4$ hasta la aparición de un débil color violeta, persistente durante la agitación de 30 segundos y estando a la solución a una temperatura de $55^\circ C$.

Posteriormente se determinaba el porcentaje de carbono orgánico con la siguiente fórmula bajo señalada y al final se multiplicó con el valor 1,724 para obtener el porcentaje de materia orgánica en el suelo.

$$\%C_{organico} = \frac{[(v.f)KMnO_4 - (v'.f')H_2C_2O_4]0,1.0,006}{suelo} \times 100$$

Siendo:

V , volumen

f , valor constante (0,9)

3.2.2.2 TEXTURA, ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Para la determinación de esta propiedad física se aplicó la metodología de Bouyoucus (1934). Se necesitó pesar 40 gramos de suelo en la balanza. La muestra se colocó en un vaso de 600 ml y se añadió 100 ml de la solución calgón y unos 400ml de agua destilada, dejándole que se empape durante diez minutos. Una vez transcurrido los 10 minutos se transfirió el contenido del vaso al recipiente de la batidora. Para asegurar que no se dejó nada se utilizó un dispersor de agua destilada con que se lavó el vaso perfectamente. La muestra se batió durante cinco minutos. Tras este tiempo, se transfirió la muestra a una probeta, enrasándola con agua destilada hasta 1000 ml. Se agitó la muestra y se midió la temperatura después de estabilizarse. Con una varilla metálica o embudo en la probeta se mezcló la suspensión anotando el tiempo inmediatamente. Se añadió una gota de alcohol amílico para evitar cubierta de espuma en la superficie y posteriormente se introdujo el densímetro con cuidado. Cuando estaba agitado impensamos las lecturas a los 30 seg., 60 seg., 3, 10, 30, 90 minutos, y a un tiempo superior a 5 horas.

Se calculó las concentraciones en la suspensión (g/L), y los porcentajes acumulados, por las siguientes ecuaciones:

Concentración de la suspensión: $L_n - L_o$

$$\text{Porcentaje de partículas: } 100 \times \frac{L_n - L_o}{P'}$$

Donde:

L_n , Lectura del densímetro.

L_o , Lectura de la calibración del densímetro.

P' , peso seco del suelo en g/L de la suspensión

Se calculo el tamaño correspondiente de las partículas mediante la ecuación siguiente:

$$x(\mu) = \frac{\theta}{(t)^{1/2}}$$

Donde:

t , tiempo de sedimentación.

θ , valor obtenido en la tabla de Day (1958) en función de las lecturas observadas.

Estos tamaños de las partículas se corrigieron siendo que la temperatura era diferente a 30° C multiplicándola por el factor f , en función de la temperatura.

$$f = \sqrt{\frac{n_{x^{\circ}C}}{n_{30^{\circ}C}}}$$

Donde:

$n_{x^{\circ}C}$, es la viscosidad del agua a la temperatura de sedimentación.

$n_{30^{\circ}C}$, viscosidad del agua a 30° C.

La textura se determinó representando gráficamente los valores de los diámetros de las partículas en un sistema de coordenadas con escala semilogarítmica. En la curva resultante se interpolaron los porcentajes de las partículas, encontrándose los valores correspondientes a cada fracción. Posteriormente se determinó la clase de cada textura en el triángulo de clasificación de suelos por textura de la USDA con los valores obtenidos a cada fracción.

3.2.2.2.3 ESTABILIDAD DE LOS AGREGADOS

Para la determinación de la estabilidad de los agregados se aplicó el método del tamizado en húmedo (Kemper y Rosenau, 1986). Se ha seleccionado agregados de 1 a 2 mm. en muestras de suelo no almacenadas mas de tres semanas. Las mismas fueron tamizadas en seco evitando al máximo su compresión para prevenir variaciones en las propiedades físicas. Posteriormente se seleccionó $3,00 \pm 0,05$ gramos de este material, y se colocó en un tamiz de 0,5 mm dejándose reposar durante la noche. La inmersión de la muestra se hizo sobre un tamiz de 0,5 mm. 20 veces en 40 segundos a través de un aparato de inmersión que sumergía sobre una base de agua destilada de 2 cm de altura, antes se eliminó las burbujas de agua con una jeringuilla. Después de este proceso se puso la muestra en la estufa durante 2 horas a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ se sacó y se pesó la muestra retenida en el tamiz de 0,5 mm. Sobre la misma se aplicó el hexametáfosfato de sodio como agente dispersor de la arena (mayor 0,5 mm) sobre los agregados. La solución se colocó a 3,5 cm desde la base del cuenco. Se agitó hasta suavizar los agregados y se enjuagó con agua destilada. La arena retenida fue secada a estufa y pesada nuevamente.

Para la determinación del porcentaje de agregados estables se aplicó la siguiente fórmula:

$$\text{agregados}(\%) = \frac{W_R - S_w}{3.00 - S_w} \times 100$$

Donde:

W_R , es el peso de los agregados remanecientes.

S_w , es el peso de de la arena.

3.2.2.2.4 POROSIDAD

Para la determinación de la porosidad del suelo se utilizó el picnómetro. Esta técnica consiste en medir el volumen de la muestra en el vacío a través de un mecanismo que succiona el aire contenido en el interior del cilindro donde se encuentra la muestra. Al estabilizarse la presión dentro del cilindro se observa una variación de la columna de mercurio que registra los resultados en una escala previamente calibrada.

Para la determinación del porcentaje de espacio poroso en la muestra se utilizó la siguiente expresión:

$$V_p = 100 - V_s$$

Donde:

V_s , es el volumen de la muestra (cm³)

V_p , es el volumen de los poros (%)

3.2.2.2.5 DENSIDAD APARENTE

La densidad aparente es la relación existente entre la masa sólido y el volumen total ocupado por el sólido y por el espacio poroso. Según Marshal y Homes (1988) el comportamiento de un suelo no solo depende del Tamaño de la partícula y forma de las partículas individuales, sino también de cómo están dispuestas y unidas entre sí. Se registraron diferencias de densidad que se establecieron en diferentes suelos en estudio durante el experimento. Esta se determinó tomando muestras de suelo en cilindro metálico. Estas muestras se pusieron a la estufa durante 24 horas a una temperatura de 105 °C. Posteriormente se pesaron y se registraron los respectivos valores.

Se utilizó la siguiente expresión para la determinación de los valores de densidad aparente donde M_s , es la masa de los sólidos contenidos en un volumen conocido de suelo V_t .

$$P_b = M_s / V_t \quad (\text{g/cm}^{-3} \text{ o } \text{kg/m}^{-3})$$

3.2.2.2.6 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

La conductividad hidráulica se determinó con el método de carga fija/constante, la misma consistió en el siguiente procedimiento:

Se saturó el suelo a través de una lámina de agua puesta sobre la base de las muestras en un período máximo de 3 días. Las muestras se clasificaron en altamente permeable, moderadamente permeable y escasamente permeable teniendo en cuenta el tiempo de saturación de las mismas. Posteriormente se colocaron las muestras en un portanillo trasladándoles en el permeámetro. Allí se colocaron los sifones previamente llenados con agua, uniendo los portanillos y sus respectivas buretas numeradas. El agua drenada fluya por el tubo, y en el momento en que este estaba lleno se originaba un flujo hacia la bureta. Se ajustó el nivel del agua en el recipiente según las necesidades de flujo, durante la medición se mantuvo una diferencia de nivel entre dentro y fuera del portanillo.

El agua fluya uniformemente a través de la muestra y cuando la cantidad por unidad de tiempo ($\text{cm}^3/\text{min.}$) había alcanzado una lectura constante, se media la diferencia de nivel entre dentro y fuera de los portanillos.

Para el cálculo se utilizó la siguiente ecuación:

$$K = \frac{V \cdot L}{A \cdot t \cdot h}$$

L y A , constante que depende del tipo de anillo usado

V , volumen medido en la bureta

t , tiempo

h , diferencia de nivel

3.2.3 CÁSCARA DE CAFÉ

Este subproducto de *Coffea canéfora var. Robusta* procede de una zona cafeeicola de la provincia de Uige localizada (latitud $5^{\circ} 1' 10''$ S y $8^{\circ} 26'$ S) en el norte de Angola. Una región con clima tropical húmedo, históricamente cafeeícola, y en la que la producción de café representa grandes ingresos para la población de esta región.

En cada tratamiento con residuo vegetal superficial se aplicó una cantidad de 372,5 gramos de cáscara de café a una cobertura de 80 a 85 por ciento. En los tratamientos donde se aplicó el residuo de forma enterrada (profundidad 3 a 5 cm), se gastaron 832,5 gramos del subproducto a 80 a 85 por ciento.

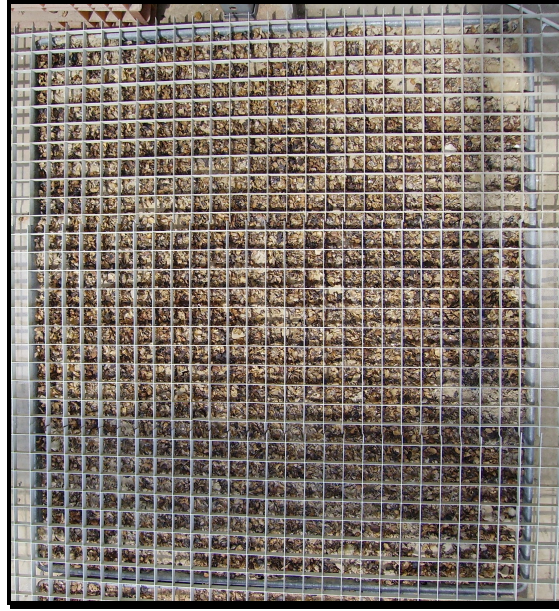


Figura 19. Estimación del porcentaje de cobertura

El porcentaje de cobertura se estimó colocando una malla de aluminio hecha de espacio cuadrulado, con las mismas dimensiones. Este espacio geométrico permitió estimar el porcentaje de cobertura en 690 escauadrillas y la media de la misma sería el valor real del porcentaje de cobertura del tratamiento. La operación se efectuó antes y después de la simulación en todos los tratamientos

3.3 SIMULADOR DE LLUVIA. CARACTERIZACIÓN

El estudio de los procesos de erosión relacionados con la lluvia conlleva la dependencia del investigador de la lluvia natural, la cual además de imprevisible, presenta variaciones en sus características (intensidad, tamaño de gotas, energía, distribución espacial y temporal, etc.) que hacen necesarios registros de decenas de años para entender su funcionamiento de los sistemas naturales (Calvo 2007). En este experimento se utilizó el simulador de lluvia diseñado en la propia Universidad Politécnica de Valencia, unidad docente de suelos (Calvo et al., 1988), con algunas adaptaciones en relación al diseño inicial hecho en 1988. Este consta de cuatro elementos: soporte metálico, depósito de agua, agitador mecánico, parrilla portagoteros.

3.3.1 COMPONENTES DEL SIMULADOR

Soporte metálico:

El simulador cuenta con una estructura metálica rectangular de 3,08 m de altura 1,59 y 199 m la estructura esta reforzada con barras de hierro en la parte intermedia inferior en posición horizontal lateral, garantizando una perfecta estabilidad en el suelo. La parte superior está provista de condiciones estructurales para el anclaje de la parilla de portagotereros, que tenía una distancia de 2,00 metros de altura hasta la mesa de erosión.



Figura 20. Simulador de lluvia

Depósito de agua y el mecanismo de estabilidad de la columna de agua:

El depósito de agua estaba acoplado en la parte superior de la estructura que suportaba el portagotereros. El mecanismo de estabilidad de la columna de agua (8 cm) consistía en regular el nivel del agua proveniente de la fuente y el agua que sobraba, salía por el orificio lateral del depósito acoplado con una manguera de PVC hacia abajo, la salida del agua de los goteros era por caída libre.



Figura 21. Deposito de agua

Mecanismo de aleatoriedad de la caída de las gotas de agua:

Este mecanismo consistía en transferir los movimientos giratorios del agitador mecánico hacia la parilla portagoteros. A su vez este efecto producía pequeñas vibraciones capaces de impedir que las gotas de agua cayeran en el mismo sitio y causaran perforaciones en el suelo, puesto que el tamaño de las gotas era grande. El agitador estaba provisto de un voltímetro para regular las vibraciones (figura 22).



Figura 22. Agitador mecánico

3.3.2 CARACTERÍSTICAS DEL GOTERO

Parilla de portagoteros y goteros autocompensantes de tipo radial:

La parilla de portagoteros de 120 cm. largo y 110 cm. ancho se situó en una estructura metálica, estaba constituida por 51 filas de tubos cada una con 5 goteros autocompensantes de tipo radial, como se puede observar en la figura 23. La estructura que soportaba la parilla portagoteros estaba acoplado en el soporte con cuatro muelles y alambres de seguridad en las extremidades del soporte.

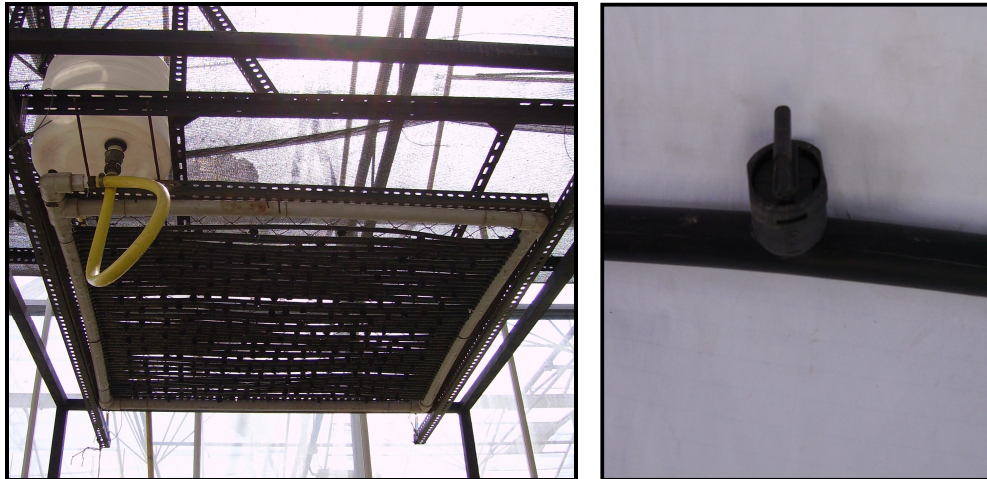


Figura 23. Parilla portagotero y gotero autocompensante de tipo radial

En este apartado se describirá el tamaño y la velocidad de gotas generadas por el gotero que fue determinado por Ibáñez (2001) como parte de las características del gotero diseñado por Calvo (2000) en esta institución.

3.3.2.1 TAMAÑO DE LAS GOTAS

Las gotas de lluvia varían desde un tamaño insignificante en la niebla hasta un máximo de seis o siete mm. de diámetro, este es el límite físico superior del tamaño de la gota y por encima de esa dimensión cualquier gota que se forme como resultado de la unión de más de una gota será inestable y se dividirá en gotas más pequeñas. El diámetro medio de una gota es de dos a tres mm. y varía con la intensidad.

Existen varios métodos para la determinación del tamaño de las gotas de lluvia simulada. La técnica de papel absorbente espolvoreado con tinte soluble en agua es uno de los más utilizados, pero también hay otros como la de bolita de harina (Hudson 1964) y

otras más avanzados como por ejemplo la reflexión detectada por un radar en función del número y tamaño de las gotas, fotografías de alta resolución etc.

La determinación del tamaño consistió en recoger 50 gotas de agua en un solo gotero (autocompensante de tipo radial), fueron seleccionados 30 goteros de forma aleatoria entre los 146 que había en la parrilla porta gotero. Las treinta evaluaciones se realizaron en tres series de 10 evaluaciones cada. Las gotas fueron recogidas en los frascos de vidrio, enumerados y previamente pesadas en una balanza de precisión, antes se secaron en la estufa para eliminar la humedad y disminuir el error en la medición. Después de recogida las gotas de agua en el gotero escogido se anotaba el tiempo y se pesaba inmediatamente, así se determinó el peso de las gotas. En la figura 24. se puede apreciar la variación de los valores medios, estos oscilaron entre 5,391 mm. a 6,022 mm. con una media de 5,7566 mm. de diámetro.

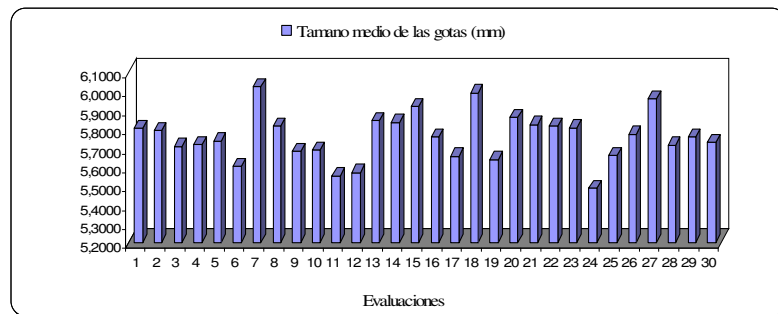


Figura 24. Distribución del diámetro de las gotas

3.3.2.2 VELOCIDAD DE LAS GOTAS

La velocidad de caída es otro parámetro estudiado por varios autores como Best (1950); Hudson (1964; Al-Durrah y Bradford (1981). Un cuerpo que cae libremente por efecto de la gravedad, irá acelerándose hasta que la resistencia del aire iguale a la atracción gravitatoria y luego continuará cayendo con la misma velocidad, que se denomina velocidad límite y depende del tamaño y forma del objeto. En el caso de las gotas de lluvia se alcanzan valores hasta 9 metros por segundo para las gotas de 5 mm de diámetro. La determinación de las gotas del simulador de gotero utilizado en este experimento fue realizada por Ibáñez (2001) concluyendo que el grueso de los datos tuvo un mínimo de 4,7 m/s y un máximo de 5,5 m/s, con unos valores extremos de 3,4 m/s para el mínimo y 5,7 m/s para el máximo. El método utilizado fue fotografía, que consistió en captar en una misma impresión fotográfica una misma gota en distintas posiciones de su recorrido hacia el suelo.

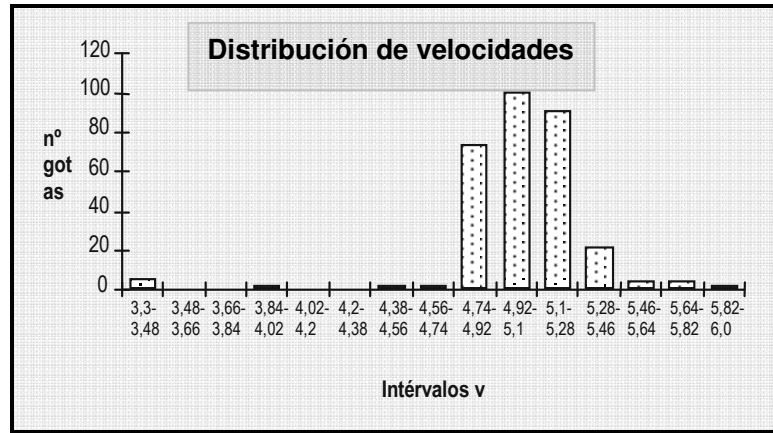


Figura 25. Simulador de goteros: Distribución de velocidades. Fuente: Ibáñez (2001)

En condiciones de lluvia natural es evidente que las pequeñas gotas adquieren mayor velocidad cuando hay efecto del viento simplemente porque en condiciones normales estas caen lentamente en relación a las gotas grandes. Según Hudson (1964) había planteado que existen evidencias de que en las lluvias tropicales, las velocidades más altas que alcanzan las gotas de lluvia no suelen ir acompañadas de viento, y esto puede tener relación con el movimiento del viento en torno a la base de las tormentas convectivas.

3.3.3 CARACTERIZACIÓN DE LA LLUVIA SIMULADA

3.3.3.1 CANTIDAD DE LLUVIA

Para la determinación de la cantidad de lluvia se recogió el agua que se acumulaba en el depósito y se midió con una probeta. Este procedimiento se repitió cuatro veces y se determinó el valor medio. La determinación fue muy fácil pues que se trataba de una ubicación concreta y reducida. El valor obtenido era 21,019 litros (119,679 mm/h) durante los 21 minutos de lluvia simulada.

3.3.3.2 INTENSIDAD DE LA LLUVIA

Normalmente la medición de la precipitación se efectúa por medio de pluviómetros o pluviógrafos, los segundos son utilizados principalmente cuando se trata de determinar precipitaciones intensas de corto período. En el experimento realizado utilizamos los

pluviómetros para determinar la intensidad del simulador de lluvia instalado en el invernadero. Primeramente se determinó la intensidad de los goteros, para el mismo se seleccionaron 5 de ellos y al azar la determinación se hizo de forma individual a cada uno, con cuatro repeticiones. Posteriormente se colocaron 13 pluviómetros en la bandeja y se determinó la intensidad media en cuatro repeticiones y con los datos de la intensidad se calculó el coeficiente de uniformidad de Christiansen (1942) (expresión 1) en toda la parcela.

Además de esta metodología, la intensidad de la lluvia también se determinó por el método de cálculo a través de los datos de tiempo y diámetro de las gotas obtenidas en la determinación de la cantidad de agua descrito en los párrafos anteriores.



Figura 26. Determinación de la intensidad (dos métodos).

$$CU = \left[1 - \frac{\sum_1^n |m - x|}{x \cdot n} \right] \cdot 100 \quad (1)$$

Donde:

m , altura de la lluvia en el colector.

x , media de los valores recogidos de los colectores.

n , número de pluviómetros.

3.3.3.3 CANTIDAD DE MOVIMIENTO Y ENERGÍA CINÉTICA

La energía cinética es la energía de un cuerpo en movimiento y la energía cinética de la lluvia es la suma de la energía cinética de las gotas individuales. Esta propiedad está en función del tamaño y de la velocidad de caída y se utiliza frecuentemente como un parámetro deseable para un simulador ya que se sabe que la energía cinética está estrechamente relacionada con la capacidad de la lluvia para causar erosión. La energía cinética de la lluvia varía con la intensidad. Varios autores hicieron experimentos para la determinación de la energía cinética impensando por Hudson (1943) que diseñó el método de bolitas de harina y Brant (1990), del papel de filtro.

En este experimento la energía cinética de la lluvia fue determinada por Ibáñez (2001) que trabajó con el mismo simulador de lluvia (gotero), la misma intensidad y las mismas condiciones de trabajo en el “Estudio de la erosión hídrica en suelos desarrollados sobre margas: métodos de estima en bancales abandonados”. La autora determinó la energía cinética a través de los valores de la distribución de velocidad y del tamaño de las gotas. La energía cinética es 12,6 JL/m² y mm. Con valor medio de 5 mm. de diámetro. Las gráficas y tablas de esta determinación se pueden ver en anexo II. Los aspectos tal como el tamaño de la gota y su velocidad varían con el tipo de gotero, la presión del agua y la altura (Hudson, 1981; Thian, 2001).

ø modal (mm)	5,358
v modal (m/s)	5,02
Ec modal	12,6
Ec /curvas ø.v	12,72
Ec media (Jl/m² mm)	12,66

Tabla 14. Resumen de los valores calculados de la Ec del gotero. Fuente: Ibáñez (2001).

3.4 DISEÑO EXPERIMENTAL

3.4.1 DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental de este trabajo es factorial con 3 factores y con 3; 5 y 2 niveles con un total de 30 tratamientos y 2 replicas, (60 experiencias). Se pretendió determinar el efecto de un residuo vegetal en cinco tipos de suelo, para mejorar las propiedades físicas ante el efecto de la lluvia.

Factores	Niveles				
Residuo Vegetal “mulch”	0%		80% a 85%		80% a 85%
			Superficial		Enterrado
Tipo de Suelo	1 (I)	2 (II)	3 (III)	4 (IV)	5 (V)
Estado de suelo	con costra			sin costra	

Tabla 15. Factores y niveles del diseño experimental

Tratamientos	Residuo vegetal	Tipo de Suelo	Estado del suelo	Etiqueta
1	1 superficial	1	1 con costra	1SC (suelo1, superficial, con costra)
2	1 superficial	1	2 sin costra	1SS (suelo 1, superficial, sin costra)

3	1 superficial	2	1 con costra	2SC (suelo 2, superficial, con costra)
4	1 superficial	2	2 sin costra	2SS (suelo 2, superficial, sin costra)
5	1 superficial	3	1 con costra	3SC (suelo 3, superficial, con costra)
6	1 superficial	3	2 sin costra	3SS (suelo 3, superficial, sin costra)
7	1 superficial	4	1 con costra	4SC (suelo 4, superficial, con costra)
8	1 superficial	4	2 sin costra	4SS (suelo 4, superficial, sin costra)
9	1 superficial	5	1 con costra	5SC (suelo 5, superficial, con costra)
10	1 superficial	5	2 sin costra	5SS (suelo 5, superficial, sin costra)
11	2 enterrado	1	1 con costra	1EC (suelo 1, enterrado, con costra)
12	2 enterrado	1	2 sin costra	1ES (suelo 1, enterrado, sin costra)
13	2 enterrado	2	1 con costra	2EC (suelo 2, enterrado, con costra)
14	2 enterrado	2	2 sin costra	2ES (suelo 2, enterrado, sin costra)
15	2 enterrado	3	1 con costra	3EC (suelo 3, enterrado, con costra)
16	2 enterrado	3	2 sin costra	3ES (suelo 3, enterrado, sin costra)
17	2 enterrado	4	1 con costra	4EC (suelo 4, enterrado, con costra)
18	2 enterrado	4	2 sin costra	4ES (suelo 4, enterrado, sin costra)
19	2 enterrado	5	1 con costra	5EC (suelo 5, enterrado, con costra)
20	2 enterrado	5	2 sin costra	5ES (suelo 5, enterrado, sin costra)
21	3 testigo	1	1 con costra	1TC (suelo 1, testigo, con costra)
22	3 testigo	1	2 sin costra	1TS (suelo 1, testigo, sin costra)
23	3 testigo	2	1 con costra	2TC (suelo 2, testigo, con costra)
24	3 testigo	2	2 sin costra	2TS (suelo 2, testigo, sin costra)
25	3 testigo	3	1 con costra	3TC (suelo 3, testigo, con costra)
26	3 testigo	3	2 sin costra	3TS (suelo 3, testigo, sin costra)
27	3 testigo	4	1 con costra	4TC (suelo 4, testigo, con costra)
28	3 testigo	4	2 sin costra	4TS (suelo 4, testigo, sin costra)
29	3 testigo	5	1 con costra	5TC (suelo 5, testigo, con costra)
30	3 testigo	5	2 sin costra	5TS (suelo 5, testigo, sin costra)

Tabla 16. Esquema del diseño experimental

Las variables dependientes que fueron determinadas son: Humedad, Temperatura, Infiltración, Resistencia a la penetración (encostramiento), Estabilidad de los agregados, Erosión, Escorrentía, Porosidad, Densidad aparente, Conductividad hidráulica.

Las Determinaciones únicas realizadas fueron: Salinidad, Materia orgánica, Textura, análisis granulométrico, Análisis de las propiedades físico químicas del suelo (PH, magnesio, calcio, potasio, sodio y % de caliza).

Las determinaciones que se llevaron a cabo en el invernadero fueron: evaporación, temperatura y la caracterización de la lluvia.

3.4.2 PROCEDIMIENTO

El procedimiento descrito se utilizó en suelo sin costra y posteriormente se repitió el mismo en suelo con costra, excepto la primera fase que fue preparatoria. Al terminar las evaluaciones se compararon los resultados de las dos partes.

Primera fase:

- Determinación de las propiedades físicas y físico-químicas de los suelos como el estrato de saturación, potencia de hidrogeno, calcio, magnesio, potasio, sodio, porcentaje de caliza, conductividad eléctrica, materia orgánica, textura, estabilidad de los agregados, porosidad, densidad aparente, conductividad hidráulica y resistencia a la penetración.
- Preparación de las bandejas de erosión.

Segunda fase:

- Humedecimiento del suelo.
- Reposo del suelo durante 2 días después del humedecimiento.

Tercera fase:

- Lluvia simulada por goteo de intensidad 122 mm/h durante 21 minutos, durante esta operación se determinó el tiempo de inicio del encharcamiento, el tiempo de

3.4.2.1 BALANCE HÍDRICO Y LA PÉRDIDA DE SUELO

3.4.2.1.1 MEDICIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELO

La escorrentía superficial, principal agente de transporte durante las precipitaciones, suele ser muy interesante para el estudio de la erosión. La capacidad de transporte hace referencia a la cantidad de suelo movilizado durante las precipitaciones aunque depende directamente de las características de las gotas de lluvia, la turbulencia en la lámina de agua etc. Estos determinan la cantidad de suelo que se pierde.

Para determinar la pérdida de suelo en cada tratamiento se recogieron los 7 botes de escorrentía. Estos se decantaron por separado durante 24 horas y se filtraron en papel de filtro previamente pesado. Posteriormente se colocaron las muestras de suelo resultante de la filtración en la estufa a 105 °C durante 24 horas. Posteriormente se pesó la muestra y se determinó el valor del suelo erosionado (Tasa de erosión en gramo por metro cuadrado).

3.4.2.1.2 ESCORRENTÍA

La escorrentía superficial está condicionada por la cantidad de lluvia recibida y por el factores relacionados con las características intrínsecas del suelo, además de la influencia de otros factores como son pendiente, porosidad, la densidad, tipo de cobertura vegetal etc. En el experimento estos factores señalados influyeron en los valores de escorrentía.

Para la determinación de esta propiedad se preparan 7 botes de 1L que se utilizaron durante la lluvia simulada a los 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 minutos. Posteriormente se midió el volumen en cada intervalo y se registro. Estos datos sirvieron para elaborar la grafica de infiltración correspondiente a cada tratamiento.

3.4.2.1.3 INFILTRACIÓN

La cuantificación de la tasa de infiltración del agua en el suelo es de gran interés para el diseño eficiente de los sistemas de riego y en estudios medioambientales y edáficos relacionados con la determinación de la erosión del suelo, el análisis de la susceptibilidad al encostramiento y la recuperación de los suelos afectados por sales.

La infiltración, o volumen de agua procedente de las precipitaciones que atraviesa la superficie del terreno y que ocupa de forma total o parcial los poros del suelo y del subsuelo, se determina con varios como el infiltrómetro de doble anillo.... infiltrómetro de disco, o infiltrómetro automático (Lostao et al., 2002).

En el presente trabajo la determinación de la infiltración fue muy fácil, y se estimó teniendo en cuenta el valor de la cantidad de agua precipitada determinada anteriormente. Con este valor se sustrajo el volumen total de la escorrentía y se halló la infiltración.

3.4.2.2 PROCESO DE HUMECTACIÓN – DESECACIÓN. EVALUACIONES Y CUANTIFICACIÓN

3.4.2.2.1 CAPACIDAD DE CAMPO Y PUNTO DE MARCHITAMIENTO

La capacidad de campo y el punto de marchitamiento se determinaron con el método Richards que consistió en tomar las muestras de suelo anteriormente procesado, es decir secado al aire libre y pasado por un tamiz de 2 mm. de diámetro. Se preparó la placa de cerámica (membrana porosa) y se colocaron en ella las muestras de suelo por duplicado sobre unos anillos de goma retenedores de 1cm de altura y 6 cm de diámetro. Las muestras de suelos se habían pesado anteriormente, 25 g fue el peso ideal para la determinación. Las muestras se saturaron durante 24 horas y se colocaron en la cámara de presión de vapor sobre la membrana porosa en contacto con su cara inferior con agua libre a la presión atmosfera 1/3 durante 48 horas, para la determinación de la capacidad de

campo. Se aplicó 15 atmósferas para la determinación del punto de marchitamiento y presiones intermedias entre 1/3 y 15 atmósferas, que sirvió para la construcción de la curva de desorción de agua del suelo en el rango de humedad que va desde el punto de marchitamiento a capacidad de campo, y a presiones que van de 1/3 a 15 atmósferas. Después de 48 horas se determinó la humedad gravimétrica pesándolas y colocando a estufa a 105 °C y volver a pesar después del secado.

3.4.2.2.2 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA DEL SUELO

Durante esta fase del experimento, las parcelas estaban húmedas a capacidad de campo y de cierta forma favoreció las condiciones para el estudio del comportamiento hídrico del suelo en todos los tratamientos, teniendo en cuenta sus diferencias. Estas se hicieron midiendo la humedad del suelo en las profundidades de 5 y 10 cm, dos veces al día durante aproximadamente 15 a 20 días, período en que los tratamientos presentaron evidencias claras de suelo seco.

Descripción, manejo y utilización de los sensores (FDR)

Theta probe ML2x:

(Figura 28) es un sensor dieléctrico que se inserta en el suelo para determinar la humedad (Gaskin and Miller, 1996). Está diseñado, para hacer lectura de valores consistentes conociendo la medición media de la constante dieléctrica, haciendo que estos valores sean fácilmente intercambiables en el sistema (Delta, 1999). El sensor tiene cuatro electrodos de 6 cm., separados entre ellos por tres equidistancias, los electrodos tienen 3 mm. de diámetro con un espaciamiento de 1,5 cm. de radio (Robinson et al., 1999).

Wet-2:

Es un sensor con tres varillas de acero inoxidable de 6,7 cm y una de 6,1 cm y 1,5 m de longitud del cable, se insertó en el suelo y se determinó la humedad volumétrica. Al medir la humedad este genera una señal de 20 MHz en la cual es aplicado en la varilla del centro, produciendo un pequeño campo electromagnético dentro del suelo; el contenido de agua, la conductividad eléctrica, y la composición del suelo alrededor de las varillas permiten la determinación de las propiedades dieléctricas, es decir el sensor detecta las propiedades dieléctricas desde su influencia sobre el campo electromagnético y envía la

señal sobre el “HH2” que es el lector que recibe la información del sensor y determina los valores (Delta, 2005).



Figura 28. Theta probe ML2x y Wet-2 (de izquierda a derecha)

El sensor se utilizó siempre después del humedecimiento de la bandeja poco antes de la simulación de lluvia, y durante el periodo de desecación. Esta se limpiaba debidamente siempre antes y después de su utilización.

3.4.2.2.3 RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN

La resistencia a la penetración se determinó con el penetrómetro (figura 29) este aparato posee 67 cm. de altura con conos de 0,25 y 0,50 cm²; muelles de 50 N pequeño (Ø 1,4 mm) y 100 N mediano (Ø1,6 mm). El cambio de muelle y cono dependía de la resistencia del suelo. Se realizó de 2 a 3 mediciones y se registro la media de las lecturas.

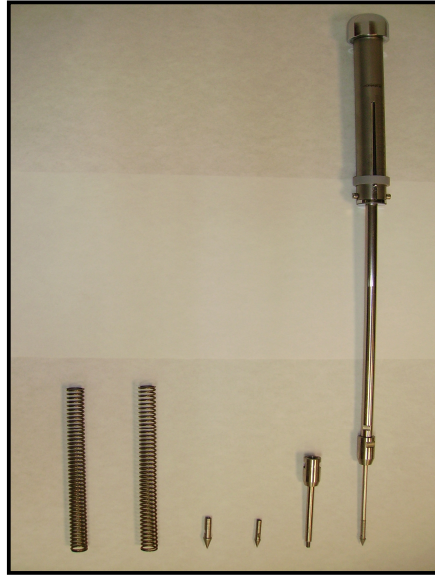


Figura 29. *El penetrómetro*

Como ya es sabido la compactación causa cambios en las propiedades físicas del suelo, aumentando la resistencia a la penetración y la densidad aparente, y reduciendo la porosidad (Patterson, 1977). Además de reducir la velocidad de infiltración de agua, causa una disminución del drenaje, reduciendo la disponibilidad de agua y abastecimiento de aire y oxígeno utilizado por las raíces. La importancia de la determinación de la resistencia a la penetración da una gran contribución para el estudio del mejoramiento de las propiedades físicas del suelo. Actualmente ya existen avances tecnológicos en sensores y dispositivos de automatización que registran a tiempo real la señal de la resistencia del suelo, como por ejemplo el penetrómetro dinámico de cono (González et al.,(2004).

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS DEL MEDIO

Los invernaderos son estructuras creadas por el hombre para poder lograr condiciones climáticas y microclimas diferentes al de alguna región o estación del año. El invernadero se preparó bajo las condiciones climáticas de una zona tropical; en este caso del norte de Angola, con una gran ocurrencia de precipitaciones de alta intensidad, aspecto que se tuvo en cuenta al preparar un simulador capaz de producir lluvias con intensidad de 122 mm/h. Los valores de temperatura registrados en el invernadero oscilaron entre los 20 °C - 27 °C grados, similares a la temperatura media de Angola, con 21 °C (anexo I.10). La media de las máximas en la zona experimental durante el momento de la realización del estudio fue de 27 °C, que como se puede observar en anexo I.4 es el valor medio de las temperaturas máximas registradas en Angola (27,6 °C). En el invernadero estos valores fueron logrados por la influencia de la ventilación forzada para regular la evaporación y la temperatura. Este mecanismo fue satisfactorio en caso de la constancia de la temperatura en un rango de valores no superior a los 27 °C que representa la media de los valores máximos de temperatura en esta zona tropical.

El efecto de la temperatura también tuvo influencia en el desarrollo de la vegetación espontánea. Según Koning (1988); Araki (2000), la luz y la temperatura juegan los principales roles sobre los procesos biológicos de las plantas. Aunque el microclima del invernadero no es exactamente uniforme y existen gradientes, especialmente de luz y temperatura que dependen tanto de la ubicación del eje mayor de la estructura como de las dimensiones de invernadero (Iglesias, 2002).

La evaporación en Angola tiene un valor medio anual de 1445 mm. y medias mensuales de 124 mm, registros que difieren en algo con los valores de evaporación en tina obtenidos en la zona del experimento durante el periodo del estudio, que son de 233 mm. Sin embargo en algunas ocasiones del año la evaporación en Angola puede llegar a los 248 mm. (anexo I.8). La evaporación en los procesos del suelo depende en gran medida de algunos factores como la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y el viento, y también depende del tipo de suelo y otros factores como la salinidad.

4.2 UNIDADES EXPERIMENTALES

4.2.1 ESTUDIO DE LOS SUELOS

4.2.1.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS

La diferencia de las propiedades físico-químicas en los suelos que se utilizaron en la experiencia se refleja en la clasificación textural, la salinidad, el contenido en potasio y la cantidad de materia orgánica, destacando los valores mínimos de magnesio en el suelo IV. Los resultados se pueden ver en la tabla 18. En la clasificación textural (tabla 17) los suelos I y II se diferencian de los demás por ser franco y franco-arenoso respectivamente; mientras que los tres últimos tienen la misma clasificación textural (franco-arcillo-arenoso). Son no obstante diferentes en coloración, composición química y otros aspectos que se reflejan en la tabla 18. La textura influye en gran medida en la erosión del suelo; las partículas menos resistentes son la arena y el limo por lo que cuanto mayor sea su porcentaje mayor será la erosionabilidad del suelo (Morgan, 1997). Según Thiam (2001) teóricamente es acertado utilizar el contenido de arcilla como índice de erosionabilidad del suelo, porque las partículas de arcilla se juntan con la materia orgánica para formar terrones y agregados, y la resistencia del suelo viene determinada por la estabilidad de sus agregados.

Suelo	I	II	III	IV	V
Arcilla	27	15	29	27	24
Limo	42	5	22	14	22
Arena	31	80	49	59	54
Clase textural	Franco arcilloso	Franco arenoso	Franco arcillo arenoso	Franco arcillo arenoso	Franco arcillo arenoso

Tabla 17. Textura de los suelos estudiados

El porcentaje de caliza activa en los cinco suelos tuvo valores similares, aunque se ve que el suelo IV tuvo menor porcentaje en relación a los demás. La caliza es un tipo de roca de los muchos que podemos encontrar en cualquier suelo. Ocurre que es especial debido a su abundancia y a su influencia sobre las propiedades del suelo. Se encuentra en prácticamente todos los suelos, en mayor o en menor cantidad. En ocasiones los suelos calizos sufren carencias de nutrientes, en especial de hierro, pero la caliza es buena para la estructura del suelo, favoreciendo su estabilidad y agregación. De hecho en los suelos ácidos se echa en falta esta propiedad que aporta la caliza y que en ellos escasea. Según

Alan y Russell (2000) en algunos casos se aplica la caliza para evitar problemas de toxicidad con el aluminio y magnesio como limitante del crecimiento.

Todos los suelos están equilibrados en cuanto a su alcalinidad aunque existiendo una relación directa entre los valores de pH y el porcentaje de caliza, por lo que el de menor valor de caliza tiene menor pH.

Suelo	I	II	III	IV	V
Caliza (%)	34	30.9	30.8	24.9	34.1
Na (mq/L)	7.658	Ip	15.32	23.61	19.79
K (mq/L)	0.585	0.547	1.278	2.60	1.461
pH	8.50	8.57	8.44	8.08	8.53
C.e (ms/cm)	3.95	3.21	5.49	7.89	5.51
Ca (mq/L)	35.4	30.6	34.4	48.6	31.2
Mg (mq/L)	4.93	5.77	7.53	3.18	8.16
M.o (%)	6.27	1.43	1.60	2.51	1.57
C.c (%)	8.83	1	9,12	9.36	6.88
P.m (%)	4.04	0.82	5,13	5.49	3.57
T suelo (° C)	20.7	21.3	20.1	20.0	20.2
Color (seco)	10YR 7/1	5Y 6/1	10YR 5/4	2,5Y 4/4	10YR 5/6
Color (humedo)	2,5Y 4/4	5Y 4/1	7,5YR 4/4	10YR 3/3	7,5YR 5/6

Tabla 18. Análisis físico químico

En cuanto al sodio los suelos III, IV y V reflejaron valores altos en relación a los suelo I y II que tienen valores relativamente más bajos a los demás. En el caso del suelo II el valor de sodio en milequivalentes es inapreciable. El suelo IV presentó cantidades altas alrededor de 23,61 milequivalentes por litro. Según Cecilio (2007) los suelos sometidos a procesos de sodificación y salinización aumentan su cohesión (la cohesión molecular en seco y la superficial en húmedo), ocasionando un aumento de su resistencia al corte, dificultando las labores y crecimiento de las raíces, siendo este efecto más evidente cuanto más fina es la textura. El sodio causa el deterioro de la estructura por su efecto dispersante de los coloides rompiendo los poros y alterando la agregación del suelo (Vázquez, 2003).

El calcio, el potasio y el magnesio son elementos que forman parte de la CIC en varias proporciones. Yanez (1989) plantea proporciones de 2-6% de potasio, 10-20% de magnesio y 60-80 de calcio en el suelo. La procedencia de estos elementos puede estar en los abonos minerales, los minerales primarios y la materia orgánica. A través de la disolución, alteración y mineralización se convierten en elementos asimilable que son lentamente retenidos en los espacios interlaminares de las arcillas, para posteriormente pasar a formar parte del complejo de cambio (Fayolle, 1991).

Suelo	1	2	3	4	5
D.a (g/cm ³)	1.46	1.49	1.43	1.46	1.55
R. P (Kg/cm ²)	60	Ip	48	36	36
C. hidráulica (cm/h)	1.85	46.15	1.43	1.75	2.14
Porosidad (%)	40.5	52.5	41.5	51.5	42
E. A (%)	2.3	Ip	2.4	2.9	2.7
Humedad (%)	1.31	0.14	2.10	2.48	1.38

Tabla 19. Análisis de las propiedades físicas a estudiar (antes de las evaluaciones).

Las diferencias entre los 5 suelos también se pueden ver en la gráfica de curva característica de humedad (figura 30); mientras que los suelos I, III y V tienen valores de capacidad de campo poco diferenciados, con valores de humedad que oscilan entre 8,83 a 9,36, los suelos V y II presentan mucha diferencia en comparación a los demás. Destaca así mismo la poca capacidad de retención de agua del suelo II a cualquier potencia de succión.

Los valores reflejados en la tabla 19 se analizaran detalladamente en el apartado 4.2 donde se hizo un acompañamiento de la evolución de ellos.

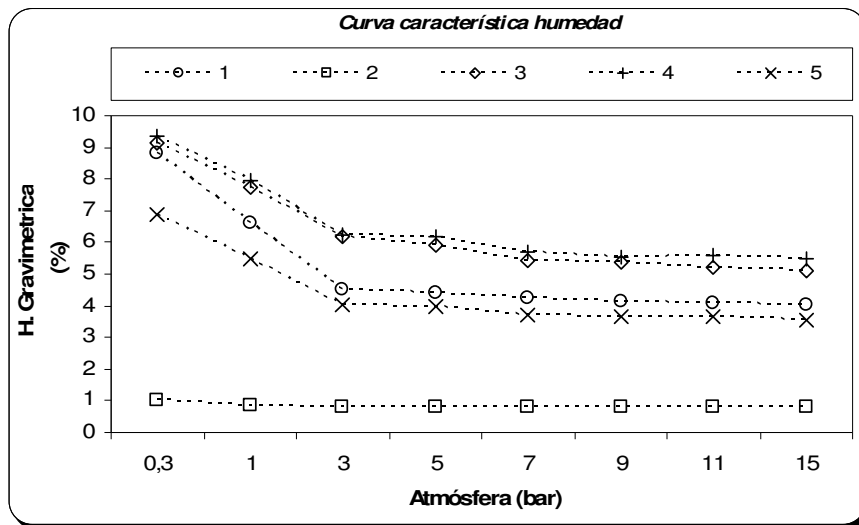


Figura 30. Curva característica de humedad de los cinco suelos estudiados

4.2.1.2 LOS SUELOS DE LAS ZONAS CAFETERAS DE ANGOLA Y SU RELACIÓN CON LOS SUELOS ESTUDIADOS EN LA EXPERIENCIA

Los oxisoles, alfisoles, entisoles y aridisoles abarcan casi la totalidad de las zonas cafeteras de Angola. Los entisoles que tienen la mayor representatividad en Angola se parecen con los suelos III y V coincidiendo en la coloración y textura: 7,5YR 3/3 y 7,5YR 5/3 (marrón, marrón oscuro) en húmedo, textura arenosa, franco arenosa, franco arcillo arenosa. Tienen horizonte diagnóstico ochrico A o Ap hasta los 9 cm de profundidad coincidiendo con la serie de Angola y con los datos de los estudio hechos por Diniz (1989) en algunas zonas donde la producción de café es una tradición. Son suelos de clima árido y pocos evolucionados con material cuarzo más o menos suelto.

Los Oxisoles no tienen representación en España. Son suelos que tienen el horizonte ABC coloración desde amarillo a rojo en general de consistencia friable, su textura varía de franca a arcillosa (textura media) debido a la intensa meteorización, el suelo I también presenta textura media.

Los aridisoles tiene menos de 40% de arcilla en los 18 cm de profundidad presentan un epipedon ochrico A o Ap, características que también coinciden con la serie Angola y con los suelos de algunas zonas cafeteras de Angola hasta los 9 cm de profundidad, son suelos de régimen árido con bajos niveles de MO tienen color 10YR 5/4 (pardo gris) estas características son parecidas al suelo IV. Pero en fase de intenso deterioro físico pueden presentar color gris claro (10YR 7/1) y textura gruesa que pudieran coincidir con el suelo II aunque estas son improductivas y sin estructura.

Los Alfisoles también tiene menos de 40% de arcilla en los 18 cm de profundidad en general todos los suelos estudiados tienen menos de 40% de arcilla, pero se asemejan al suelo IV por coincidir en la coloración (10YR 3/3 pardo oscuro, húmedo) y en la textura (media), son suelos de zonas calidas con temperatura de suelo alrededor de 20°C.

4.2.1.3 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL RESIDUO SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS

4.2.1.3.1 ESTABILIDAD DE LOS AGREGADOS

Cuando el agregado es estable al agua, la unión de sus partículas se mantiene después de haber sido humedecido lenta y totalmente, y el agua puede seguir moviéndose por el espacio poroso (Porta, 2003). Este planteamiento se puso de manifiesto en este experimento donde se destacan altos valores de porcentaje de estabilidad de los agregados para los tratamientos “enterrados” (gráfica 31) en relación a los tratamientos superficiales y testigo, con excepción de los tratamientos con suelo II que no respondieron a la presencia del residuo vegetal. Entre los tratamientos enterrados se destaca el suelo I, que alcanza un valor máximo del 26%. Todos los suelos del tratamiento superficial y testigo tuvieron valores más parecidos con excepción del suelo V con valores de estabilidad de los agregados de 3%, 10% y 15% para los tratamientos testigo, superficial y enterrado respectivamente. Los tratamientos sin costra fueron los que mayor valor de estabilidad de agregados alcanzaron (16,5% en el suelo 4) en relación a los suelos con costra donde destacó el suelo I con 8% de agregados estables. Algo que no ocurrió en todos los tratamientos con suelo II donde la presencia de la cáscara de café no se hizo notar.

Al analizar la efectividad de los tratamientos (tabla 20). Los resultados fueron mayores en los tratamientos “enterrados”, con diferencias significativas en relación a los demás tratamientos puesto que fue notable la influencia de la presencia del residuo vegetal, no sólo en la superficie de las microparcels sino hasta una profundidad aproximada de 5 cm. Ahí estuvieron más presentes las condiciones de formación de agregados gracias a la materia orgánica producto de la descomposición del residuo. La materia orgánica es vital para soportar los efectos erosivos del agua por su capacidad de cimentación en el proceso de formación de agregados estables, Demolón y Heinen (1932) citado por Baver (1991). La media porcentual de los agregados en los tratamientos “enterrados” (14,43%) es casi tres veces mayor en relación a los tratamientos superficiales (5,46%). Por último el testigo presentó valores bajos de estabilidad de los agregados (1,79%), dentro del rango del valor obtenido antes de la experiencia que es de 0 a 2,9% (ver tabla 19 análisis de las propiedades físicas antes de las evaluaciones).

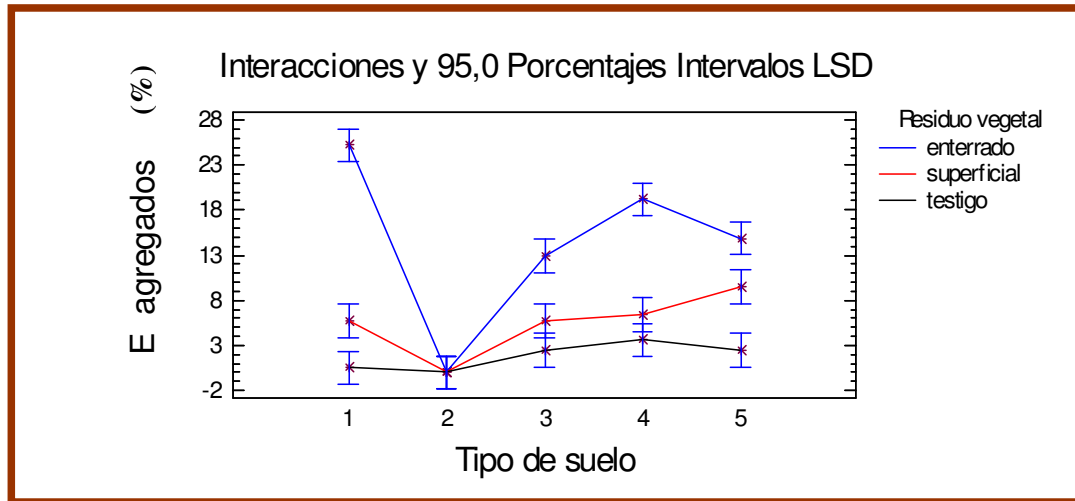


Figura 31. Variación de la estabilidad de los agregados en relación al suelo y residuo vegetal

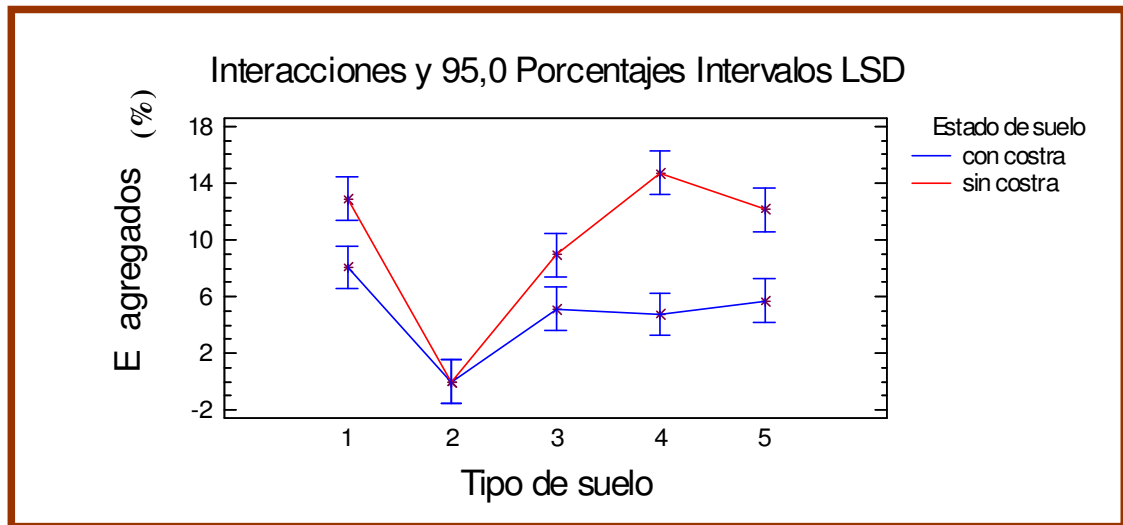


Figura 32. Variación de la estabilidad de los agregados en relación al tipo de suelo y estado de suelo

Al analizar la influencia del residuo en los diferentes suelos se puede constatar que la formación de agregados fue despreciable en el suelo II, pues es un suelo que tiene una composición granulométrica que no favorece a la formación de agregados. Además la

presencia del residuo durante un año no fue suficiente para mejorar su estabilidad estructural. Los tratamientos con suelo I fueron los que más se diferenciaron de forma general (tabla 20). Los tratamientos con costra tuvieron valores medios de 9,74% y registraron diferencias con los tratamientos sin costra con valores de 4,72 %. En todos los suelos en los que la respuesta al residuo fue significativo se presentaron condiciones para la formación de agregados puesto que para el mismo es necesario la presencia de determinadas cantidades de arcilla que es determinante en la formación de unidades estructurales muy importantes como: tactoides, láminas de arcilla, cristales de arcilla, dominios, clusters o flóculos y microagregados. Estudios hechos por Filho et al. (2002); Mora et al. (2003) y Oztas et al. (2003) concluyeron a través de varios análisis cuantitativos la importancia del grado de humificación o complejación de la materia orgánica frente a los otros parámetros como la composición granulométrica. Según Lado et al. (2004) con el aumento de la materia orgánica hay menor dispersión de las arcillas y mayor tamaño de los agregados.

Tabla 20. Influencia de la estabilidad de los agregados en todos los niveles de los factores estudiados

Factores	Niveles	Estabilidad agregados (%)
Residuo vegetal	Superficial	5,46 a*
	Enterrado	14,43 b
	Testigo	1,79 c
Tipo de suelo	1	10,48 a
	2	0,0 c
	3	7,03 b
	4	9,73 a
	5	8,91 ab
Estado de suelo	Con costra	9,74 a
	Sin costra	4,72 b

*Los valores con letras iguales no tienen diferencias significativas ($P \leq 0,05$)

En el análisis de varianza los tres efectos (tabla 21) tuvieron diferencias significativas al 99%, por lo que se ve claramente la influencia del residuo, el suelo y el estado del suelo en la formación de agregados. Hay interacciones doble al 95% entre los factores tipo de suelo-residuo vegetal y tipo de suelo-estado de suelo, algo que no sucede en los factores residuo vegetal-estado del suelo.

Tabla 21. Análisis de varianza de la estabilidad de los agregados para estudiar los efectos y sus diferencias en varias interacciones.

Efectos y interacciones	Cociente-F
Tipo de suelo	41,61**
Residuo vegetal	163,14**
Estado de suelo	72,97**
AB	18,24**
AC	7,77**
BC	7,18 ^{NS}

^{NS} indican que no hay diferencias, * hay diferencias significativa con $P \leq 0,05$ y ** hay diferencias significativa con $P \leq 0,01$,

4.2.1.3.2 POROSIDAD

Al analizar la porosidad del suelo (gráfica 33) se puede observar que el tratamiento “enterrado” registró valores elevados en todos los suelos excepto en el II. Se destacó el suelo I, que alcanzó un valor máximo del 60% de porosidad en el tratamiento “enterrado”. La presencia de residuo vegetal en el suelo aumenta la porosidad. Obviamente, el hecho de que la materia orgánica favorezca la agregación de las partículas del suelo repercute en la porosidad. En efecto, no sólo se observa un incremento de la porosidad total al aplicarse residuo vegetal sino que aumenta el tamaño medio de los poros al formarse poros de mayor diámetro. Mulumba y Lal. (2008) demostraron cuantitativamente el incremento de la porosidad del suelo al utilizar el residuo vegetal. Los tratamientos sin costra fueron los que mayores valores de porosidad del suelo alcanzaron en relación a los tratamientos con costra, destacando igualmente el suelo I que registró un valor máximo del 55% de porosidad.

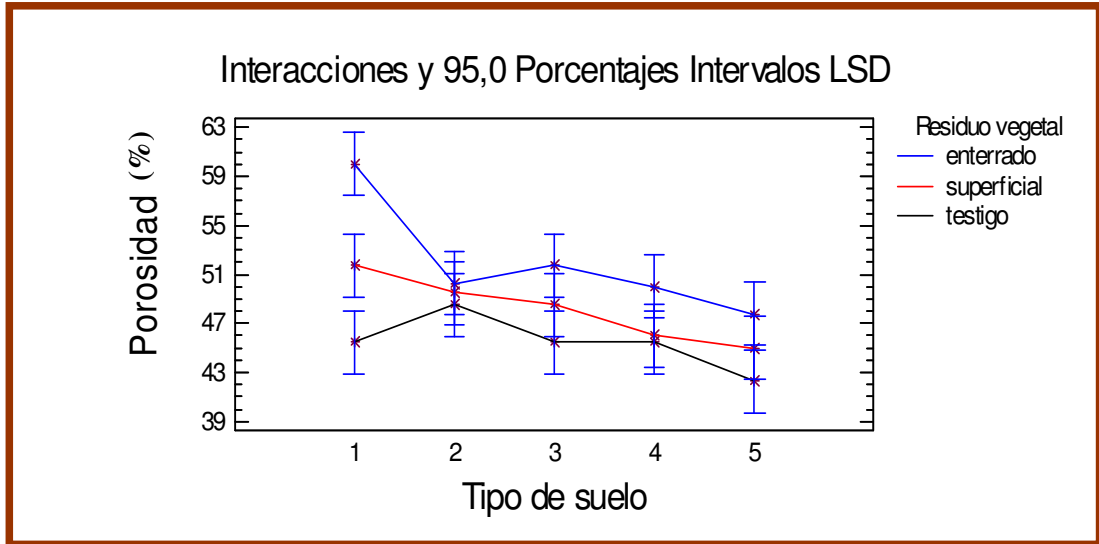


Figura 33. Variación de la porosidad en relación al tipo de suelo y la posición del residuo vegetal

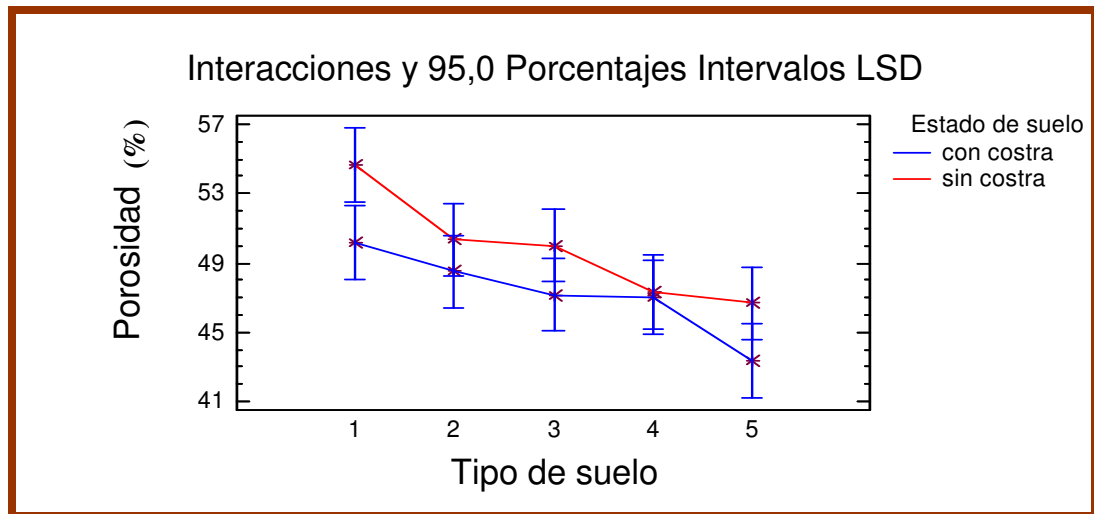


Figura 34. Variación de la porosidad en relación al tipo de suelo y estado de suelo

Al analizar la influencia del residuo en los diferentes suelos se puede observar (tabla 22) que los tres tipos de tratamientos (superficial, enterrado y testigo) tuvieron diferencias significativas entre ellos, destacándose los tratamientos “enterrados” con valores medios de 51,95 % de porosidad. Los tratamientos con el suelo I fueron los que más valores máximos de porosidad alcanzaron (52,42%), este suelo es el que más porcentaje de partículas finas tiene (tabla 17) puesto que la clase textural influye de forma determinante en la presencia de mayor o menor cantidad de poros, además de la presencia del residuo vegetal en los tratamientos. Al analizar el estado del suelo, los tratamientos con costra registraron valores medios de la porosidad de 47,23% presentando diferencias significativas en relación a los tratamientos sin costra (49,80%). En suelos con formación de costra la compactación es mayor, según Logsdon y Karlen (2004) hay una relación directa de la porosidad y la densidad aparente estando las dos propiedades relacionadas con la textura. En el momento de la lluvia éstas se depositan y constituyen una capa delgada e impermeable (Slattery y Bryan, 1994) afectando la porosidad, la distribución del tamaño de las partículas y su orientación (Bresson y Boiffin, 1990). Sin embargo se puede observar (tabla y gráfica) que los valores de la porosidad en el experimento son muy aproximados, esto se debe a que la profundidad de la costra (1 - 2,5 cm) fue mucho menor en relación a la porción de muestra analizada dentro del anillo (5 cm).

Tabla 22. Influencia de la porosidad en todos los niveles de los factores estudiados

Factores	Niveles	Porosidad (%)
Residuo vegetal	Superficial	48,15 a*
	Enterrado	51,95 b
	Testigo	45,45 c
Tipo de suelo	1	52,42 a
	2	49,42 b
	3	48,58 b
	4	47,17 bc
	5	45,00 c
Estado de suelo	Con costra	49,80 a
	Sin costra	47,23 b

*Los valores con letras iguales no tienen diferencias significativas ($P \leq 0,05$)

El resultado del análisis de varianza nos muestra que al efecto simple tipo de suelo tuvo diferencias significativas al 99%, al igual que el residuo vegetal. En el caso del

estado del suelo la diferencia significativa fue del 95% (tabla 23). Al analizar la porosidad no se observan efectos dobles en los tres casos (tipo de suelo-residuo vegetal, tipo de suelo-estado de suelo y residuo vegetal-estado de suelo).

Tabla 23. Análisis de varianza de la porosidad para estudiar los efectos y sus diferencias en varias interacciones.

Efectos y interacciones	Cociente-F
Tipo de suelo	9,05**
Residuo vegetal	21,29**
Estado de suelo	9,87*
AB	0,74 ^{NS}
AC	2,37 ^{NS}
BC	0,33 ^{NS}

^{NS} indican que no hay diferencias, * hay diferencias significativa con $P \leq 0,05$ y ** hay diferencias significativa con $P \leq 0,01$,

4.2.1.3.3 DENSIDAD APARENTE

Los resultados de densidad aparente que se observan en la gráfica 35 reflejan valores mayores en los tratamientos testigo y superficial destacando el tratamiento con suelo V testigo ($1,60 \text{ g/cm}^3$). En todos los casos quedaron por debajo los tratamientos “enterrado”, aunque los valores de los tratamientos con suelo I y II de éste último fueron muy similares a los tratamientos testigo y superficial, alcanzando valores que oscilaron entre $1,3$ y $1,47 \text{ g/cm}^3$. Al analizar el estado del suelo (gráfica 36) los tratamientos con costra alcanzan valores más altos de densidad aparente con gran destaque en los tratamientos V ($1,53 \text{ g/cm}^3$). Los tratamientos con suelo I con costra registraron valores aproximados a los tratamientos sin costra con el mismo suelo.

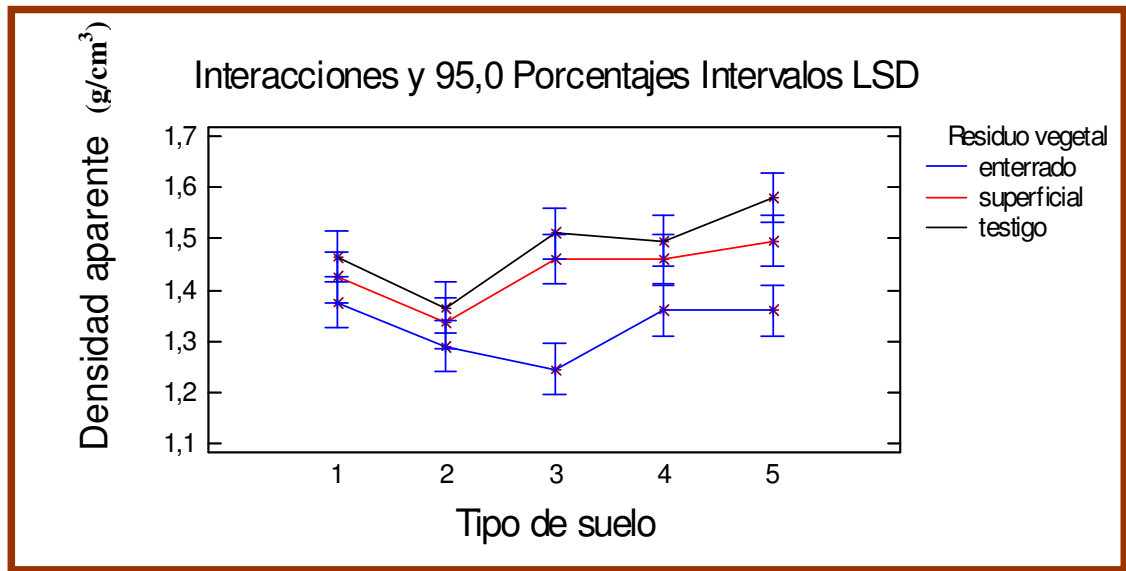


Figura 35. Variación de la densidad aparente en relación al tipo de suelo y residuo vegetal

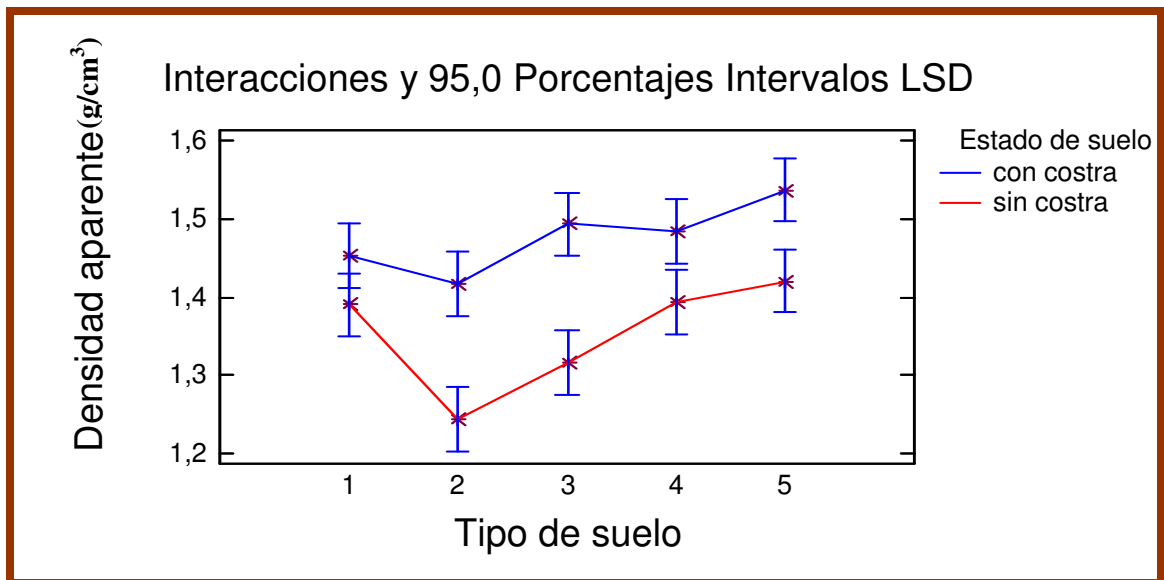


Figura 36. Variación de la densidad aparente en relación al tipo de suelo y estado de suelo

Los datos obtenidos en la experiencia reflejan diferencias significativas entre los tratamientos superficiales, “enterrados” y los testigos. El valor promedio más bajo de la densidad aparente se registró en los tratamientos “enterrados” (tabla 24) con valores de $1,33 \text{ g/m}^3$, seguidamente en los tratamientos superficiales y por último en los testigos (figura 35). Hay varios estudios que demuestran mejoría en los valores de densidad aparente por la presencia de residuo vegetal. Uno de ellos es el realizado por Alvarado y Forsythe, (2005) cuando observó que la densidad aparente aumentaba con la profundidad del suelo debido a la reducción de la actividad biológica desarrollada en el horizonte superficial; Logsdon y Karlen (2004) concluyó que la cantidad de carbono orgánico puede resultar en una baja densidad del suelo en algunos casos porque el carbono orgánico tiene más densidad que la partícula mineral. La presencia del residuo vegetal en los tratamientos aumenta la actividad biológica del suelo y favorece la ocurrencia de cambios que desencadenan a una mejor estructura del suelo. Los resultados bajos en los tratamiento con suelo II ($1,33 \text{ g/cm}^3$) reflejan la influencia de la clase textural y la baja influencia del residuo en estos suelos. Los tratamientos con costra obtuvieron valores medios de densidad aparente de $1,35 \text{ g/m}^3$ estos presentaron diferencias significativas en relación a los tratamientos sin costra ($1,48 \text{ g/m}^3$).

Tabla 24. Influencia de la densidad aparente en todos los niveles de los factores estudiados.

Factores	Niveles	Densidad aparente (g/cm^3)
Residuo vegetal	Superficial	1,44 a*
	Enterrado	1,33 b
	Testigo	1,48 c
Tipo de suelo	1	1,42 ab
	2	1,33 c
	3	1,41 b
	4	1,44 ab
	5	1,48 a
Estado de suelo	Con costra	1,35 a
	Sin costra	1,48 b

*Los valores con letras iguales no tienen diferencias significativas ($P \leq 0,05$)

El resultado del análisis de varianza nos muestra que los efectos simples tipo de suelo, residuo vegetal y estado del suelo tuvieron diferencias significativas al 99% (tabla 25). Esta variable (densidad aparente) no registro efectos dobles en los tres casos.

Tabla 25. Análisis de varianza de la densidad aparente para estudiar los efectos y sus diferencias en varias interacciones.

Efectos y interacciones	Cociente-F
Tipo de suelo	9,65**
Residuo vegetal	34,91**
Estado de suelo	62,20**
AB	2,04 ^{NS}
AC	2,19 ^{NS}
BC	3,64 ^{NS}

^{NS} indican que no hay diferencias, * hay diferencias significativa con $P \leq 0,05$ y ** hay diferencias significativa con $P \leq 0,01$,

4.2.1.3.4 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

Al analizar los resultados de la conductividad hidráulica medido en el permeamiento del laboratorio (no fue muy preciso en la determinación de la conductividad en el suelo II y en los tratamientos “enterrados” sin costra, ver anexos X.5 y X.6) se observa que los tratamientos “enterrados” obtuvieron valores mas elevados en relación a los tratamientos superficiales y testigo, aunque también se ve que los resultados de los tres tipo de tratamientos no están muy distanciados, excepción a diferencia de los tratamientos con el suelo II, el cual alcanzó el valor máximo de 275 cm/h para el “enterrado”. Al analizar el estado del suelo en la grafica 38, los tratamientos con suelo II tuvieron valores máximos de conductividad hidráulica de 210 cm/h en relación a los tratamientos con suelo I, III, IV y V con costra y sin costra con valores medios de 10 y 30 cm/h respectivamente.

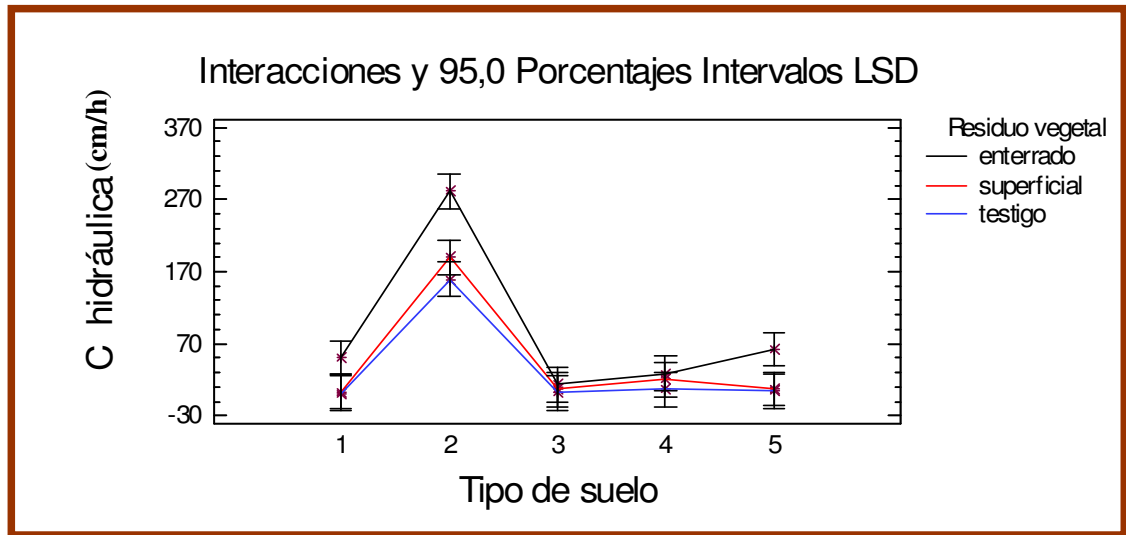


Figura 37. Variación de la conductividad hidráulica en relación al tipo de suelo y residuo vegetal

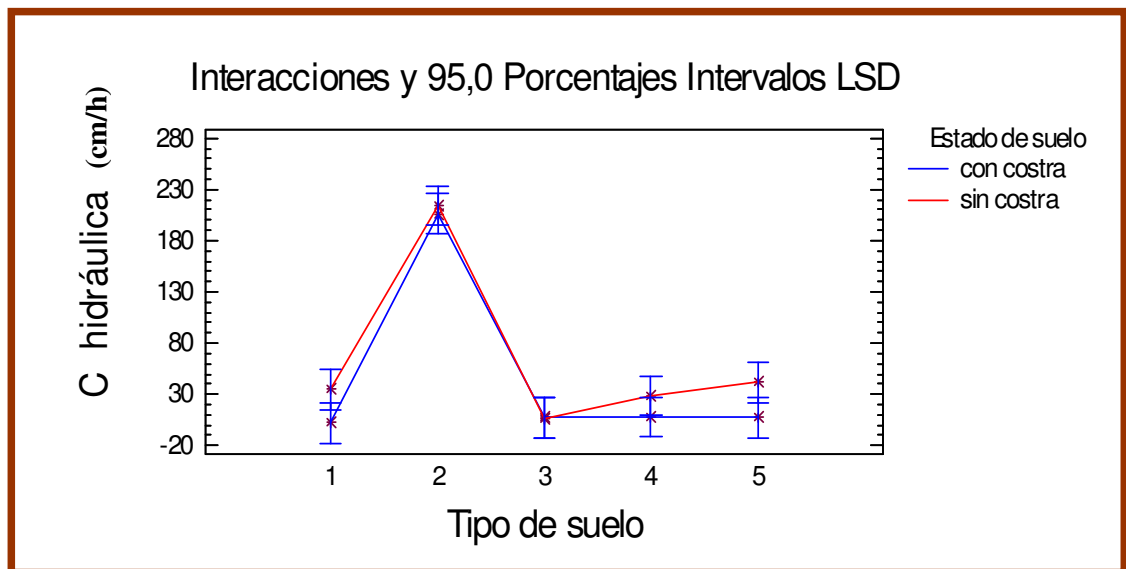


Figura 38. Variación de la conductividad hidráulica en relación al tipo de suelo y estado de suelo

La conductividad hidráulica registró diferencias significativas entre los tratamientos “enterrados” en relación al superficial y testigo (tabla 26). Esta propiedad fue mayor en

los tratamientos “enterrado” (87,26 cm/h), siendo en este caso notable la influencia de la presencia del residuo vegetal hasta una profundidad de aproximadamente 5 cm. Al mejorar las propiedades estructurales del suelo se mejora las condiciones que permiten un buen recorrido del agua desde la superficie hasta las profundidades del suelo. Los bajos valores de conductividad están relacionados con el estancamiento de agua en la superficie del suelo, condiciones anaeróbicas, escorrentía, inundaciones y erosión (Dexter et al, 2004). No hubo diferencias significativas en los tratamientos con suelo I, III, IV y V, mientras que en los tratamientos con suelo II fueron los que registraron diferencia significativa por tener características muy diferentes, en relación a los demás (tabla 26). El aumento de la arcilla y la reducción del porcentaje de arena disminuye la conductividad hidráulica (Diaz et al., 2003). Los suelos de textura fina suelen tener características diferentes de retención de agua y muy baja conductividad saturada comparadas con los suelos de textura gruesa (suelo II). Al evaluar el estado de suelo en la tabla 26 se ve que los tratamientos con costra registraron mayores valores (65,17 cm/h) de conductividad hidráulica en relación a los tratamientos sin costra (46,24 cm/h).

Tabla 26. Influencia de la conductividad hidráulica en todos los niveles de los factores estudiados.

Factores	Niveles	Conductividad Hidráulica (cm/h)
R. vegetal	Superficial	45,39 a*
	Enterrado	87,26 b
	Testigo	34,47 a
Tipo de suelo	1	18,32 a
	2	210,22 b
	3	7,19 a
	4	18,23 a
	5	24,58 a
Estado de suelo	Con costra	65,17 a
	Sin costra	46,24 b

*Los valores con letras iguales no tienen diferencias significativas ($P \leq 0,05$)

El resultado del análisis de varianza nos muestra que los efectos simples tipo de suelo, estado del suelo tuvieron diferencias significativas al 99% y residuo vegetal al 95% (tabla 27). No se registro ningún efecto doble para la variable conductividad hidráulica.

Tabla 27. Análisis de varianza de la conductividad hidráulica para estudiar los efectos y sus diferencias en varias interacciones.

Efectos y interacciones	Cociente-F
Tipo de suelo	105,11 **
Residuo vegetal	18,14*
Estado de suelo	6,28**
AB	2,60 ^{NS}
AC	0,82 ^{NS}
BC	3,02 ^{NS}

^{NS} indican que no hay diferencias, * hay diferencias significativa con $P \leq 0,05$ y ** hay diferencias significativa con $P \leq 0,01$,

4.2.1.4 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL RESIDUO SOBRE EL BALANCE HÍDRICO

4.2.1.4.1 INFLUENCIA SOBRE LA PÉRDIDA DEL SUELO

Al analizar los efectos simples (gráfica 39) se observa claramente que los tratamientos testigo fueron los que máximos valores de pérdida de suelo alcanzaron, con un máximo de 1 450 g/m² para el suelo I, a excepción de los tratamientos con suelo II donde no se ha constatado la influencia del residuo vegetal. Los tratamientos superficiales y posteriormente los “enterrados” fueron los que menos pérdida de suelos registraron, y el tratamiento que más pérdida de suelo tuvo en ambos fue el que tenían suelo I con residuo superficial con valores que rondaban los 400 g/m². Y entre ambos los valores fueron muy aproximados distanciándose del testigo. Al analizar el estado del suelo (gráfica 40) los valores de los tratamientos con costra con suelo I, III, IV y V alcanzaron valores mayores en relación a los tratamientos sin costra con el mismo suelo. Aspecto que no sucedió con el suelo II donde no hubo escorrentía y tampoco pérdida de suelo, los tratamiento con suelo I fueron que máximo valor registraron (850 g/m²).

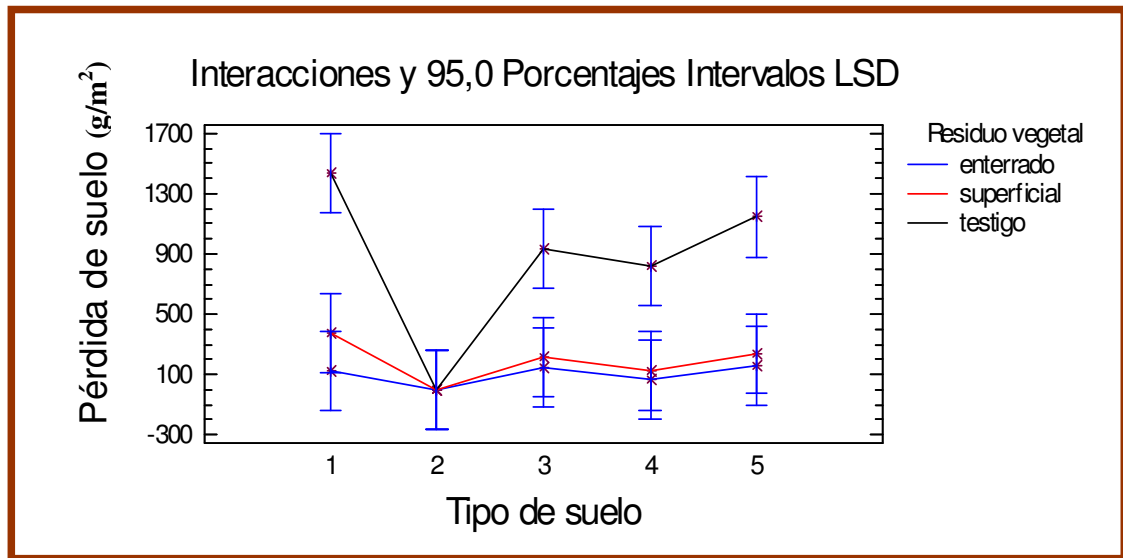


Figura 39. Variación de la pérdida de suelo en relación al tipo de suelo y residuo vegetal

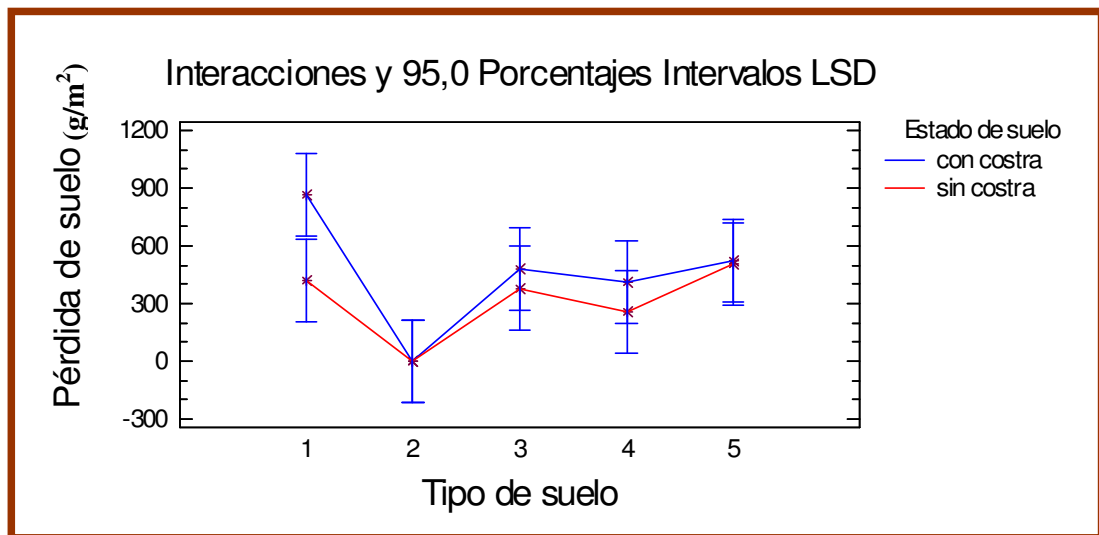


Figura 40. Variación de la pérdida de suelo en relación al tipo de suelo y estado del suelo

La pérdida de suelo media fue menor en los tratamientos “enterrados” (97,54 g/m²) y posteriormente en los tratamientos superficiales (188,03 g/m²), ambos no registraron diferencias significativas (tabla 28), el testigo alcanzó un valor medio de 867,25 g/m² con diferencia significativas. Esto se justifica puesto que la presencia del residuo vegetal protege de diversas maneras el suelo contra la erosión, amortizando el impacto de las gotas de lluvia al ofrecer resistencia al agua en movimiento, disminuyendo la velocidad de

escurrimiento y reduciendo significativamente la erosión (FAO, 1967; Lobo y Vivas, 2007; Jin et al., 2008; Brodie y Misra, 2009). La pérdida de suelo por erosión, fue mayor en el suelo I con valores significativo al 95% en relación a los suelos de los demás tratamientos (tabla 28), este suelo como se puede observa en su valor textural tiene mayores cantidades de partículas finas (arcilla) en relación a otros, este factor podría influenciar en la pérdida de suelo. Sin embargo en los tratamientos con suelo II (franco arenoso) la erosión fue nula por las características del suelo, la textura es uno de los factores que influye en la erosión de los suelos. Según Cerdá (1994) en los suelos arenosos los valores de erosión superficial son muy reducidos. De la Rosa et al. (2005) obtuvo diferentes resultados de pérdida de suelo en diferentes tipos de suelo, esto demuestra la influencia que tiene determinadas características de los suelos frente a la erosión. Según el análisis de la influencia del residuo sobre el estado del suelo no hubo diferencias significativas en los tratamientos con costra y sin costra.

Tabla 28. Influencia de la pérdida de suelo en todos los niveles de los factores estudiados

Factores	Niveles	Perdida de suelo (g/m ²)
Residuo vegetal	Superficial	188,03 a*
	Enterrado	97,54 a
	Testigo	867,25 b
Tipo de suelo	1	644,07 c
	2	0,00 a
	3	431,61 bc
	4	334,26 b
	5	511,44 bc
Estado de suelo	Con costra	456,94 a
	Sin costra	311,60 a

*Los valores con letras iguales no tienen diferencias significativas ($P \leq 0,05$)

En el análisis de varianza (tabla 29) se observa diferencias significativas en el tipo de suelo al 95%, y en todos los tratamientos donde hubo variación del residuo vegetal la diferencia significativa fue al 99%. Pero no hubo diferencia significativa al analizar el estado del suelo y además no se registraron interacciones dobles.

Tabla 29. Análisis de varianza de la pérdida de suelo para estudiar los efectos y sus diferencias en varias interacciones.

Efectos y interacciones	Cociente-F
Tipo de suelo	6,79*
Residuo vegetal	33,91**
Estado de suelo	3,04 ^{NS}
AB	2,61 ^{NS}
AC	0,94 ^{NS}
BC	1,22 ^{NS}

^{NS} indican que no hay diferencias, * hay diferencias significativa con $P \leq 0,05$ y ** hay diferencias significativa con $P \leq 0,01$,

Igualmente se estudio la evolución de la cantidad de suelo por cada litro de escorrentía (g/l). Al analizar el resultado estadístico de la concentración se puede constatar que las diferencias que existen en los factores simples coinciden con el resultado estadístico de la pérdida de suelo (tabla 28). Es decir la concentración y la pérdida de suelo tuvieron la misma dinámica.

En el análisis de varianza para estudiar los efectos y sus diferencias en varias interacciones (tabla 31) se puede ver que el efecto tipo de suelo y residuo vegetal registró diferencias significativas al 99%. En el efecto estado del suelo no hubo diferencias significativas y no se registraron interacciones dobles al evaluar esta variable.

Tabla 30. Influencia de la concentración en todos los niveles de los factores estudiados

Factores	Niveles	Concentración (g/l)
Residuo vegetal	Superficial	9,17 a*
	Enterrado	8,51 a
	Testigo	36,96 b
Tipo de suelo	1	30,66 c
	2	0,00 a
	3	19,66 bc
	4	16,26 b
	5	24,48 bc
Estado de suelo	Con costra	18,48 a
	Sin costra	17,94 a

*Los valores con letras iguales no tienen diferencias significativas ($P \leq 0,05$)

Tabla 31. Análisis de varianza de la concentración para estudiar los efectos y sus diferencias en varias interacciones.

Efectos y interacciones	Cociente-F
Tipo de suelo	7,89**
Residuo vegetal	26,08**
Estado de suelo	0,02 ^{NS}
AB	0,29 ^{NS}
AC	1,89 ^{NS}
BC	0,31 ^{NS}

^{NS} indican que no hay diferencias, * hay diferencias significativa con $P \leq 0,05$ y ** hay diferencias significativa con $P \leq 0,01$,

4.2.1.4.2 INFLUENCIA SOBRE LA ESCORRENTÍA

Este parámetro disminuyó en los tratamientos “enterrados” (gráfica 41) reflejando valores inferiores a 16 mm para el tratamiento con suelo V, en los tratamientos con suelo II la escorrentía fue nula. Los tratamientos superficiales y testigo tuvieron la misma tendencia, registrando valores de escorrentía muy aproximados y superiores a 24 mm con destaque en los tratamientos con suelo I. Los tratamientos con costra fueron los que mayor escorrentía registró con valores máximos de 25 mm en los suelos I, III y V, en los tratamientos sin costra la dinámica fue la misma aunque con valores inferiores de escorrentía de 18 mm para el suelo III y V. Los tratamientos con suelo II registraron baja capacidad de retención hídrica y como consecuencia no se registró encharcamientos y seguidamente escorrentía. Además no formaron costra porque estos fenómenos son muy frecuentes en suelos cuyos horizontes superficiales presenten una relación limo/arcilla muy alta y con un elevado contenido en arcillas de baja actividad, que son especialmente susceptibles a este fenómeno por la rigidez de su espaciado basal que no permite la retención de agua entre sus capas y las hace muy compactas al secar. Según Singer y Shainberg (2004) en el proceso de formación de costra es relevante el papel de la textura puesto que el tamaño de las partículas y la estructura influyen en el aumento de la infiltración o en la disminuyendo de la cantidad de escorrentía.

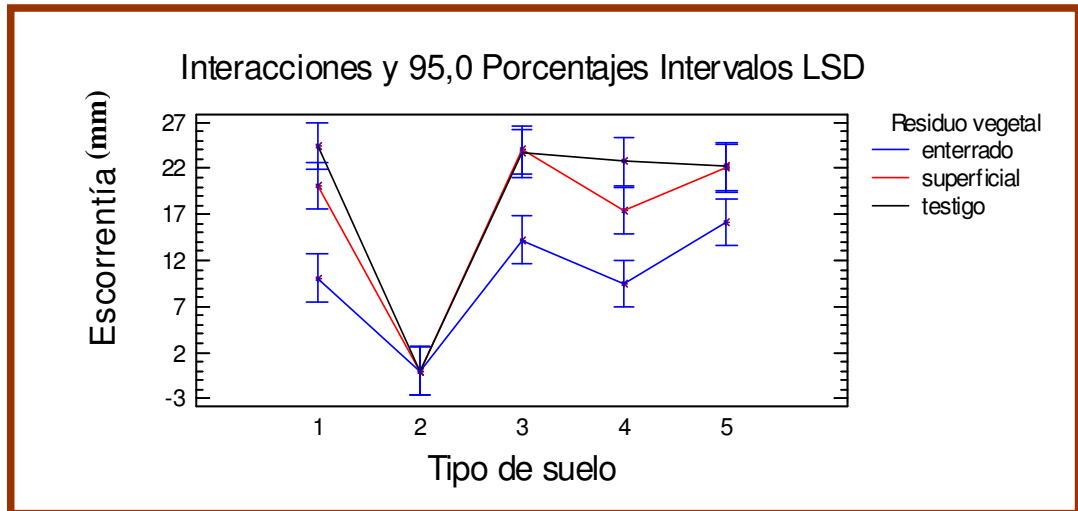


Figura 41. Variación de la escorrentía en relación al tipo de suelo y residuo vegetal

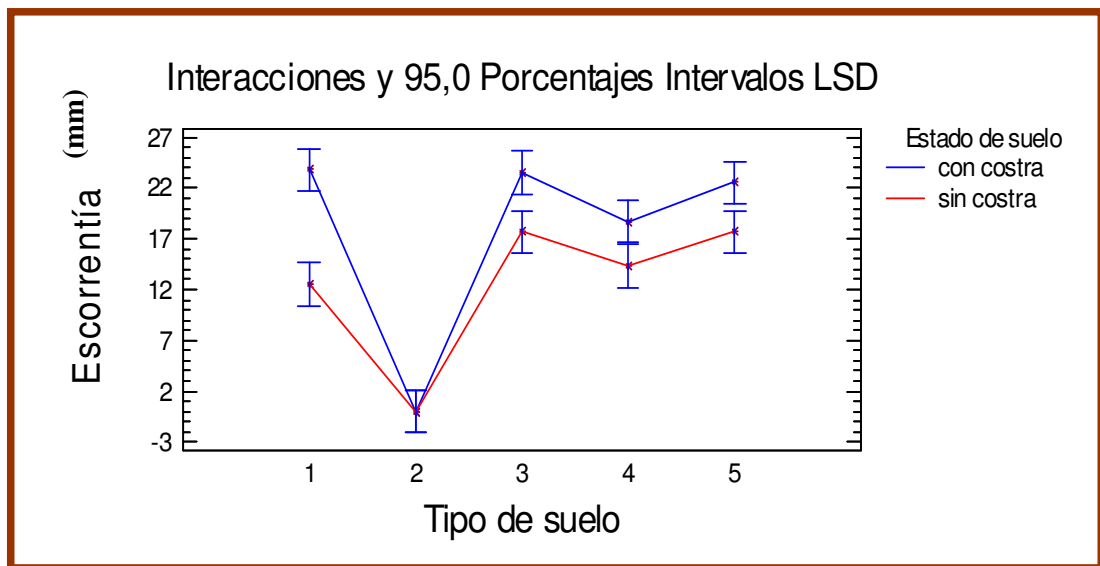


Figura 42. Variación de la escorrentía en relación al tipo de suelo y estado del suelo

Al analizar el efecto del residuo en la tabla 32 se puede ver que los tratamientos donde el residuo estaba “enterrado” difirieron significativamente en relación a los tratamientos con residuo superficial y testigos. Al incorporar el residuo en una profundidad de 3 a 5 cm se favorece el drenaje y se reduce la escorrentía. Jin et al. (2008) tuvo resultados positivos al utilizar “mulch” en la reducción de la escorrentía y erosión.

Brodie y Misra (2009) obtuvieron resultados satisfactorios al reducir la en un 50% al utilizar residuo vegetal como “mulch”, resultados que no son muy diferentes a los de nuestro experimento, en el cual llegamos a reducir la escorrentía en tratamientos “enterrados” hasta en un 46,26%. Los tratamientos con encostramiento registraron diferencias significativas (17,73 mm) en relación a los sin costra (12,46 mm).

Tabla 32. Influencia de la escorrentía en todos los niveles de los factores estudiados.

Factores	Niveles	Escorrentía (mm)
Residuo vegetal	Superficial	16,70 a*
	Enterrado	9,99 b
	Testigo	18,59 a
Tipo de suelo	1	18,19 bc
	2	0,00 a
	3	20,62 c
	4	16,52 b
	5	20,14 c
Estado de suelo	Con costra	17,73 a
	Sin costra	12,46 b

*Los valores con letras iguales no tienen diferencias significativas ($P \leq 0,05$)

En la tabla 33 se puede ver diferencias significativas hasta de 99% en los tres efectos estudiados (tipo de suelo, residuo vegetal y estado de suelo). Hubo interacciones doble al 95% en tipo de suelo-residuo vegetal, tipo de suelo-estado de suelo no hubo interacciones dobles en residuo vegetal-estado de suelo.

Tabla 33. Análisis de varianza de la escorrentía para estudiar los efectos y sus diferencias en varias interacciones.

Efectos y interacciones	Cociente-F
Tipo de suelo	89,05**
Residuo vegetal	41,10**
Estado de suelo	41,94**
AB	3,90*
AC	4,92*
BC	0,46 ^{NS}

^{NS} indican que no hay diferencias, * hay diferencias significativa con $P \leq 0,05$ y ** hay diferencias significativa con $P \leq 0,01$,

4.2.1.4.2.1 ANÁLISIS DE LAS VARIABLES RESIDUOS ARRASTRADOS, INICIO DE ENCHARCAMIENTO E INICIO DE ESCORRENTÍA

Los tratamientos con residuo superficial y “enterrado” registraron diferencias entre ellos al analizar la cantidad de residuos arrastrados. Los tratamientos superficiales tuvieron un valor medio de 7,74 g mientras que los tratamientos “enterrados” la media fue de 3,79 g (tabla 34, figuras 43 y 44). En cuanto a los tipos de suelo hubo diferencias entre tratamientos en el V, I y II, mientras el III y el IV no mostraron diferencias significativas. En el caso del suelo II esto se debe a la ausencia de escorrentía, como consecuencia de su composición textural (franco arenoso). Los tratamientos con costra también registraron diferencia en relación a los tratamientos sin costra al analizar la cantidad de los residuos “arrastrados”, con valores de 5,5 g en frente a 2,18 este caso se manifiesta el efecto del encostramiento (tabla 34). En el análisis de varianza todos los efectos evaluados en la cantidad de residuos arrastrados presentaron diferencias significativas en el orden de 99%. Hubo interacciones dobles en el tipo de suelo-residuo vegetal, residuo vegetal-estado de suelo y no hubo interacciones dobles en tipo de suelo-estado de suelo.

Tabla 34. Influencia de las variables dependientes de la escorrentía (residuos arrastrados, inicio de encharcamiento y inicio de escorrentía) en todos los niveles de los factores estudiados

Factores	Niveles	R. arrastrados (g)	I. encharcamiento (min)	I. escorrentía (min)
R. vegetal	Superficial	7,74 c	0,62 b	1,77 b*
	Enterrado	3,79 b	1,11 c	2,15 b
	Testigo	0,00 a	0,21 a	0,5 a
Tipo de suelo	1	3,1 b	0,6 b	1,99 b
	2	0,00 a	0,00 a	0,00 a
	3	4,7 bc	1,06 c	1,92 b
	4	5,24 bc	0,83 bc	1,5 b
	5	6,17 c	0,74 bc	1,97 b
E. de suelo	Con costra	5,5 a	0,42 a	1,14 a
	Sin costra	2,18 b	0,87 b	1,8 b

*Los valores con letras iguales no tienen diferencias significativas ($P \leq 0,05$)

Tabla 35. Análisis de varianza de las variables dependientes de la escorrentía para estudiar los efectos y sus diferencias en varias interacciones

Efectos y interacciones	Cociente-F		
	R. arrastrados	I. encharcamiento	I. escorrentía
Tipo de suelo	10,58**	12,3**	24,68**
R. vegetal	45,09**	26,44**	43,08**
E. de suelo	24,84**	20,13**	18,81**
AB	3,71**	3,39 ^{NS}	3,05 ^{NS}
AC	2,54 ^{NS}	2,23 ^{NS}	1,24 ^{NS}
BC	6,82**	7,52**	4,2 ^{NS}

^{NS} indican que no hay diferencias, * hay diferencias significativa con $P \leq 0,05$ y ** hay diferencias significativa con $P \leq 0,01$,

En relación al inicio de encharcamiento, los tratamientos testigo fueron los que tardaron menos a encharcarse (0,21 min), seguidos de los tratamientos con suelo superficial (0,62 min) y por ultimo, como era de esperar, los tratamientos con suelo “enterrado”, con 1,11 min. En cuanto al tipo de suelo las diferencias se notaron en los tratamientos con suelos I, II, y III; el IV y V no tuvieron diferencias. Los suelos sin costra con valores medios de 0,87 min. tardaron más en encharcarse que los suelos con costra (0,42 min) puesto que no existían situaciones que impidían la infiltración del agua. En el análisis de varianza (tabla 35) las diferencias fueron significativas al 99 % al analizar los factores tipo de suelo, residuo vegetal y estado de suelo, y interacción en residuo-estado de suelo que es la única que tuvo diferencias significativas.

Al analizar el inicio de la escorrentía vemos que la escorrentía tarda mucho en aparecer en los tratamientos “enterrados” (2,15 min) y superficiales (1,77 min) ya que la presencia de un elemento protector es muy importante. En un estudio realizado por Ibáñez (2001) se observó que el tiempo transcurrido desde el inicio de la precipitación hasta el inicio de la escorrentía depende principalmente de la densidad de la vegetación. Esta favorece las buenas propiedades físicas del suelo mejorando la capacidad de penetración del agua, retrasando el inicio de la escorrentía. En nuestro experimento el elemento protector fue el residuo vegetal, y en los tratamientos donde no había vegetación (testigo) la escorrentía se forma en menos tiempo (0,5 min). En los suelos no hay ninguna

diferencia. Los tratamientos sin costra (1,8 min) se diferenciaron con los tratamientos con encostramiento puesto que estos últimos tardaron menos tiempo en formar escorrentía (1,14 min) por la capacidad de la costra en reducir la infiltración. Los tres efectos o factores tuvieron diferencias significativas del orden de 99%, siendo que las interacciones no registraron diferencias significativas.

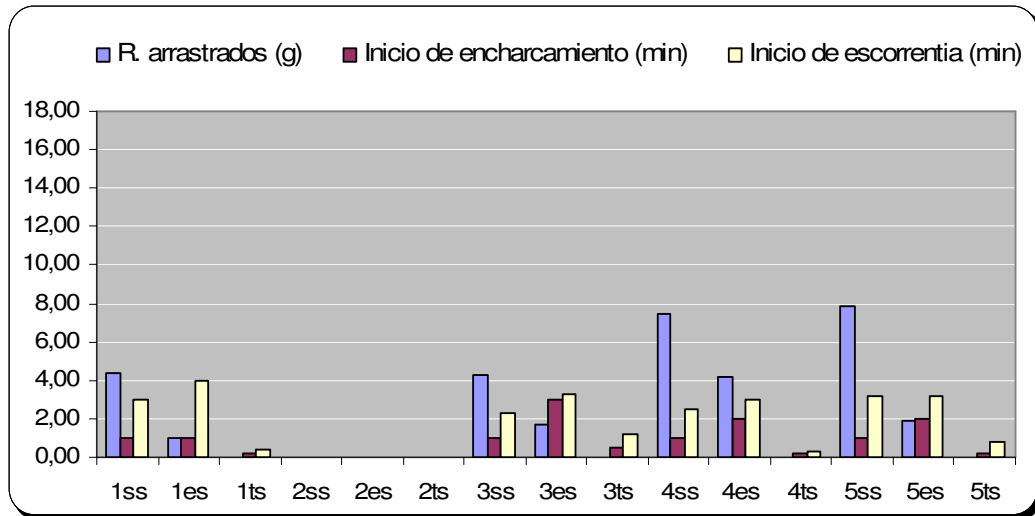


Figura 43. Comportamiento de los residuos arrastrados, inicio de encharcamiento y inicio de escorrentía en los tratamientos sin costra.

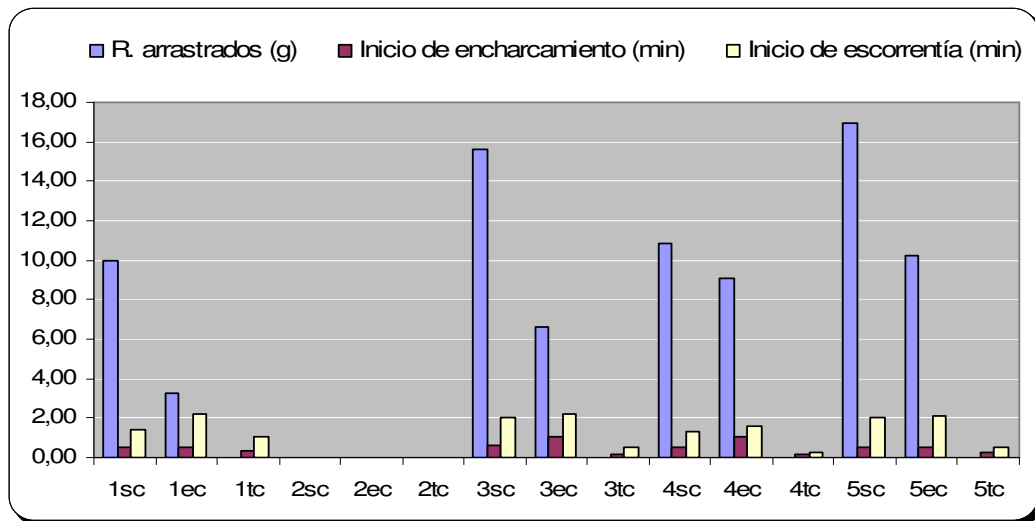


Figura 44. Comportamiento de los residuos arrastrados, inicio de encharcamiento y inicio de escorrentía en los tratamientos con costra.

4.2.1.4.3 EFECTO SOBRE LA TASA DE INFILTRACIÓN

Para analizar esta variable se determinó tanto la tasa de infiltración del suelo en condiciones de saturación con la ecuación de Philip (K_p), y con la ecuación de Horton (K). En los anexos IV.1 y IV.2 se pueden ver los resultados del ajuste a los valores reales de la infiltración, teniendo en cuenta las conclusiones de varios estudios realizados como el de Ibáñez (2001), que demuestran la eficacia de la regresión de Horton para la determinación de la tasa de infiltración en comparación a la de Kostiakov y Philip. Este último responde bien al comportamiento hídrico del suelo en los momentos iniciales de la precipitación pero al final no se estabiliza (anexo V). En el caso de la ecuación de Horton a pesar del mal ajuste al inicio, si ajustan bien en los momentos finales de la precipitación. Cuando el suelo está saturado. Gracias a esta ecuación se puede obtener de forma fiable la tasa constante de infiltración o K de conductividad hidráulica. Con estos resultados se hizo un análisis estadístico donde se observó (gráfica 45) que la tasa de infiltración (K), teniendo en cuenta el residuo vegetal, nos indica que los tratamientos “enterrados” registraron valores mayores en comparación con los tratamientos superficiales y testigo. Estos dos últimos tuvieron valores muy aproximados que rondaron los 50 a 60 mm/h en los tratamientos con suelo I, III, IV y V, y los resultados de los tratamientos con suelo II reflejan la gran capacidad de infiltración que tienen y que no fue necesario la presencia del residuo para aumentar la tasa de infiltración (K). En la figura 46 se ve que los tratamientos sin costra son los que alcanzaron valores máximos de tasa de infiltración (K) con aproximación a los 70 mm/h de media en los tratamientos con suelo I y IV y posteriormente los tratamientos con costra.

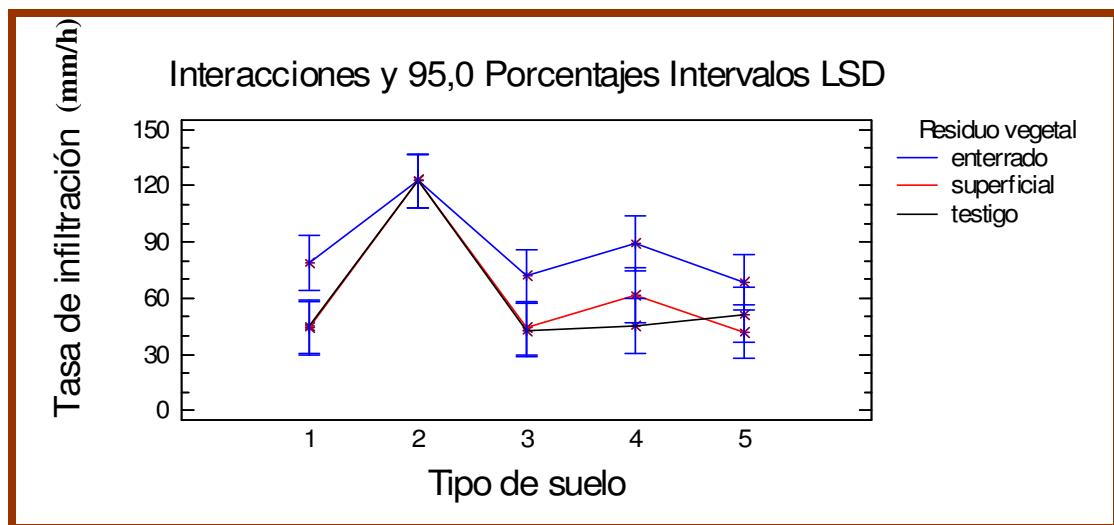


Figura 45. Variación de la tasa de infiltración en relación al tipo de suelo y residuo vegetal

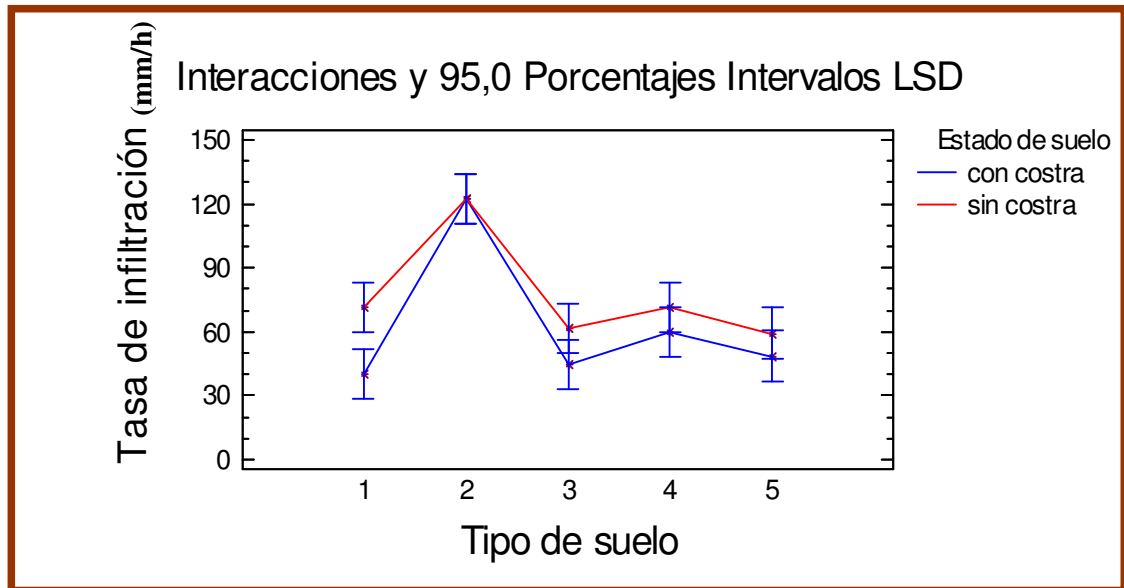


Figura 46. Variación de la tasa de infiltración en relación al tipo de suelo y estado de suelo

Según el análisis estadístico para comprobar la influencia de la cáscara de café sobre este parámetro, se puede constatar que los tratamientos “enterrados” se difieren significativamente a los tratamientos superficiales y testigo (tabla 36). Existen varios trabajos publicados donde hay evidencias del aumento de la tasa de infiltración (K) en relación a la presencia de restos vegetales superficialmente (Bernet et al., 1967; Poesen et al., 1990, Kamar 1994; Morgan 1997; Fagerstrom et al., 2002; Doring et al., 2005; Adekalu 2006). Franzluebbbers et al. (2002) señalan un aumentó de la infiltración mejorando la cantidades de materia orgánica en sus tratamientos. En este experimento al estar cubierto el suelo a un 80-85% y la presencia del residuo a una profundidad de hasta 5 cm. se propicia la ocurrencia de varios procesos físico-químicos y biológicos que favorecen la mejora de la estructura del suelo. No se observó diferencias significativas en los resultados de la tasa de infiltración (K) al analizar el tipo de suelo con excepción a los tratamientos con suelo II (tabla 36). Pero haciendo un análisis general de la influencia del factor estado de suelo sobre la infiltración, sí presentan diferencia significativas los tratamientos con costra (63,06 mm/h) en relacion a los tratamientos sin costra para (77,26 mm/h).

Tabla 36. Influencia de los parámetros evaluados (escorrentía, pérdida de suelo, tasa de infiltración) en todos los niveles de los factores estudiados

Factores	Niveles	Tasa de infiltración (mm/h)
Residuo vegetal	Superficial	62,90 a*
	Enterrado	86,19 b
	Testigo	61,40 a
Tipo de suelo	1	55,89 a
	2	122,57 b
	3	52,89 a
	4	65,52 a
	5	53,94 a
Estado de suelo	Con costra	63,06 a
	Sin costra	77,26 b

*Los valores con letras iguales no tienen diferencias significativas ($P \leq 0,05$)

En el análisis de varianza se notó más la influencia del efecto del residuo vegetal y el tipo de suelo que registraron diferencias al 99% en relación al estado del suelo con 95% de diferencias significativas (tabla 37). No se registro interacciones dobles en los tres casos.

Tabla 37. Análisis de varianza de la tasa de infiltración para estudiar los efectos y sus diferencias en varias interacciones

Efectos y interacciones	Cociente-F
Tipo de suelo	33,66**
Residuo vegetal	12,27**
Estado de suelo	9,61*
AB	1,16 ^{NS}
AC	1,25 ^{NS}
BC	1,47 ^{NS}

^{NS} indican que no hay diferencias, * hay diferencias significativa con $P \leq 0,05$ y ** hay diferencias significativa con $P \leq 0,01$,

4.2.1.5 ANÁLISIS DEL PROCESO DE HUMECTACIÓN- DESECACIÓN

4.2.1.5.1 HUMEDAD DEL SUELO

La humedad del suelo ha sido identificada como factor clave para la estructura, organización, dinámica y función de los ecosistemas Puigdefabregas et al. (1999); Heras et al. (2005) siendo un componente fundamental para la sobrevivencia de las plantas. El análisis de los resultados de la humedad se realizó teniendo en cuenta la cantidad de días durante los que el suelo permanece húmedo, con medidas a dos profundidades. En la gráfica 47 y 48 se puede ver que en los tratamientos “enterrados” y superficiales el suelo permaneció húmedo durante más tiempo, destacándose los tratamientos “superficiales” con suelo II y IV en relación a los tratamientos testigo que permanecieron un máximo de 13 días húmedos. Esta dinámica se observó en las dos profundidades (5 cm y 10 cm).

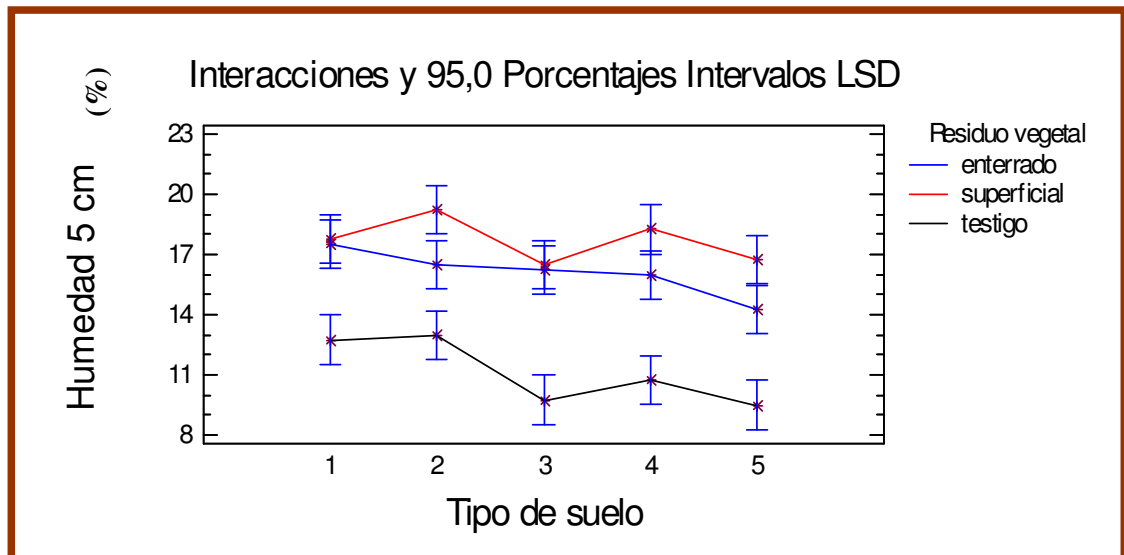


Figura 47. Variación de la humedad (5 cm) en relación al tipo de suelo y residuo vegetal

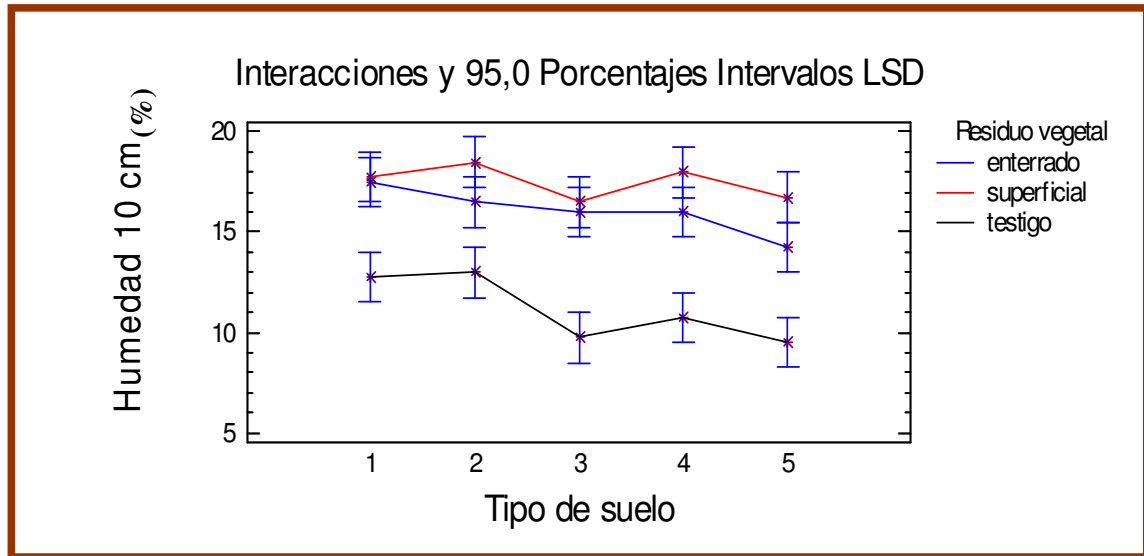


Figura 48. Variación de la humedad (10 cm) en relación al tipo de suelo y residuo vegetal

Los tratamientos con costra registraron más días húmedos en relación a los tratamientos sin costra en ambas profundidades (gráficas 49 y 50), en ellos los tratamientos con suelo I fueron los que máximos valores alcanzaron (20 días húmedos). Lo contrario sucedió en los tratamientos sin costra con variación de 11 a 13 días húmedos, destacándose el suelo I que conservó más humedad en todos los casos.

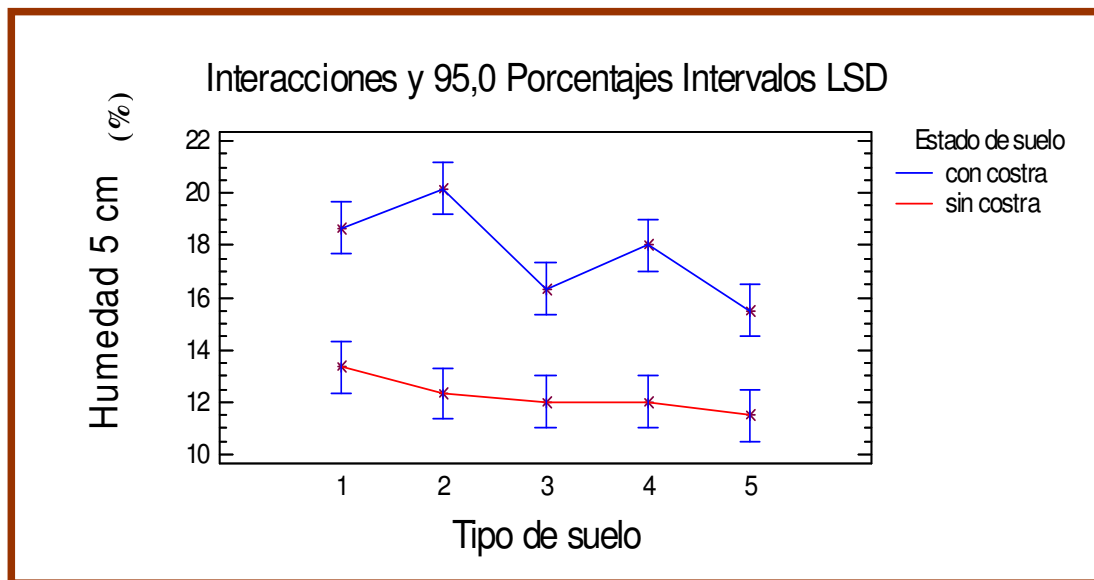


Figura 49. Variación de la humedad (10cm) en relación al tipo de suelo y estado de suelo

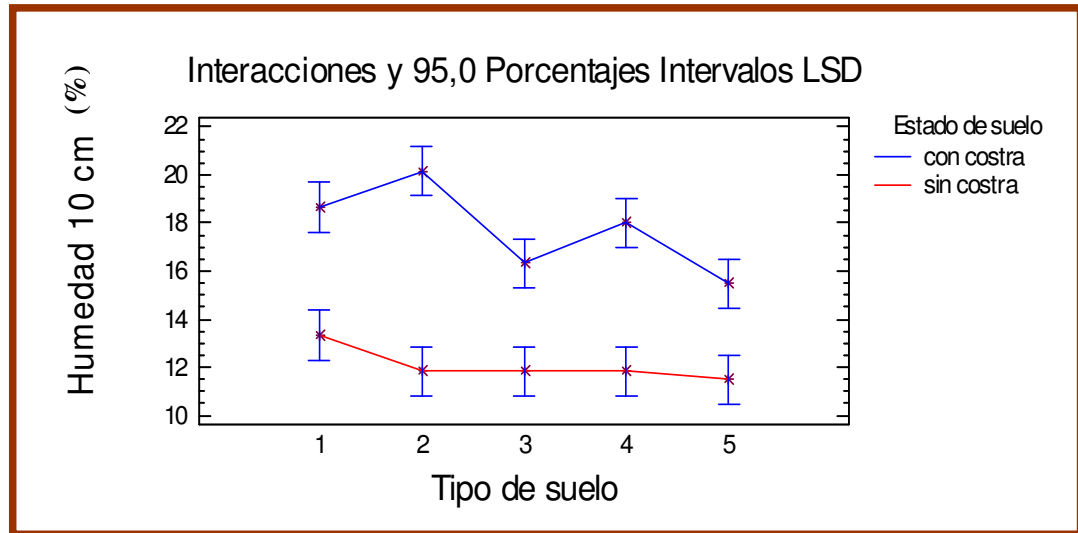


Figura 50. Variación de la humedad 10cm en relación al tipo de suelo y estado de suelo

Los valores de humedad (anexo VI y VII) en los tratamientos “enterrados” y superficiales estuvieron influenciados por la presencia del residuo vegetal. Varios experimentos fueron hechos como el de Mulumba y Lal (2008) que demuestran el incremento de la capacidad de retención de agua al utilizar residuo vegetal. Estos tratamientos permanecieron con mayor cantidad de días húmedo en relación al testigo en los dos casos (5 cm y 10 cm ver tabla 38). Los tratamientos con suelo I y II conservación la humedad en mayor cantidad de días en las dos profundidades esto se justifica por la clase textural de estos suelos. Según Harson et al. (2000) obtuvieron diferentes resultados al estudiar la influencia de la textura en la retención de la humedad del suelo. Estudios hechos por Ceballos y Fernández et al. (2002) concluyeron que la capacidad máxima de almacenamiento de agua depende del nivel de degradación de la superficie, reflejado en variables como la fracción textural limo-arcillosa y el contenido de materia orgánica. Ceballos et al. (2005) demostraron a través de sus resultados la incidencia directa de la textura sobre la capacidad de retención hídrica, la variabilidad espacial de la humedad en el conjunto de la zona y su distribución a lo largo del perfil. Aunque en este experimento no hubo diferencias significativas entre la profundidad 5 cm y 10 cm, siendo el poco margen de medición la razón de la escasa diferencia de la humedad en las dos profundidades. En los tratamientos con encostramiento la conservación de mayor cantidad de días húmedos fue notable en relación a los tratamientos sin costra (tabla 38). Esto se explica simplemente por el acto de humedecer previamente los tratamientos hasta la capacidad de campo antes de la simulación de lluvia y por la alta evaporación dentro del invernadero (223 mm/mes). Estos tratamientos al presentar pocos obstáculos en el proceso de evaporación desde las últimas profundidades hasta la superficie de las microparcels

por motivo del sellado, fue notable la presencia de valores elevados de humedad en las capas adyacentes a la camada superficial.

Tabla 38. Influencia de la humedad en todos los niveles de los factores estudiados

Factores	Niveles	Humedad 5cm (días)	Humedad 10 cm (días)**
Residuo vegetal	Superficial	17,7 a	17,5 a*
	Enterrado	16,1 a	16,05 a
	Testigo	11,15 b	11,15 b
Tipo de suelo	1	16,0 c	16,0 b
	2	16,25 c	16,0 b
	3	14,16 ab	14,083 a
	4	15,0 bc	14,916 ab
	5	13,5 a	13,5 a
Estado de suelo	Con costra	17,733 a	17,73 a
	Sin costra	12,233 b	12,06 b

*Los valores con letras iguales no tienen diferencias significativas ($P \leq 0,05$)

** Cantidad de días húmedos de los tratamientos

La tabla 39 nos muestra el resultado del análisis de varianza de los efectos simples y interacciones. En este análisis se puede observar que los tres efectos simples de las dos profundidades tuvieron diferencias al 99% excepto el efecto tipo de suelo en la profundidad de 10 cm que fue del 95% de diferencia significativa. Solamente hubo interacciones dobles en el residuo vegetal-estado de suelo en la profundidad de 5 cm.

Tabla 39. Análisis de varianza de la humedad para estudiar los efectos y sus diferencias en varias interacciones.

Efectos y interacciones	Cociente-F	
	Humedad 5cm	Humedad 10cm
Tipo de suelo	7,51 **	6,45 *
Residuo vegetal	106,01**	94,40 **
Estado de suelo	206,25**	205,33 **
AB	1,12 ^{NS}	0,88 ^{NS}
AC	3,18 ^{NS}	3,71 ^{NS}
BC	4,98 *	4,53 ^{NS}

^{NS} indican que no hay diferencias, * hay diferencias significativa con $P \leq 0,05$ y ** hay diferencias significativa con $P \leq 0,01$,

4.2.1.5.2 RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN

El análisis estadístico de la resistencia a la penetración se llevó a cabo ajustando la pendiente de la recta en las gráficas de la resistencia a la penetración. Puesto que la resistencia a la penetración se midió todos los días tras la lluvia hasta que el suelo se seco: la pendiente de la recta que relaciona el valor de la resistencia a la penetración con el tiempo nos indica la mayor o menor rapidez con que el suelo pierde sus buenas condiciones físicas. Un valor alto de la pendiente nos indica niveles mayores de resistencia a la penetración (anexo VIII). Los valores de este parámetro fueron inferiores en los tratamientos “enterrados” y superficiales, ambos tuvieron resultados muy aproximados con valores máximos en los tratamientos con suelo V superficial de 1,12 de pendiente. Los resultados de los tratamientos testigo se distanciaron un poco más a los dos casos anteriores, con excepción de los tratamientos en el suelo II que fue indiferente a la presencia del residuo vegetal. Al igual que los tratamientos superficial y “enterrado” los valores máximos de pendiente se obtuvieron en los tratamientos con suelo V rondando 1,69 (grafica 51). Los tratamientos con costra fueron los que más valores de resistencia a la penetración registraron, con valores máximos que rondaron los 1,34 de pendiente en todos los tipos de suelo con excepción en los tratamientos con suelo II donde no hubo influencia de la cáscara de café (grafica 52). La misma dinámica tuvo los tratamientos sin costra con máximas de 1,3 para los tratamientos con suelo V.

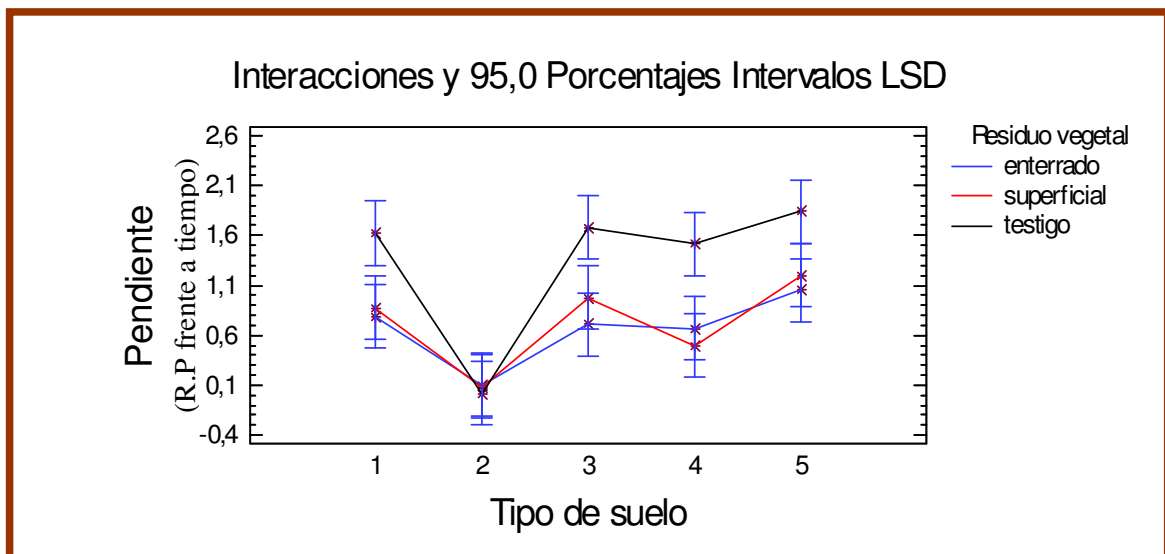


Figura 51. Variación de la resistencia a la penetración en relación al tipo de suelo y residuo vegetal

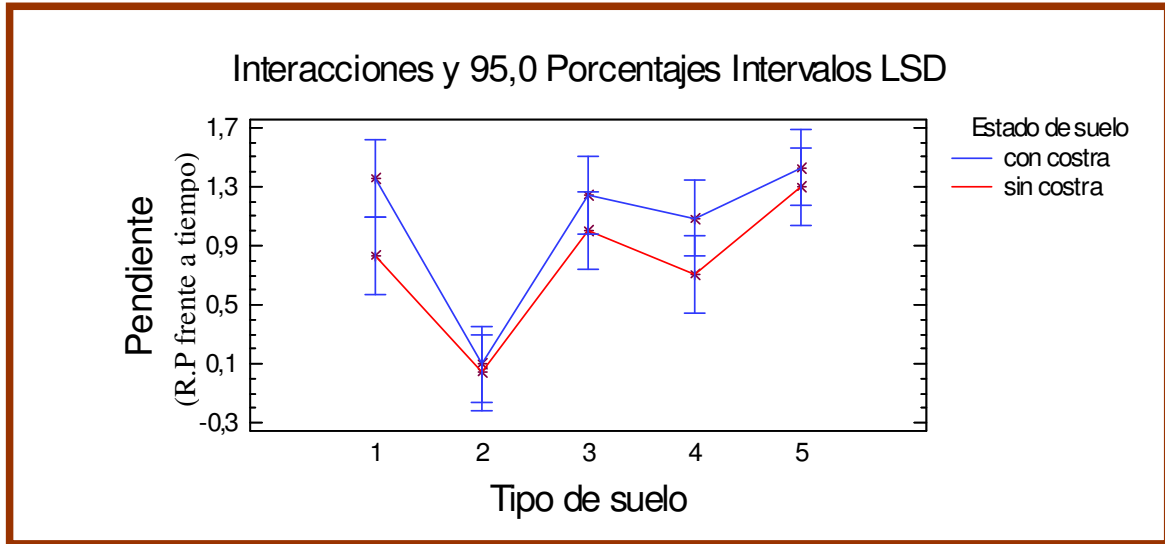


Figura 52. Variación de la resistencia a la penetración en relación al tipo de suelo y estado de suelo

Según Neave y Rayburg (2006) la cubierta de vegetación evita el incremento de la formación de sellado y costra impidiendo las condiciones propicias para la erosión y aumento de la resistencia del suelo. Además los valores de resistencia a la penetración obtenidas por ellos eran mayores en suelo desnudo que en otros tratamientos donde se utilizó cobertura. Resultados que coinciden con este experimento, donde se constató que los tratamientos con mayores pendientes fueron los testigos (1,33) y difieren significativamente en relación a los tratamientos superficiales (0,72) y “enterrado” (0,66) ambos no tuvieron diferencias significativas entre ellos (tabla 40). En general se constata el efecto del residuo vegetal en la reducción de la resistencia del suelo, aspecto muy importante en el crecimiento de las plantas como destacan varios autores como Stelluti et al. (1998); Baumhardt y Jones (2002) que obtuvieron resultados satisfactorios utilizando residuo vegetal para reducir la resistencia a la penetración. Los tratamientos con suelo II marcaron diferencias significativas en relación a los demás por su textura con valores de resistencia del suelo muy inferiores (0,66). Los tratamientos con costra obtuvieron valores mayores de resistencia a la penetración representado por la pendiente (1,04) y se diferenciaron significativamente en relación a los tratamientos sin costra con valores de 0,77.

Tabla 40. Influencia de la resistencia a la penetración en todos los niveles de los factores estudiados

Factores	Niveles	R. penetración (pendiente)**
Residuo vegetal	Superficial	0,7249 a*
	Enterrado	0,6653 a
	Testigo	1,3356 b
Tipo de suelo	1	1,0951 bc
	2	0,06733 a
	3	1,1215 bc
	4	0,89466 b
	5	1,36433 c
Estado de suelo	Con costra	1,04307 a
	Sin costra	0,77413 b

*Los valores con letras iguales no tienen diferencias significativas ($P \leq 0,05$)

** Estos valores representan la recta del ajuste de la pendiente en las gráficas de la resistencia a la penetración (Kg/cm^2).

El análisis estadístico realizado nos demuestra diferencias significativas al 95% los efectos residuo vegetal y estado de suelo si embargo el efecto tipo de suelo representa una confianza de 99%. Para esta variable no hubo interacción dobles en los tres casos.

Tabla 41. Análisis de varianza de la resistencia a la penetración para estudiar los efectos y sus diferencias en varias interacciones.

Efectos y interacciones	Cociente-F
Tipo de suelo	19,64 **
Residuo vegetal	18,10 *
Estado de suelo	7,13 *
AB	0,70 ^{NS}
AC	1,64 ^{NS}
BC	0,03 ^{NS}

^{NS} indican que no hay diferencias, * hay diferencias significativa con $P \leq 0,05$ y ** hay diferencias significativa con $P \leq 0,01$,

4.2.2 INFLUENCIA DE LAS TÉCNICAS DE CONSERVACIÓN

4.2.2.1 ANÁLISIS GENERAL DE LOS MÉTODOS DE APLICACIÓN DEL RESIDUO VEGETAL EN LAS VARIABLES ESTUDIADAS

La aplicación del residuo vegetal superficial es el método más conocido y aplicado por agricultores y campesinos en prácticas encaminados a lograr el mantenimiento de la capacidad productiva del suelo. Algunas de ellas son conocidas en la agricultura de conservación, precisamente en la técnica de siembra directa donde la presencia de la cobertura vegetal en la superficie del suelo es visible. Hay varios trabajos realizados para respaldar esta visión protectora y conservadora del suelo al emplear residuo vegetal como “mulch”. Según Singer and Shainberg (2004) las prácticas como “mulching”, preparación del suelo y utilización de mejoradores ayudan a prevenir la erosión y la formación de costra superficial.

Pero también hay que resaltar la aplicación del método “enterrado” realizada en el laboreo convencional con residuo incorporado, en el laboreo mínimo donde se prepara el lecho de siembra mediante una o dos labores superficiales y, en algunos casos, el pase de arado a una profundidad de 15 a 20 cm después de la cosecha en suelos con tendencia a la compactación. En este estudio nosotros fuimos concretos en observar exactamente la influencia de los dos métodos en varios parámetros evaluados en el experimento. En el análisis estadístico de las propiedades físicas del suelo vemos que al analizar el factor residuo sobre las variables estabilidad de los agregados, densidad aparente, conductividad hidráulica y porosidad se reflejan ventajas numéricas en la aplicación del método enterrado en relación al residuo superficial y el testigo.

Al analizar la influencia del residuo vegetal en las variables residuos arrastrados, el inicio del encharcamiento y el inicio de la escorrentía, vemos que los indicadores son positivos para los tratamientos con residuo vegetal “enterrado” (tabla 34). Ciertamente sólo la presencia del residuo en la profundidad del suelo crea condiciones favorables para mejorar las propiedades físicas del suelo contribuyendo así a una respuesta positiva ante los proceso de erosión (ver resumen estadístico anexo IX).

La misma tendencia se ve al analizar las gráficas de humedad y la resistencia a la penetración (anexo VI, VII y VIII). Los tratamientos “enterrados” conservaron mejor la

humedad, seguidamente los tratamientos superficiales y por último los testigos. En el anexo XI.1 y XI.2 se puede observar el desarrollo de la vegetación espontánea en los tratamientos 5 meses después de la simulación de lluvia en los suelos con costra y sin costra, apreciándose la germinación de la vegetación espontánea en algunas parcelas con suelo III y IV en los tratamientos sin costra con residuo superficial y “enterrado”. En el caso del testigo la presencia de vegetación fue nula. Este comportamiento está relacionado con la influencia positiva de la humedad, tipo de suelo y resistencia a la penetración. Según Gicheru et al. (2004) el efecto de “mulch” tiene poca importancia en la formación de costra cuando el mismo es incorporado dentro del suelo (laboreo mínimo). Sin embargo tiene un gran efecto en la conservación de la humedad, emergencia de las semillas y en el incremento de la infiltración. Este experimento viene a resaltar cuantitativamente la ventaja de este método corroborando con las conclusiones de este autor. La situación fue parecida al analizar la resistencia a la penetración, puesto que los valores fueron menores en los tratamientos “enterrados”. Estudios hechos por Mora et al. (2001) muestran valores de resistencia a la penetración menores en donde se aplicó labranza convencional con incorporación de residuo en relación a donde se aplicó labranza cero con residuo sobre la superficie. La misma tendencia fue observada en este experimento.

Además, los dos métodos son muy importantes en el aumento de la infiltración y en la reducción de la erosión, destacando diferencia el “enterrado”. Al aumentar la materia orgánica en las capas superficiales del suelo mejora de la estabilidad de los agregados del suelo y otras propiedades dando un impacto favorable sobre el medio ambiente. Abiven et al. (2007) demostró que los efectos biológicos que dan una buena estabilidad de los agregados al suelo dependen de la materia orgánica. El uso de la cobertura vegetal u orgánica es también reportado como un medio efectivo para prevenir la dispersión del suelo causada por el impacto de las lluvias (Smith et al., 1990).

En este experimento los dos métodos tuvieron un gran papel en la conservación de la humedad del suelo, destacando generalmente el “enterrado”. Ruiz et al. (2001) logró mayores rendimientos de cacahuete y maíz al proporcionar una mayor conservación de la humedad utilizando cañuela de maíz; Hernandez y Florentino (2004) tuvo resultados satisfactorio cuando utilizó canavalia (*Canavalia ensiformis*) como residuo vegetal; Bhatt y Khera (2005) lograron reducir la escorrentía y la pérdida de suelo de 5 a 40% , aumentar la humedad de 3 a 7% utilizando “mulch”; Adekalu et al. (2007) consiguió reducir la infiltración y la pérdida de suelo con la utilización de Bamboo (*Bambusa spp*) como “mulch”. Los resultados del experimento corroboran los obtenidos por estos autores.

5 CONCLUSIONES

- Aunque sea muy difícil crear todas las condiciones climáticas del trópico angoleño al cien por cien, las condiciones preparadas se aproximaron a las características climatología de una zona tropical.

- El suelo II franco arenoso demostró indiferencia a la incorporación del residuo, pues ninguna propiedad física de las que fueron analizadas mejoró significativamente tras los diferentes tratamientos.

- La cáscara de café fue efectiva en la mejora de la estabilidad de los agregados tanto durante los seis meses de la primera parte del experimento en tratamientos con suelo sin costra, como en los restantes seis meses de la segunda parte en tratamientos con costra. Pero los tratamientos sin costra tuvieron mayor influencia de la cáscara de café en relación a los tratamientos con costra. Los tratamientos “enterrados” tuvieron mejor respuesta en la formación de agregados estables en relación a los tratamientos superficiales.

- La mejora de la estabilidad de los agregados se tradujo en los valores de densidad aparente y porosidad del suelo.

Al analizar el efecto de la cáscara de café en la densidad aparente se puede concluir que los menores valores se corresponden con los tratamientos con residuo “enterrado”, estando los superficiales en segundo lugar. Los valores de densidad aparente fueron mayores en los tratamientos con costra. Exceptuando el suelo arenoso (suelo II) el efecto de la cáscara de café en los otros cuatro suelos fue positivo, aunque hubo variaciones de los resultados teniendo en cuenta sus características.

- En cuanto a la porosidad se alcanzaron mayores valores en los tratamientos con el residuo vegetal enterrado. El efecto de la cáscara de café se notó al mejorar la presencia de poros en los tratamientos sin encostramiento; la costra redujo la formación de poros en todos los casos pero los valores obtenidos fueron mejores en relación al testigo que no tenía residuo. Los demás suelos siempre mejoraron ante la incorporación de este residuo con el método del permeámetro, aunque los resultados fueron muy aproximados entre los tratamientos porque la costra solo representaba 10% de la porción de la muestra de suelo dentro del cilindro (suporte de la muestra en el permeámetro).

- Al analizar la conductividad hidráulica, los tratamientos enterrados obtuvieron resultados mas elevados tras la incorporación de la cáscara de café, algo que no ocurrió en los tratamientos superficiales. La cáscara de café también aumento la conductividad

hidráulica en los tratamientos sin costra y en menor medida en los tratamientos con costra. Este método no fue muy preciso para determinar la conductividad hidráulica en el suelo I y en los tratamientos enterrados sin costra.

- La cáscara de café redujo el volumen de escorrentía en mayor medida en los tratamientos enterrados, y luego en los tratamientos superficiales. El efecto del residuo fue mejor en los suelos sin costra.

- Las variables como los residuos arrastrados, el inicio del encharcamiento y el inicio de la escorrentía, presentan mejores resultados como respuesta a la incorporación de la cáscara de café en los tratamientos enterrados y posteriormente en los tratamientos con residuo superficial. En los tratamientos con costra se registró una mayor cantidad de residuos arrastrados, y el tiempo de inicio de encharcamiento y el tiempo de inicio de escorrentía fueron menores en relación a los tratamientos sin costra.

- La influencia de la casca de café en los resultados de la pérdida de suelo fueron muy valiosos al reducirse esta en el 89% en los tratamientos “enterrados” y en el 78% en los tratamientos superficiales. La presencia del residuo vegetal redujo satisfactoriamente la pérdida de suelo en los tratamientos con costra y sin costra, a excepción de los tratamientos con suelo I donde las pérdidas de suelo fueron mayores en tratamientos con costra.

- Se comprobó una vez más la eficiencia de la utilización de la ecuación de regresión de Horton para estimar la tasa de infiltración en comparación a la de Philip.

- El posicionamiento del residuo facilitó la absorción directa de la lluvia caída. La presencia de la cáscara de café aumentó considerablemente la tasa de infiltración en los tratamientos con residuo “enterrados” en comparación con los tratamientos con residuo superficial. Los tratamientos con costra registraron valores inferiores de infiltración con respecto a tratamientos sin costra.

- A través del estudio del balance hídrico que se realizó se pudo concluir que los tratamientos con residuo vegetal “enterrado” y superficial conservaron mejor la humedad del suelo en relación a los testigos en las dos profundidades (5 y 10 cm). Los suelos con presencia de encostramiento conservaron más humedad en relación a los tratamientos sin costra, este comportamiento se debe al humedecimiento previo y a altos valores de evaporación.

- La incorporación de la cáscara de café hizo reducir la resistencia a la penetración principalmente en los tratamientos “enterrado”. La cáscara de café redujo la resistencia a la penetración en los tratamientos con costra comparando con los tratamientos testigo.

Se recomienda la utilización de la cáscara de café en diferentes tipos de suelo. De esta forma contribuiría significativamente a la mejora de la estructura del suelo, a combatir a la degradación de zonas afectadas y en la mejora y almacenamiento de agua, disminuyéndose las pérdidas por escorrentía y por evaporación directa. Sería una opción interesante para bioreciclar cantidades considerables de este subproducto que normalmente se quema, contaminando el medio ambiente por las emisiones de CO₂ y la precipitación de sales inorgánicas como nitratos en las aguas subterráneas. Se recomienda hacer estudios de su capacidad de aportación química para la fertilidad del suelo. Quizá sería una vía de mantener o aumentar la fertilidad de las tierras cultivadas de café. Con la utilización del procesamiento en secado (apartado 1.2.3) y el reciclaje de este residuo vegetal al suelo, convertiría este proceso totalmente ecológico.

También se recomienda el posicionamiento del residuo vegetal en el suelo de forma enterrado, como una alternativa para evitar la degradación acelerada de los suelos expuestos a bajas cantidades de materia orgánica. Además esta medida favorecería la reducción de la resistencia a la penetración en estos suelos, un aspecto imprescindible para la emergencia de las plantas en comparación al método tradicional superficial.

6 BIBLIOGRAFÍAS

Abiven, S; Menasseri, D; Angers, D. A. and Leterme, P. 2007. Dynamics of aggregate stability and biological binding agents during decomposition of organic materials. *European Journal of Soil Science*. 58: 239-247.

Adekalu, K.O., Olorunfemi, I.A., Osunbitan, J.A. 2007. Grass mulching effect on infiltration, surface runoff and soil loss of three agricultural soils in Nigeria. *Bioresource technology* 98: 912-917.

Agassi, M; Morin, J. and Shainberg, I. 1985. Effect of raindrop impact energy and water salinity on infiltration rates of sodic soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:186-190.

Ahmad, N. 1983. Vertisoles. *In*: L.P. Wilding, N.E. Smeck, G.F. Hall (eds.). *Pedogenesis and Soil Taxonomy*. II.

Alan, W; Russell, E.J. 2000. condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell. *Technology & Engineering*. Ed. Mundi. Pp.921.

Al-Durrah, M.M; Bradford, J.M. 1981. New methods of studying soil detachment due to waterdrop impact. *Soil Sci. Soc. Am. J.* , 45. PP. 945-953.

Alonso, F.P., Wondafrash, T.T., Arias, J.S., Martínez, F.S.J., Martín, M.A.M. y Serrano, R.E. 2003. Relación entre la tendencia al encostramiento superficial y el porcentaje de agregados estables en suelos de la comunidad de Madrid. *Edafología*. 10(3): 145-152.

Aloui, A., Helbling, A. 2006. Evaluation of soil compactation using hydrodynamic water content variation: comparison between compacted and non compacted soil. *Geoderma*. 134, 97-108.

Álvaro, A., y Forsythe, W. 2005. Variación de la densidad aparente en ordenes de suelos de costa rica. *Agronomía costarricense* 29(1): 85-94. ISSN: 0377-9424

Ambar, S., Wiersum, K.F. 1980. Comparison of different erodibility indices under various soil and land use conditions in west Java. *Indonesian journal of Geography* 10(39): 1-15.

Antonio, R.P.R., y Madeira, M. 2006. O aluminio nos solos de Angola. Angola, Agricultura, Recursos naturais, Desenvolvimento Rural. I Volume. ISA press. 121 p.

Araki, T.; Gitano, M. and Eguchi, H. 2000. Dynamics of fruit growth and photoassimilate translocation in tomato plant under controlled environment. *Acta horticulturae* 534. ISHS. 85-92.

Awadhwal, N.K., y Thierstein, G.E. 1985. Soil crust and as impact on crop establishment: A review. *Soil & Tillage Research*, 5:289-302.

Azevedo, A.L., Refega, A.G., Sousa, E.A., Portas, C.M., Vilhena, M.L., Marquez, M.M., De Sá, V.H. 1972. Caracterizacion sumaria das condições ambientais de Angola. 105 pp.

Bachinger, J., Zander, P. 2006. ROTOR, a tool for generating and evaluation crop rotations for organic farming systems. *European Journal of Agronomy* 26(2), 130-143.

Barral, M. T. ; Arias, M.; Guérif, J. 1998. Effects of iron and organic matter on the porosity and structural stability of soil aggregates. *Soil and Tillage Research*, 46 (3-4): 261-272.

Basahi, J.M., Kenimer, A.L., Fipps, G., Sabbagh, G.J. 1998. The effect of droplet impact energy produced by sprinkler system on soil erosion, runoff and infiltration rate. ASAE. Paper 98-2060.

Bathke, G. R; Cassel, D. K; Hargrove, W. L. and Porter, P. M.1992. Subsurface compaction reduces the root and shoot growth and grain yield of wheat. *Soil Science*. 154: 316-328.

Baumhardt, R. L. y Jones, O. R. 2002. Residue Management and paratillage effects on some soil properties and rain infiltration. *Soil & Tillage*. 65: 19-27.

Baver, L.D., Gardner, R.W. and Gardner, R.W. 1991. Física de suelo. UTEHA. Noriega editores, 529 p.

Becher, H.H., Breuer, J., Klingler, B. 1997. An index value for characterizing hardsetting soils by fall-cone penetration. *Soil Technology*, 10 (1): 47-56.

Bedaiwy, M. N. A. 2008. Mechanical and hydraulic resistance relations in crust-topped soils. *Catena*. 72: 270-281.

Bedaiwy, M.N.A. (2008). Mechanical and hydraulic resistance relations in crust-topped soils. *Catena*. 72: 270-281.

Beemster, G.T.S., Masle, J., 1996. Effects of soil resistance to root penetration on leaf expansion in wheat (*Triticum aestivum* L.): composition, number and size of epidermal cells in mature blades. *J. Exp. Bot. (United Kingdom)* 47 (304), 1651-1662.

Bengough, A.g., Mullins, C.E. 1990.Mechanical impedance to root growth: a review of experiment techniques and root growth responses. *J. Soil Sci.* 41, 341-358.

Benoit, G.R., Kirkham, D. 1963. The effect of soil surface conditions on evaporation of soil water. *Soil Science Society of America proceeding* 27, 495-498.

Bernett, A.P., Disketer, E.G., Richardson, E.C., 1967. Evaluation of mulching methods for erosion control on newly prepared and seeded highway backslope. *Agronomy Journal* 59, 83-85.

Best, A.C. 1950. Empirical formulace for the terminal velocity of waterdrops falling through the atmosphere. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*,76: 302.

Bhatt, R. y Khera, K. L. 2006. Effect of tillage and mode of straw mulch application on soil erosion in the submontaneous tract of Punjab, India. *Soil & Tillage Research*. 88: 107-115.

Bolline, A. 1977. La vitesse de l'érosion sous culture en région limoneuse. *Pedologie* 27: 191-206.

Bonneu, M., Souchier, B. 1978. Edafología, n.2. Constituyentes y propiedades del suelo. Ensamblaje y organización física de las partículas, Editorial Masson. 232-250.

Breland T.A., Hansen S. 1996. Nitrogen mineralization and microbial biomass as affected by soil compaction. *Soil Biology & biochemistry*. Amsterdam, Netherlands. Ed. Elsevier. V28, N° 4. Pp. 665-663.

Bressani, R., Estrada, E., Jarquín, R. 1972. Pulpa y pergamino de café. I. composición química y contenido de aminoácidos de la proteína de la pulpa. Turrialba (Costa Rica) 22. 299-304.

Bressani. R. 1978. Subproductos del fruto del café. Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá (INCAP). Guatemala.

Bresson, M.L.y Boiffin. 1990. Morphological characterization of soil crust development on an experimental field. *Geoderma*. 47: 301-325.

Brodie, I.M; Misra, R.K. 2008. Evaluation of Greenwaste Mulch to control Runoff quality from landfill sites during frequent storms. *Water Air Soil Pollut*. 201:75-85.

Bryan, R.B., Poesen, J. 1989. Laboratory experiments on the influence of slope length on runoff, percolation and rill development. *Earth Surface Processes and Landforms*, 14: 211-231.

- Buckman, H.O. y N.Y. Brady .1991. Naturaleza y propiedades de los suelos. Ed. UTEHA. México, D.F.
- Calegari, A. 1989. Cobertura morta. En: Secretaria da Agricultura e do Abastecimento. Paraná. Manual Técnico do Subprograma de Manejo e Conservação do Solo. Curitiba. pp. 212-17.
- Calvo, A.; Gisbert, J.M.; Palau, E.; Romero, R. 1988. Un simulador de lluvia portátil de fácil construcción. «Métodos y técnicas para la medición de procesos geomorfológicos». Sala, M. - Gallart, F. (Ed.). Sociedad Española de Geomorfología. Monografía, 1: 6-15.
- Calvo, A. 2007. Simulador de lluvia. Ejemplo practico de aplicación. «Curso de conservación de suelos. Indicadores de la degradación: suelo, clima y vegetación». (Ed.). Escuela Superior Técnica del Medio Rural y Enología. Pp. 408-421.
- Carpena, R. M., Rodriguez, A. R. 2005. Hidrología agroforestal. Mundi-Prensa. 348 p.
- Carrara, M., Castrignano, A., Comparetti, A., Febo, P., Orlando, S., 2007. Mapping of penetrometer resistance in relation to tractor traffic using multivariate geostatistics. Geoderma, 142: 294-307.
- Ceballos, B. A. y Martinez, F. J. 2002. Dinámica de la humedad de las formaciones superficiales en unidades espaciales representativas de ecosistemas adhesionados. Rev. C. & G., 16 (1-4), 33-42.
- Cecilio, P.T. 2007. Comprensibilidad y resistencia al corte de los suelos salinizados y sodificados por irrigacion. Tesis doctoral
- Celis, W., y Soto, W., 2005. Biodiversidad y medio ambiente. Anuario N°28 ISSN 1316-5852, pp. 185-230.

Cerballos, A., Martínez-Fernández, J., Hernández, S.V., Morán, T.C., y Casado, L. 2005. Variabilidad espacio-temporal de la humedad del suelo en el sector semiárido de la cuenca del Duero (España). *Rev. C & G.*, 19 (3-4), 63-77.

Cerdá, A. 1994. Comportamiento hidrológico de los suelos sobre areniscas. Serra de la Calderota, Valencia. *Cuaternario y Geomorfología*. 8(3-4) 3-21 pp.

Cerdá, A. 1997: Distribución de la humedad del suelo en las cárcavas del sur del país valenciano. *Cuadernos de geografía*, 61: 1-13.

Cerda, A., Ibáñez, S., Calvo, A. 1997. Design and operation of a small and portable rainfall simulator for rugged terrain. *Soil Technology*, 11 (2): 161-168.

Cerda, A. 1998. El clima y el hombre como factores de la estabilidad estructural del suelo. Un estudio a lo largo de gradientes climático-altitudinales. *Cuaternario y Geomorfología*, 12 (3-4): 3-14.

Cerisola, I. C., García, M.G., Filgueira, R.R. 2005. Distribución de la porosidad de un suelo franco arcilloso (alfisol) en condiciones semiáridas después de 15 años bajo siembra directa. *Ciencia de suelo*. 23 (2) 167-178.

Chen, Y., Tarchitzkv, J., Brouwer, J., Morin, J. y Banim, A. 1980. Scanning electron microscope observations on soil crusts and their formation. *Soil Science* 130: 49-55.

Chidichimo, H.O., y Asborn, D.M. 2000. Influencia de la humedad y la temperatura del suelo sobre el crecimiento del trigo en dos sistemas de labranza. *Revista Brasileira de agrometeorología*. Pp. 69-75.

Chisci, G., Zanchi, C. 1981. The influence of different tillage systems and different crops on soil losses on hilly silty-clayey soil. In RPC Morgan (ed.), *Soil conservation: problems and prospects*. Chichester, Wiley: 211-17.

- Christiansen, J.E. 1942. Irrigation by Sprinkling. California Agric.Exp.Sta. Bul.670 Berkeley, Universidad de California, USA. 124 pp.
- Claverie, J., Balbuena, R., Terminiello, A., Casado, J., Manghi, E., y Jorajuria, D. 2000. Compactación inducida por el tráfico de maquinas en suelo forestal. Revista brasilera de ingeniería agrícola e ambiente. 4(2):286-289.
- Cobertera, E. 1993. Edafología aplicada. Suelos producción agraria, Planificación territorial e impactos ambientales. Ediciones Cátedra, Pp. 326.
- Coelho, M.B., Mateos, L., Villalobos, F.J. 2000. Influence of a compacted loam subsoil layer on growth and yield of irrigated cotton in southern Spain. Soil Till. Res. 57, 129-142.
- Cuadrat, J.M; Pita, F.M. 1997. Climatología . Catedra geografia. Pp 91.
- De Koning, A.M. 1988. The effect of different day/nigth temperature regimes on growth, development and yield of glasshouse tomatoes. Journal of Horticultural Science.63 (3) 465-471.
- De la Rosa, D. 2008. Evaluación Agroecológica de suelos. Para un desarrollo rural sostenible. Mundi prensa. 404 pp.
- De la Rosa; Diaz-pereira, E; Mayol, F; Czyz, E. A; Dexter, A. R. Dumitru, E; Enache, R; Fleige, H; Horn, R; Rajkay, K. y Simota, C. 2005. Part 2. Soil erosion as a funtion of soil type and agricultural Management in a Sevilla olive area, southern Spain. SIDASS Project. Soil & Tillage. 82: 19-28.
- De León, G.F., Payán, Z.F., Sanchez, R. 1998. Localización de capas compactadas en el perfil del suelo mediante penetrometria. Terra. Vol.16, N°4. Pp. 303-307.

Delgado Iniesta, M.J.; Belmonte Serrato, F.; López Bermúdez, F. 2000. Relaciones entre la estabilidad de los agregados y propiedades físicas y químicas de los suelos en un ambiente semiárido. *Cuaternario y Geomorfología*, 14(1-2): 35-45.

Delta-t Devices Corporation, 1999. Theta Probe soil moisture sensor type ML2x. User Manual ML2x-UM-1.21. 21pp.

Delta-t Devices Corporation, 2005. User manual for wet sensor type wet-2. Version 1.3 42 pp.

Dexter, A. R; Czyz, E. A; Gate, O. P. 2004. Soil struture and the saturated hydraulic conductivity of subsoils. *Soil & Tillage*. 79:185-189.

Dexter, A.R., Czyz, E.A., Richard, G., Reszkowska, A. 2008. A user-friendly water retention function that takes account of the textural and structural pore spaces in soil. *Geoderma*.143: 243-253.

Diaz, E; Duarte, O. J; Cerana, J; Forntanini. 2003. Ajuste metodológico en la medición de la conductividad hidráulica saturada “in situ” en suelos vertisoles y entisoles de la Republica Argentina mediante el permeámetro de Guelph. Estudio de la zona no saturada del suelo. Vol. VI. Álvarez-Benedí, J y Marinero, P. 2003. Pág. 53-157.

Ding, G., Liu, X., Herbert, S., Novak, J., Dula, A. y Xing, B. 2005. Effect of cover crop management on soil organic matter. *Geoderma*. Article in Press.

Diniz, C.A., 1998. Angola o meio fisico e potencialidades agrárias. Instituto da cooperação portuguesa. Pp. 30-55.

Dogliotti, S., Rossing, W.A.H. van Ittersum, M.K. 2003. ROTAT, a tool for systematically generating crop rotations. *European Journal of Agronomy* 19(2), 239-250.

Domínguez, J., Ressia, J.M., Jorajuría, D., Balbuena, R., Mendivil, G. 2000. Reología del suelo bajo tres diferentes tratamientos mecánicos. *Avances en Ingeniería Agrícola. II Congreso Americano de Ingeniería Agrícola*: 110-115.

Doring, T.F., Brandt, M., Heb, J., Finckh, M.R., Saucke, H. 2005. Effects of straw on soil nitrate dynamics, weeds, and yield and soil erosion in organically grown potatoes. *Field Crops Research*. 94: 238-249.

Draghi, L.M., 2000. Compactación del suelo del huerto frutal bajo diferentes intensidades de tráfico. Tesis doctoral. Universidad politécnica de valencia. Pp.1-135.

Dregne, H.E., El Baz, F. and Hassan, M.A. 1986. Desertification of arid lands. In *physics of desertification*. Dordrecht, the Netherlands: Martinus, Nijhoff.

Duarte, G. 2002. Sistemas de producción de girasol en la región húmeda argentina. En: *Manual practico para el cultivo de girasol*. Díaz-Zorita M. y Duarte G. (Eds.). 313 p.

Edith Olson, 2001. *Introduction to Soils and Soil Resources, Soil Air and Soil Organic Matter*, Faculty of Extension. University of Alberta. 77 p.

Ekwe, E.I. 1990. Effect of organic matter on splash detachment and the processes involved. *Earth Surface Processes and Landforms*, 15: 175-181.

El Swaify, S.A., Danger, E.W., Armstrong, C.L. 1982. Soil erosion by water in the tropics. College of Tropical agriculture and human resources, University of Hawaii. Pp.150-168.

Elías, L.G. 1978. Composición química de la pulpa del café y otros subproductos. División de Ciencias Agrícolas y de Alimentos, Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá (INCAP). Guatemala.

Elissondo, E., Costa, J. L., Suero, E., Fabrizzzi, K. P., y García, F. 2001. Evaluación de algunas propiedades físicas de suelos luego de la introducción de labranzas verticales en un suelo bajo siembra directa. *Ciencia del suelo*. 19: 11-19.

Ellis, F.B., Elliot, J.G., Pollard, F., Cannell, R.Q. y Barnes, B.T. 1979. Comparison of direct drilling reduced cultivation and ploughing on the growth of cereals. *J. Agric. Sci., Camb.* 93:391-401.

Emerson, W.W. 1967. A classification of soil aggregate based on their coherence in water. *Australian Journal of Soil Research* 5: 47-57.

Entin, J.K., Robock, A., Vinnikov, K.Y., Hollinger, S.E., Liu, S y Namkhai, A. 2000. Temporal and spatial scales of observed soil moisture variations in the extratropics. *J. Geophys. Res.* 105: 11865-11877

Escrich Beltran, A., 2000. Curvas características de desagregación de muestras de suelos: obtención de un índice de estabilidad de agregados basado en la utilización de Ultrasonidos. Trabajo fin de carrera. Universidad politécnica de valencia. Pp. 1-20.

European environment agency. 1998. El medio ambiente en Europa: segunda evaluación. Degradación de suelos. Capítulo 11. Pp. 231-232.

Evangelou, V.P. y McDaniel, P.A. 1998. *Environment soil and Water Chemistry*. John Wiley & Sons, Inc. 564 p.

Evans, R. 1980. Mecanismos de la erosión hídrica y sus controles espaciales y temporales: un punto de vista empírico. "Erosión de suelos." Kirkby, M.J. - Morgan, R.C.Ed. Limusa, 375 p.

Fagerstrom, M.H., Nilsson, S.I., van Noordwijk, M., Phien, T., Olsson, M., Hansson, A., Svensson, C. 2002. Does *Tephrosia candida* as fallow species, hedgerow or mulch improve nutrient cycling and prevent nutrient losses by erosion on slopes in northern Viet Nam? *Agriculture Ecosystems & Environment*. 90: 291-304.

FAO. 1983. Guidelines land evaluation for rainfed agriculture. Soil Bull 52. FAO, Roma, 122 p.

FAO. 2000. Manual on integrated soil management and conservation practices. Soil and Water Bulletins. Rome, Italy. 230 p.

FAO. 2002. Agricultura de conservación. Estudio de casos en América Latina y África. Boletín de suelos de la FAO, 78. 74 p.

FAO. 2004. Desarrollo de la siembra directa en el Brasil tropical. La historia de las actividades exitosas de una ONG. Boletín de los servicios agrícolas de la FAO, 147. 67 p.

Fayolle, C. 1991. Analyse de terre: mesurez votre potentiel. Cultivar 289 pp. 66-67.

Feliu, J.A., y Gueorguéva, R.I. 2005. La degradación y desertificación de los suelos de España. Guías técnicas de energía y medio ambiente. Gas natural fundación. Pp.175-177.

Fernández, J.M., Barbancho, A.C., Ledesma, S.C., y Tejeda, M. 2003. Estabilidad temporal de la humedad edáfica bajo diferentes condiciones ambientales mediterráneas y de uso del suelo. En: Álvarez-Benedí, J y Marinero, P. (eds). Estudios de la Zona No Saturada del Suelo, Vol. VI. 2003.

Fernández, R., Funaro, D. y Quiroga, A. 2005. Influencia de cultivos de cobertura en el aporte de residuos, balance de agua y contenido de nitratos. Boletín de divulgación técnica N° 87. Aspectos del manejo de los suelos en sistemas mixtos de las regiones semiáridas y subhúmeda Pampeana.

Ferreras, L.A., Costa, J.L., García, F.O. 1999. Temperatura y contenido hídrico del suelo en superficie durante el cultivo de trigo bajo dos sistemas de labranza. Ciencia del suelo. 17(2). Pp.39-45.

Filho, C.C; Lorenço, A; Guimaraes, M. F; Fonseca, I.C.B. 2002. Aggregate stability under different soil management Systems in a red latosol in state of Parana, Brazil. *Soil & tillage research* 65:45-51.

Fisk, J., Hesterman, O., Shrestha, A., Kells, J., Harwood, R., Squire, J. y Sheaffe, C. 2001. Weed Suppression by Annual Legume Cover Crops in No-Tillage Corn *Agronomy Journal* 93: 319-325.

Forsythe W., Diaz-Romeu, R. 1969. La densidad aparente del suelo y la interpretación de análisis de laboratorio para el campo. *Turrialba* 19(1): 128-131.

Franzluebbers, A. J. 2002. water infiltration and struture related to organic matter and its stratification with depth. *Soil & Tillage*. 66:197-205.

Frenkel, H.; Goerzen, J.O. 1978. Effects of clay type and content, exchangeable sodium percentage, and electrolyte concentration on clay dispersion and soil hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol.42, 1978.

Gamiño, M.A.M., y Walthall, P.M. 2000.Cambios morfologicos durante el enconstramiento de la superficie en suelos de México y Louisiana, EU. *Terra latinoamericana*. 18(3): 187-197.

García, L. G; Rivero, A. M; Folgueras, C. A; Modino, M. D; Rabanal, N. G; Fanjul, A. P. 2005. Aplicación del Protocolo de Kioto para Castilla y León. 461 pp.

Gardner, W. H. 1986. Water content. En A. Klute (ed): *Methods of soil analysis*. Part I. Monograph 9. Am. Soc. Agronomy. Madison, W. I: 493-544.

Gaskin, G.J., Millar, J.D., 1996. Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring technique. *J.Agric. Engng Res*. 63, 160-163.

Gavande, S. 1973. Física de suelos. Principios y aplicaciones. México. Ed Limusa-Willey S.A. 351 p.

Gerke, H.H. and Kohne, J.M. 2002. Estimating hydraulic properties of soil aggregate skins from sorptivity and water retention. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 26-36.

Gicheru, P; Charles, G; Joseph, M. y Edward, M. 2004. Effects of soil management practices and tillage Systems on surface soil water conservation and crust formation on a Sandy loam in semi-arid Kenya. *Soil & Tillage Research.* 75:173-184.

Gill, R. y Vanden Gerg, G.E. 1967. Soil dynamics in tillage and traction. USDA, Agr. Res. Ser., Agriculture Handbook n° 316.

Gil, R.; Bragachini, M., Bongiovanni, R., Bonetto, L. 1993. Capitulo de compactación del suelo de la obra “sistemas de traslado de equipos de cosecha para reducir la compactación”. Proyecto PROPECO, Pp. 9-39.

Gisbert, J.M. 2002. Taxonomía de suelos. Soil taxonomy -99. Universidad Politecnica de Valencia. 392 pp.

Gómez Plaza, A. 2000. Variabilidad espacio-temporal del contenido de humedad del suelo en una zona mediterránea semiárida. Efectos de las condiciones antecedentes en la respuesta hidrológica. Tesis Doctoral. ETSI de Montes. Madrid 185 p.

González, O. J.; Ibarra, E.; Rangel N. J.; Y Auvinet, G. 2004. Caracterización geotécnica superficial mediante ensayos con cono dinámico manual. Instituto de Ingeniería, UNAM (artículo). 7p.

Govaerts, B., Sayre, K.D., Deckers, J. 2006. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil Tillage Res.* 87, 163-174.

Grant, H.F., Izaurralde, R.C., Chanasyk, D.S. 1995. Soil temperature under different surface managements: Testing a simulation model. *Agricultural and Forest Meteorology.* Ámsterdam, Netherlands, v. 73, n.1-2. Pp.89-113.

Grassis, C.J., 1987. Diseño y operaciones del riego por superficie. CIDIAT. Mérida, Venezuela. 415pp.

Groenevelt, P.H., Van straatén, P., Rasiah, V., Simpson, J., 1989. Modifications in evaporation by rock mulches. *Soil Technology* 2, 279-285.

Gudelj, O., y Masiero, B. 2000. Efecto del manejo del suelo sobre su estabilidad estructural. XVII congreso Argentino de la ciencia del suelo. Mar del Plata. Abril 2000.

Gutiérrez, M. M; Ordaz, V. C; Castellanos, J. Z; Santelises, A. A. Gavi, F; Volke, V. H. 2001. Sistemas de labranza y sus efectos en algunas propiedades físicas en un vertisol, después de cuatro años de manejo. *Terra latinoamericana*. Vol. 19. 1: 67-74.

Hakansson, I., Lipiec, J. 2000. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Sol Til. Res.* 53, 71-85.

Hanson, B. R; Orloff, S. and Peters, D. 2000. Monitoring soil moisture helps refine irrigation management. *California agriculture*. V.54:3 38-42 pp.

Heras, M; Nicolau, J. M y Espigares, T. 2005. Interacción entre la erosión en regueros, contenido de humedad edáfica y colonización vegetal en laderas restauradas de la minería a cielo abierto del carbón en ambiente mediterráneo-continental (Teruel). Samper, C. F. J; Paz G. A. Vol. VII. 345-350.

Hernandez, C. y Florentino, A. 2004. Evaluación de dos tipos de cobertura en suelos cultivados con Piña (*Ananas comosus L. Merr*) en el estado Lara, bajo lluvia simulada, en condiciones de invernadero. *Rev. Fac. Agron. (LUZ)*. 21 Supl. 1:228-236.

Hernandez, L.F., Orioli, G.A., Paolini, P.J. 1994. Ritmo de germinación en cinco genotipos de trigo. Efecto de la temperatura. AIAMBA. Departamento de agronomía., Univ. Nac. del sur. Pp. 3-4.

Herrero, B.J., Jose, J. y Luís, R.J.1994. En impacto de las técnicas forestales de repoblación sobre los procesos erosivos y la fertilidad de los suelos en condiciones ambientales mediterráneas.

Hillel, D. 1980. Fundamentals of soil physics. Academic press, New York. 385 p.

Hillel, D.1982. Introduction to soil physics. New York, academic. Press. 413 p.

Hoogmoed W.B., 1999. Tillage for soil and water conservation in the semiarid tropics. Wageningen University, the Netherlands. 184 p.

Hudson, N.W.1964. A Review of artificial rainfall simulators. Research Bulletin 7, Department of Conservation and Extension, Zimbabwe 301 pp.

Hudson, N.W. 1965. The influence of rainfall on the mechanics of soil erosion with particular reference to southern Rhodesia. MSc Thesis, University of Cape Town.

Hudson, N. W. 1981. Soil Conservation. Batsford Academic and Educational Ltd 324 pp.

Hudson, N.W. 1991. Reasons for success and failure of soil conservation projects. FAO soil Bulletin 64.

Hudson N.W. 1997. Simuladores de lluvia. In Medición sobre el Terreno de la Erosión del Suelo y de la Escorrentía. Boletín de Suelos de la FAO – 68.

I.G.A.C. (Instituto Geológico “Agustín Codazzi”). 1990. Propiedades físicas de los suelos. Subdirección agrológica. Colombia. Pp. 813.

Ibáñez, A. S., 2001. Estudio de la erosión hídrica en suelos desarrollados sobre margas: métodos de estima en bancales abandonados. (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de producción vegetal. 396 p.

Iglesias, N. 2002. Efecto del microclima de un invernadero de la Patagonia Norte (Argentina) sobre parámetros de crecimiento y productividad de tomate. Universidad de Lleida. 22 pp.

Imeson, A.C., Jungerius, P.D. 1976. Aggregate stability and colluvation in the Luxembourg Ardennes; an experimental and micromorphological study. *Earth Surface Processes*, 1: 259-271.

ISSS: Terminology for Soil Erosion and Conservation. IUSS, IIASES y ISRIC. 1996. Wageningen, 10 pp. Morgan, R.P.C. (ed.): Soil Conservation. Problems and prospects. Proc. Conservation 80, Int. Conf. On Erosion and Conservation, Silsoe. Jhon Wiley. 1981.

Jin, K; Cornelis, W. M; Gabriels, D; Schiettecatte, W; De Neve, Stefaan; Lu, J; Buysse, T; Wu, Huijun; Cai, D; Jin, J and Harmann, R. 2008. Soil Management effects on runoff and loss from field rainfall simulation. *Catena*. 75:191-199.

Jin, X.C., Sands, G.R., Kandel, H.J., Wiesma, J.H., and Hansen, B.J. 2008. Influence of subsurface drainage on soil temperature in a cold climate. *Journal of irrigation and drainage engineering*.10.1061/ (ASCE) 0733-9437. 134: 1(83). Pp.83- 88.

Johnson, C.B., Moldenhauer, W.C. 1979. Effect of chisel versus mouldboard plowing on soil erosion by water. *Soil science of America Journal* 43: 177-9.

Kamar, M.J., 1994. *Advances in Geocology* 27, 163-179.

Kay, B.D., and Angers, D.A., 2000. Soil structure. In M.E. Sumner (ed), *Handbook of soil science*. CRC press, New York. 229-275.

Kazman, Z. - Shainberg, I. - Gal, M. 1983. Effect of low levels of exchangeable sodium and applied phosphogypsum on the infiltration rate of various soils. *Soil Science* Vol.135, N°3.

Kenneth G.R., Jeremy, F.R. 1994. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *Journal of Hydrology* 157: 287-306.

Kemper, W.D. and Rosenanu, R.C. 1986. aggregate stability and size distribution. In A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods.* 2nd ed. *Agronomy* 9: 425-422.

Kirkham, J.M., Rowe, B.A. and Doyle, R.B. 2007. Persistent improvements in the structure and hydraulic conductivity of a ferrosol due to liming. *Austrian journal of soil research.* 45, 218-223.

Klein Haneveld, W.K., Stegeman, A.W. 2005. Crop succession requirements in agricultural production planning. *European Journal of Operational Research* 166, 406-429.

Knicker, H.; Almendros, G.; Gonzalez-Vila, F.J; Gonzalez-Perez J.A; Polvillo,O; 2006. Characteristic alterations of quantity and quality of the soil organic matter caused by forest fires in continental Mediterranean ecosystems: A solid-state ¹³C NMR study. *European Journal of Soil Science* 57:558-569.

Kodesova, R., Gribb, M.M., Simunek, J. 1998. Estimating soil hydraulic properties from transient cone permeameter data. *Soil Sci.* 163 (6), 436-453.

Kodesova, R., Ordway, S.E., Gribb, M.M., Simunek, J. 1999. Estimation of soil hydraulic properties with the cone permeameter: field studies. *Soil Sci.* 164 (8), 527-541.

Kolar, M.O., Venialgo, C.A., Gutierrez, N.C., Moro, E.C., y Oleszczuk, J.D. 2000. Universidad Nacional del Nordeste. Comunicaciones científicas y tecnológicas. 3 p.

Lado, M; Ben-Hur, M. and Shainberg, I. 2004. Soil wetting and texture effects on aggregate stability, seal formation, and erosion. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:1992-1999.

Lado, M; Paz, A y Ben-Hur, M. 2004. Organic Matter and aggregate-size interactions in saturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:234-242.

Lal, R., 1979. Soil erosion on alfisols in Western Nigeria II effect of mulch rates. *Geoderma* 16, 377-382.

Lal, R. 1994. Soil erosion research methods. Soil and Water Conservation. St Lucie Press.

Langmaack, M., Schrader, S., Helming, K. 2001. Effect of mesofaunal activity on the rehabilitation of sealed soil surfaces. *Applied Soil Ecology*, 16: 121-130.

Lauren J.G., Wagenet, R.J., Bouma, J., Wosten, J.H.M. 1988. Variability of saturated hydraulic conductivity in a glossoquic hapladulf with macropores. *Soil Science*, 145 (1): 20-28.

Le Bissonnais, Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil curstability and erodibility. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 47(4): 425-437.

Leifa, F.; Pandey, A.; Soccol, C.R. 2001. Production of *Flammulina velutipes* on coffee husk and coffee spent-ground. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 44(2): 205-212.

Leiva, P., Hansen, D. 1984. Las resistencias mecánicas del suelo y el desarrollo radicular con distintos sistemas continuos de labranza. *Carpeta de producción vegetal. Estación Experimental de pergamino INTA. Argentina. Tomo 4: 181-185.*

Liebman, M. y Davis, A. 2000. Integration of soil, crop and weed management in low-external-input farming systems. *Weed Res.* 40: 27-47.

Lobo, D y Vivas, Rigoberto. 2007. efecto de la erosión simulada y manejo de residuos sobre la productividad de un alfisol del estado de Guárico, bajo cultivo de sirgo (*Sorghum bicolor*). Revista Venesuelos. Universidad Central de Venezuela, 9 p.

Logsdon, S. D y Karlen, D. L. 2004. Bulk density as a soil quality indicador during conversión to no-tillage. Soil & Tillage Research 78: 143-149.

López Cadenas, F. (Ed.).1994. Restauración hidrológica forestal de cuencas y control de la erosión. Tragsa, Mundi-Prensa.

Lostao, R.G; Lizarraga, E. A; Lafarga, R.A. 2002. Desarrollo de un infiltrómetro automático y su aplicación en campo. Investigación agraria. Producción y protección vegetales. 17; 1:131-142.

Lynch, J., and Elaine, B. 1985. Microorganisms and soil aggregate stability. Adv. Soil Science 2: 133-171.

Mahmood, R. 1996. Scale issues in soil moisture modelling: problems and prospects. Progress in physical Geography, 20: 273-291.

Mapfumo, E., Chanasyk, D.S., Naeth, M.A., Baron, V.S. 1998. Forage growth and yield components as influenced by subsurface compaction. Agron. J. 90, 805-812.

Martínez-Mena, M., Williams, A. G., Ternan, J.L. y Fitzjohn, C. 1998. Role of antecedent soil water content on aggregates stability in a semi-arid environment. Soil & Tillage Research, 48(1-2): 71-80.

Masle, J., 1998. Growth and stomatal responses of wheat seedlings to spatial and temporal variations in soil strength of bi-layered Soil Till. Res. 31, 323-337.

Marshall, T.J; Homes, J.W. 1988. Soil physics. Cambridge U. Press. 374 pp.

McIntyre, D.S. 1958. Soil splash and the formation of surface crusts by raindrop impact. *Soil Sci.* 85: 261-266.

Meek, B.D.; Rechel, E.R.; Carter, L.M.; Detar, W.R. 1992. Bulk density of a sand loam soil: traffic tillage and irrigation-method effects. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 562-565.

Meyer, L.D. 1958. An investigation of methods for simulation rainfall on standard runoff plots and a study of the drop size, velocity and kinetic energy of selected spray nozzles. Special report 81, soil and water conservation research division, Agricultural Research Service, USDA.

Miglierina, A.M., Landriscini, M.R., Galantini, J.A., Iglesias, J.O., Cachiarelli, J., y Rosell, R.A. 1998. Efecto de la siembra directa sobre algunas propiedades edáficas de un hapludol típico. *Actas XVI Congreso de la ciencia del suelo.* Carlos Paz. Córdoba. Mayo 1998. Pp. 105-106.

Ministerio da Educaçao. 1982. Atlas geografico.ppublica de angola .Volumen I.

Ministerio de Agricultura e Desenvolvimento Rural (MINADER) Y FAO, 2003. Revisao do sector agrario e da estrategia de segurança alimentar para definição de prioridades de investimentos. Documento de trabalho N° 4. Pp. 10-11.

Mintegui, J.A. 1983. Análisis de la influencia del relieve en la erosión hídrica. Hipótesis de estudio para correlacionar la pendiente con la magnitud de declive en u terreno. *Actas de la V asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica.* Publ. 1987. Madrid. Pp. 2229-2245.

Modaihsh, A.S., Horton, R., Kirkham, D., 1985. Soil water evaporation suppression by sand mulches. *Soil science* 139(4), 357-361.

Mohammed, D., Kohl, R.A. 1987. Infiltration response to kinetic energy. *ASAE Trans.* 30(1), 108-111.

Moore, I.D. 1981. Effect of surface sealing on infiltration. *ASAE Trans.* 24(6) 1546-1552, 1561.

Moore, D.C.; Singer, M.J. 1990. Crust formation effects of soil erosion processes. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 54 (4): 1117-1123.

Mora, J. L; Guerra, J. A; Notario, J.S; Rodrigues R. A; Arbelo, C. D. 2003. Parámetros físicos-químicos que influyen en la erodibilidad de los andosoles y suelos ándicos bajo vegetación forestal (I. Canarias). *Edafología*. Vol. 10(2) 207-213 pp.

Morgan, R.P.C. 1980. Soil erosion and conservation in Britain. *Processes in physical Geography* 4: 24-47

Morgan, R.P.C. 1997. *Erosión y conservación del suelo*. Ediciones Mundi-Prensa, 306 p.

Morin, J., Benjamini, Y., y Michaeli, A. 1981. The dynamics of soil crusting by rainfall impact and the water movement in the soil profile. *J. Hydrology* 52: 321-335.

Mulumba, L.N; Lal, R. 2008. Mulching effects on selected soil physical properties. *Soil & Tillage Research*. 98: 106-111.

Muñoz-Carpena, R., Regalado, C. M., Ritter, A., Alvarez-Benetí, J y Socorro, A.R. 2005. TDR Estimation of saline solutes concentration in a volcanic soil. *Geoderma* 124 (3-4): 399-413.

Nacci, S., y Sentis, P.I. 1991. Estudio de la resistencia a la penetración de los suelos con equipos de penetrometría desarrollados en el país. *Universidad Central de Venezuela. Agronomía Tropical*. 42(1-2): 115-132.

Naciones Unidas. 1992. *Convención Marco de las Naciones Unidas para el cambio Climático*. Nueva York.

Neave, M. and Rayburg, S. 2007. A field investigation into the effects of progressive rainfall-induced soil seal and crust development on runoff and erosion rates: The impact of surface cover. *Geomorphology*. 87: 378-390.

Norero, A. 1974. El agua y el aire en el suelo. Relaciones físicas básicas. CIDIAT, Mérida, Ven. Pp.117.

Notorio, K., 2001. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. *Comput. Electron. Agric.* 31, 213-237.

Ortiz Silla, R. 1990. Mecanismos y procesos de degradación del suelo con especial referencia a las condiciones ambientales mediterráneas. "Degradación y regeneración del suelo en condiciones ambientales mediterráneas". PP: 47-68. C.S.I.C. - Centro De Edafología Y Biología Aplicada Del Segura. Servicio De Publicaciones.

Ouattara, K., Ouattara, B., Nyberg, G., Sédogo, M.P., Malmer, A. 2007. Ploughing frequency and compost application effects on soil infiltrability in a cotton-maize (*Gossypium hirsutum-Zea mays L.*) rotation system on a Ferric Luvisol and a Ferric Lixisol in Burkina Faso. 95: 288-297.

Oztas, T; Fayetorbay, F. 2002. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability. *Catena* 52:1-8.

Pagliai, M., Vignozzi, N., Pellegrini, S. 2004. Soil structure and effect of management practices. *Soil Tillage Res.* 79, 131-143.

Pall, R.; Dickerson, W.T.; Green, D.; McGirr, R. 1982. Impact of soil characteristics on soil erodibility. "Recent development in the explanation and prediction of erosion and sediment yield" PP: Iash Publication, N° 137.

Panayiotopoulos, K.P., Papadopoulou, C.P., Hatjioannidou, A. 1994. Compaction and penetration resistance of an alphasol and entisol and their influence on root growth of maize seedlings Soil Till. Res. 31, 323-337.

Park, E.J. and Smucker, A. J. M. 2005. Saturated hydraulic conductivity and porosity within macroaggregates modified by tillage. Soil Science Soc. 69: 38-45.

Patterson, J. 1977. Soil compaction-effects on urban vegetation. J. Arboriculture 3: 161-167.

Pla, I. 1977. Metodología para caracterización física con fines de diagnóstico de problemas de manejo y conservación de suelos en condiciones tropicales. Maracay, Ven. UCV-FAGRO. 112 p.

Poesen, J. 1986. Surface sealing as influenced by slope angle and position of simulated stones in the top layer of loose sediments. Earth surface processes and landforms, 11: 1-10.

Poesen, J., Ingelmo-Sachez, F., Múcher, H. 1990. The hydrological response of soil surfaces to rainfall as affected by cover and position of rock fragments in the toplayer. Earth Surface Processes and Landforms Vol. 15. Pp. 653-671.

Poesen, J. 1992. Mechanisms of overland flow generation and sediment production on loamy and sandy soils with and without rock fragments. En A. J. Pearson and AD Abrahams (eds), Overland flow: hydraulics and erosion mechanics. UCL Press, London. Pp. 275-305.

Poesen, J.W.A. 1990. L'erosion process research in relation to soil erodibility and some implications for improving soil quality. "Degradación Y regeneración del suelo en condiciones ambientales mediterráneas". PP: 159-170. C.S.I.C. - Centro De Edafología Y Biología Aplicada Del Segura. Servicio De Publicaciones.

Porta, J., López-Acevedo, M. y Roquero, C. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Mundi Prensa, 929 pp.

Porta, J., López-Acevedo, M. y Poch, R.M. 2008. Introducción a la edafología uso y protección del suelo. Mundi Prensa, 451 pp.

Quiala, N.V., Ribas, B.D., Busto, C.C., Oliva G.M. 2004. Estudio comparativo de líquidos pirolíticos de cáscara de café y bagazo de caña. Tecnología química. Vol.24 N°2. Pp. 97-103.

Quirk, J. and Murray, R. 1991. Towards a model for soil structural behaviour. Aust. J. Soil Res. 29: 829-867.

Rathinavelu, R y Graziosi, G. 2005. ICS-UNIDO, Posibles usos alternativos de los residuos y subproductos del café. Science Park, Padriciano, Departamento de Biología de la Universidad de Trieste, Italia 4pp

Regués, D. 1995. Meteorización física en relación con los procesos de producción y transporte de sedimentos en un área acarcavada. Tesis doctoral inédita. Facultad de Geología U.B. 302 p.

Regués, D., Guàrdia R. & Gallart F. 2000. Geomorphic agents versus vegetation spreading as causes of badland occurrence in a Mediterranean subhumid mountainous area. Catena. Special Issue: Badland in changing environment, 40(2): 189-202.

Regués, D., Torri, D. 2002. Efecto de la energía cinética de la lluvia sobre la dinámica de las propiedades físicas y el enconstramiento en un suelo arcilloso sin vegetación. Rev. C. &G., 16(1-4): 57-71.

Reynolds, J. F., Maestre, F.T., Huber-Sannwald, E., Herrick, J., y Kemp, P.R. 2005. Aspectos socioeconómicos y biofísicos de la desertificación. Revista Ecosistemas. 19 p.

Richter, G., Negendank, J.F.W. 1977. Soil erosion processes and their measurement in the German area of the Moselle river. *Earth Surface processes* 2: 261-78.

Robinson, A.D., Gardner, K.M.C., Cooper, D.J., 1999. Measurement of relative permittivity in sandy soil using TDR, capacitance and theta probe: comparison, including the effects of bulk soil electrical conductivity. *Journal of Hydrology*. 223,198-211.

Rodríguez, O.S., Fernández de la Paz, N. 1992. Conservation practices for horticulture production in the mountainous regions of Venezuela. In H Hurni and Tato (Eds), *Erosion, conservation and small-scale farming*. Bern, Geographical Bernensia: 393-406.

Rodríguez, C.R., y Elizalde, G. 1997. Estabilidad física y química de los microagregados de dos unidades de suelos evolucionados. *Agronomía Trop.* 47(4): 409-423.

Roose, E.J. 1977. Application of the universal Soil Loss Equation of Wischmeier and Smith in West Africa. In D.J. Greenland and Lal, R. (eds): *soil conservation and management in the humid tropic*. London, Wiley: 177-87.

Rounsevell, M.D.A., Annetts, J.E., Audsley, E., Mayer, T., Reginster, I. 2003. Modelling the spatial distribution of agricultural land use at the regional scale, *Agriculture, Ecosystems and Environment* 95 (2-3), 465-479.

Ruiz, J. V; Bravo, M. E. y Loaeza, G. R. 2001. Cubiertas vegetales y barreras vivas: tecnologías con potencial para reducir la erosión en Oaxaca, Mexico. *Terra*. 19:89-95.

Salako, F.K., Dada, P.O., Adesodun, J.K., Olowokere, F.A., and Adekunle, I.O. 2007. Variation in soil strength, bulk density and gravel concentration along a toposequence in Abeokuta, south-western Nigeria. *Journal of soil res.* 45, 643-650.

Sánchez, A. H., y García, J. R. 1998. Efecto del laboreo en algunas propiedades físicas de un haplustol típico y en el rendimiento de la soja. Actas XVI congreso Argentino de la ciencia del suelo. Carlos Paz. Córdoba. Mayo de 1998. Pp. 267-268.

Sanders, D., Arboleya, J., Gilsanz, J.C. 2000. Calidad de suelo y sus impactos en los sistemas de mínimo laboreo. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria de Uruguay.

Schwab, G.O., Frever, R.K., Edminster T.W., Barnes, K.K., 1993. Soils and Water Conservation Engineering. John Wiley and Sons, Inc., New York.

Senigalesi, C., y Ferrari, M. 1993. Soil and crop responses to alternative tillage practices. Crop Science. Vol 33: 27-35.

Shainberg, I.; Levy, G.J.; Rengasamy, P. Frenkel, H. 1992. Aggregate stability and seal formation as affected by drops' impact energy and soil amendments. Soil Science, 154 (2): 103-118.

Shaxson, F. and Barber, R. 2003. Optimizing soil moisture for plant production. Soil Bulletin 79. FAO, Rome, Italy. 107 p.

Siemens, J.C., Oschwald, W.R. 1978. Corn-soybean tillage systems: erosion control, effects on crop production, costs. Transactions of the American society of Agricultural engineers 21: 293-302.

Silva, L.L. 2007. Fitting infiltration equations to centre-pivot irrigation data in a Mediterranean soil. Agriculture water management 94: 83-92.

Sims, D.A. 1990. Erosión control and socio-economic factors in de Mediterranean region. U.I.M.P. "Erosión del suelo en condiciones ambientales mediterráneas"- Valencia 9-13 Julio. Pp.149-165

Singer, M. J and Shaimberg, I. 2004. Mineral soil surface crusts and wind and water erosion. *Earth Surface Processes and Landforms*. 29: 1065-1075.

Slattery, M.C., y Brian, R.B. 1994. Surface seal development under simulated rainfall on an actively eroding surface. *Catena*, 22, 17-34.

Smith, H. J. C; Levy, G. J. y Shainberg, I. 1990. Water-droplet energy and soil amendments: effect on infiltration and erosion. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 1084-1087.

Sojka, R.E., Buscher, W.J., Lehrsch, G.A. 2001. *In Situ*, bulk density and water content relationships of a Durinodic Xeric Haplocalcid soil. *Soil Science* 166, 520-529.

Souza, C.F., Matsura, E.E., Testezlaf, R., 2001. Electromagnetic determination of water content: measurements in multi-wire probe with electromagnetic impedance discontinuities. In: IMOC 2001: Proceedings of the international Microwave and Optoelectronics Conference. SBMO/IEEE MTT-S, Belém (CD-ROM).

Souza, C.F., Matsura, E.E., 2003. Multi-wire time domain reflectometry (TDR) probe with electrical impedance discontinuities for measuring water content distribution. *Agricultural Water Management* 59: 205-216.

Stelluti, M., Maiorana, M., Giorgio, D.D. 1998. Multivariate approach to evaluate the penetrometer resistance in different tillage systems. 46: 145-151.

Sterin, R., M. Ben-Hur e Shainberg, I. 1991. Clay mineralogy effect on rain infiltration, seal formation and soil losses. *Soil Sci.* 152:455-462.

Stockle, C.O., Donatelli, M., Nelson, R. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *Journal of Agronomy* 18, 289-307.

Suárez de castro, F. 1960. Valor de la pulpa del café como abono. Instituto Salvadoreño de Investigación del café. Santa Tecla, El Salvador. Boletín Informativo. Suplemento N.º 5.

Sun, Y., Ma, D., Lammers, P.S., Schmittman, O., Rose, M. 2005. On-the-go measurement of soil water content and mechanical resistance by a combined horizontal penetrometer. *Soil & Tillage Research* 86: 209-217.

Tejedor, M., Díaz J.F. 2003. Volcanic materials as mulches for water conservation. *Geoderma*. 117: 283-295.

Thiam, A., 2001. Efecto de la pedregosidad en los procesos de la erosión hídrica en condiciones áridas. (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de producción vegetal 178 p.

Thompson, A.L., James, L.G. 1985. Water droplet impact and its effect on infiltration. *ASAE. Trans.* 28(5), 1506-1510.

Thompson, M.L. and Troeh, R.F. 1988. Los suelos y su fertilidad. Reverté Sa, p.1-171 ; 535-567.

Tisdall, J.M., and Oades, J.M. 1982. Organic matter and water stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 33:141-163.

Toop, G.C., Davis, J.L., Annan, A.P., 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.* 16, 574-582.

TRAGSA. 2003. La ingeniería en los procesos de desertificación. Mundi-prensa 1045 p.

Truman, C.C., Bradford, J.M. y Ferris, J.E. 1990. Antecedent water content and rainfall energy influence on soil aggregate breakdown. *Soil Science Society of America Journal* 54: 1385-92.

Ucuahamba, B.L., Abreu, G.F., y Ricardo, P.R., 2006. Aspectos agro climáticos de Angola, Agricultura, Recursos naturais, Desenvolvimento Rural. I Volume. ISA press. Pp. 13-36.

Valentine, C., Casenave, A., 1992. Infiltration into sealed soils as influenced by gravel cover. *Soil science Society of America Journal* 56(&): 1667-1673.

Valladares, F. 2004. Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante. Páginas 309-334. Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF, S. A., Madrid. ISBN: 84-8014-552-8.

Van Beers, W.F.J. 1980. Soil and properties. In *Drainage principle and Applications*. Vol. I. ILRI. Wageningen. Pp. 33-73.

Van Dijck, S.J.E., Van Asch, Th. W.J. 2002. Compaction of loamy soils due to tractor traffic in vineyards and orchards and its effect on infiltration in southern France. *Soil Tillage Res.* 63, 141-153.

Van Lynden, G.W.J. (1995). European soil resources. Current status of soil degradation, causes, impacts and need for action. Council of Europe Press. *Nature and Environment*, No. 71, Estrasburgo, Francia.

Vandervaere, J.P. et al. 1998. Prediction of crust-induced surface runoff with disc infiltrometer data. *Soil Science* 163(1): 9-21.

Vaz, C.M.P., Bassoi, L.H., Hopmans, J.W. 2001. Contribution of water content and bulk density to field soil penetration resistance as measured by a combined cone penetrometer-TDR probe. *Soil Till. Res.* 60, 35-42.

Vázquez, M. 2003. Evaluación de la alteración de algunas propiedades edáficas bajo riego complementario en suelo de la provincia de Buenos Aires. Tesis doctoral

Vidal, C.M., y J.L. Costa. 2000. Evaluación de algunas propiedades físicas en sistemas de labranza reducida y siembra directa. RIA 29: 61-68.

Wild, A. 1992. Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell. Mundi – Prensa. Pp. 390-395.

Wischmeier, W.H. 1959. A rainfall erosion index for a universal soil loss equation. Soil sci. Soc. Am. Proc. 23: 246-249.

Wischmeier, W.H. y Smith, D.D. 1965. Predicting Rainfall erosion losses from cropland East of the Rocky Mountain. Guide for Selection of Practices for Soil and Water Conservation. A.R.S. USDA. Agriculture handbook, No. 282.

Wischmeier, W.H. y Smith, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses – A guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No 537.

Zegelin, S. J., White, I., Jenkins, D.R., 1989. Improved field's probes for soil water content and electrical conductivity measurements using TDR. Water Resour. Res. 25, 2367-2376.

Zhang, B. y Horn, R. 2002. Shearing-induced changes in saturated hydraulic conductivity under different soil conditions. Symposium, 17th WCSS, Thailand, 8 p.

Páginas web consultadas:

www.edafologia.ugr.es/index.htm

www.aeac-sv.org

www.aeac-sv.org/html/intro.html

www.asajacyl.com/medioambiente

www.cipav.org.co/redagrofor/memorias99/BarreraN.htm

www.fao.org

www.mma.es/portal/secciones/biodiversidad

7 ANEXOS

ANEXO I: TABLAS Y GRAFICAS DE LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS DE ANGOLA

POSTO METEOROLÓGICO	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Maio	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Ano
Centro de Estudos da Ceilunga	20,4	20,4	20,4	19,8	17,6	15,0	14,0	15,3	17,5	19,9	20,3	20,4	20,4
Centro de Estudos da Chianga .	20,8	21,0	21,0	20,2	18,2	15,7	14,6	15,6	17,7	19,6	20,4	20,1	18,7
Centro de Est. do Alto Capaca	24,2	24,3	24,1	24,3	22,4	19,4	18,4	19,4	20,9	23,0	23,9	24,3	22,4
Centro de Estudos da Humpata	19,5	19,3	19,4	18,3	15,0	12,9	12,1	12,8	15,2	17,8	19,2	19,5	16,8
Centro de Estudos de Salazar	25,0	25,8	25,3	25,6	25,3	23,2	21,8	21,4	22,2	23,4	24,2	24,9	24,0
Centro de Estudos do Gangassol	23,8	23,9	23,7	23,7	22,3	19,8	18,8	20,6	22,0	22,9	23,2	23,7	22,4
Centro de Estudos da Cela . .	22,5	22,8	22,7	22,2	20,9	18,2	17,0	18,5	20,8	21,8	22,3	22,3	21,0

Anexo I.1: Temperatura del suelo a la profundidad de 0,20 m (° C) Fuente: Azevedo et al., (1972)

POSTO METEOROLÓGICO	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Maio	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Ano
Centro de Estudos da Ceilunga	22,0	22,0	22,0	21,6	19,7	17,2	16,2	17,2	19,2	21,4	21,9	22,0	20,2
Centro de Estudos da Chianga .	22,5	22,7	22,8	22,3	20,9	18,8	17,4	17,9	19,1	21,2	22,0	21,8	20,8
Centro de Est. do Alto Capaca	25,5	25,8	25,7	25,9	25,2	23,1	21,5	21,8	22,7	24,0	25,0	25,5	24,3
Centro de Estudos da Humpata	21,2	20,9	21,0	20,2	18,2	15,8	14,9	15,5	17,5	20,0	21,2	21,2	19,0
Luanda (Observatório)	30,5	30,9	31,0	30,3	29,5	26,9	24,9	24,4	25,8	27,6	29,0	29,9	28,4
	30,7	31,1	31,0	30,4	29,7	27,4	25,3	24,8	26,2	28,1	29,9	30,4	28,8
Centro de Estudos de Salazar	26,4	27,0	26,6	26,7	26,7	24,9	23,4	23,3	23,8	24,9	25,6	26,2	25,5
Centro de Estudos do Gangassol	25,6	25,8	25,6	25,7	24,8	22,6	21,4	22,7	24,0	24,9	25,1	25,3	24,5
Centro de Estudos da Cela . .	23,8	24,2	24,0	23,7	22,7	20,4	19,0	20,0	22,1	23,1	23,4	23,5	22,2

Anexo I.2: Temperatura del suelo a la profundidad de 0,50 m (° C) Fuente: Azevedo et al., (1972)

POSTO METEOROLÓGICO	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Maio	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Ano
Centro de Estudos da Ceilunga	22,5	22,1	22,1	22,0	20,8	18,7	17,4	17,9	19,4	21,1	22,9	22,1	20,8
Centro de Estudos da Chianga .	22,2	22,4	22,6	22,4	21,4	19,9	18,5	18,2	19,1	20,6	21,5	21,7	20,9
Centro de Est. do Alto Capaca	25,5	25,7	25,4	25,8	24,3	21,6	20,7	21,1	22,4	24,2	25,2	25,5	24,0
Centro de Estudos da Humpata	21,3	21,1	21,2	20,7	19,0	17,2	16,1	16,2	17,5	19,8	20,7	21,2	19,3
Luanda (Observatório)	30,2	30,7	30,9	30,5	30,0	28,0	26,1	25,2	25,9	27,3	28,7	29,7	28,6
	30,4	30,8	29,6	30,5	30,0	28,2	26,4	25,4	26,2	27,7	29,1	30,0	28,7
Centro de Estudos de Salazar	26,5	27,0	26,9	26,8	27,0	25,7	24,3	24,0	24,3	25,1	25,8	26,3	25,8
Centro de Estudos do Gangassol	25,3	25,4	25,4	25,5	26,0	23,2	22,1	22,4	23,4	24,4	24,8	25,3	24,4
Centro de Estudos da Cela . . .	23,9	24,3	24,2	24,0	23,4	21,4	20,0	20,5	22,1	23,2	23,7	23,9	22,9

Anexo I.3: Temperatura del suelo a la profundidad de 1,00 m (° C) Fuente: Azevedo et al., (1972)

POSTO METEOROLÓGICO	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Maio	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Ano
Buco Zau	31,0	31,7	31,9	32,0	30,2	27,2	25,3	25,5	26,8	29,1	30,1	30,3	29,3
Cabinda	29,9	30,3	30,7	30,5	29,1	26,6	25,2	25,4	26,5	27,9	28,8	29,4	28,4
Santo António do Zaire	30,6	31,2	31,5	31,2	29,8	26,9	25,1	25,5	27,3	28,8	30,0	30,0	29,0
São Salvador	28,1	28,7	29,4	28,9	28,0	26,1	24,9	25,3	27,1	28,3	27,8	28,1	27,6
Quimbele	28,5	29,3	29,1	28,7	29,0	29,1	28,1	28,4	28,8	28,3	28,3	28,1	28,6
Ambrizete	29,4	30,0	30,0	29,6	28,1	25,3	23,8	24,1	25,3	26,8	27,9	28,9	27,4
Dundo	28,8	29,2	29,2	29,6	30,7	31,0	31,0	30,9	30,0	29,6	28,7	28,7	29,8
Carmona (S.M.A.)	27,6	28,2	28,4	28,2	29,0	28,5	26,6	25,4	26,6	27,1	27,1	27,5	27,5
Caungula	27,3	27,2	27,5	27,9	29,0	29,3	28,9	29,0	27,9	27,6	27,1	27,2	28,0
Luanda (Observatório)	29,4	30,1	30,5	30,1	28,4	25,1	23,2	23,3	24,9	26,8	28,2	28,7	27,4
Sunginge	30,5	31,2	31,0	30,8	32,0	32,3	32,5	32,9	32,6	31,4	29,9	30,2	31,4
Centro de Estudos de Salazar .	27,5	28,2	28,0	27,8	28,0	26,7	25,0	24,4	25,8	27,0	27,1	27,1	26,9
Centro de Estudos de Gangassol	27,8	28,4	28,1	21,9	29,1	29,1	29,4	29,9	29,4	28,1	27,2	27,4	28,5
Henrique de Carvalho	27,6	27,9	27,8	28,7	29,5	28,9	29,3	20,6	30,4	29,0	27,6	27,4	28,7
Nova Gaia	26,4	27,0	26,3	26,5	27,4	27,5	28,1	29,2	29,2	27,9	26,2	26,1	27,3
Teixeira de Sousa	28,6	28,6	28,8	29,4	29,7	28,2	29,0	31,0	32,3	31,4	29,2	28,2	29,5
Gabela	25,8	26,3	25,7	25,8	26,5	25,2	22,9	21,7	23,4	24,6	24,8	25,3	24,8
Porto Amboim	29,6	30,3	30,5	30,2	28,5	25,4	23,5	23,7	25,1	26,8	28,6	29,0	27,6
Santa Comba	27,0	28,1	27,5	27,7	28,4	27,6	28,2	30,0	30,0	28,1	26,9	26,6	28,0
Luso	26,3	26,7	26,5	27,1	27,0	25,8	26,0	28,5	30,5	29,4	26,8	26,5	27,3
Coemba	26,5	27,0	27,5	28,2	28,0	27,0	27,1	29,1	31,1	29,8	26,9	26,4	27,9
Silva Porto (S.M.A.)	24,3	24,7	24,6	24,8	24,4	23,6	23,9	25,9	27,8	26,9	24,7	24,5	25,0
Lobito	28,4	29,3	30,0	29,7	27,6	24,1	22,5	22,8	24,1	25,9	27,7	27,8	26,7
Centro de Estudos da Chianga	24,8	25,6	25,0	25,4	25,4	24,6	25,2	27,4	29,0	27,6	25,2	24,9	25,8
Estação Zootécnica da Ganda .	25,6	26,0	26,1	27,0	27,4	27,0	26,6	28,7	29,6	28,3	26,5	25,7	27,0
Cuíma	26,0	26,2	26,5	27,2	27,3	26,6	26,7	28,2	29,8	29,0	26,3	25,8	27,1
Chitembo	25,9	26,3	26,0	26,5	25,9	24,5	25,4	27,6	29,5	28,7	27,0	26,1	26,6
Vila Artur de Paiva	26,9	26,8	26,9	26,9	26,8	25,8	25,9	27,9	30,6	30,6	28,2	27,5	27,6
Vila Arriaga	30,6	28,6	29,6	31,4	32,3	31,0	30,4	30,4	30,1	32,6	32,1	31,2	30,9
Serpa Pinto	27,4	27,6	27,5	28,2	27,4	26,1	26,3	28,9	31,7	32,0	29,4	28,2	28,4
Sá da Bandeira	24,3	24,2	24,1	24,5	24,2	23,1	23,7	25,9	28,0	27,7	25,6	25,0	25,0
Centro de Estudos da Humpata	24,1	23,6	23,8	23,4	23,7	22,7	23,0	25,1	27,2	27,0	25,1	24,7	24,5
Moçâmedes	26,8	27,7	29,0	28,1	25,0	21,6	19,8	20,6	22,3	23,6	25,8	25,8	24,7
Porto Alexandre	27,2	27,5	28,5	27,9	23,7	21,3	20,2	20,4	22,2	23,9	25,8	25,9	24,5
Mavinga	28,8	28,4	28,9	29,4	27,8	25,8	25,9	28,7	32,3	33,3	30,1	29,1	29,0
Pereira D'Eça	32,0	30,3	30,7	31,0	29,4	27,3	27,4	30,3	33,8	35,0	32,4	33,0	31,1
Cuangar	31,1	30,3	30,3	30,4	28,3	26,8	26,5	29,0	32,3	34,4	32,9	32,4	30,4

Anexo I.4: Valores medios de temperaturas máximas (° C). Fuente: Azevedo et al., (1972)

POSTO METEOROLÓGICO	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Maio	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Ano
Buco Zau	22,3	21,9	22,1	22,3	22,0	19,9	18,4	18,3	19,6	21,0	22,1	22,4	21,0
Cabinda	23,0	23,1	23,3	23,3	22,4	19,4	17,8	18,3	20,1	22,0	22,8	22,9	21,5
Santo António do Zaire	24,0	24,1	24,4	24,4	23,4	20,1	18,5	18,9	20,7	22,9	23,8	23,8	22,4
São Salvador	20,1	20,1	20,3	20,3	19,8	17,0	15,5	16,1	17,7	19,4	19,9	19,8	18,8
Quimbele	19,1	19,1	19,1	19,0	18,9	17,2	15,6	16,0	17,5	18,5	18,3	18,5	18,1
Ambrizete	23,1	23,6	23,3	23,2	22,3	18,6	17,0	17,4	19,6	21,9	23,0	22,9	21,3
Dundo	19,7	19,8	19,8	19,8	18,5	16,5	16,6	18,6	19,4	19,5	19,6	19,8	19,0
Carmona (S.M.A.)	18,5	18,5	18,5	18,4	17,7	15,6	14,5	14,7	16,3	17,9	18,2	18,2	17,2
Caungula	16,1	16,2	16,2	16,2	15,2	13,4	13,7	14,5	15,4	15,4	15,7	15,9	15,3
Luanda (Observatório)	23,6	24,0	24,3	23,9	22,8	19,7	18,1	18,1	19,6	21,7	23,0	23,2	21,8
Sunginge	17,8	17,8	18,1	17,8	13,4	7,7	7,8	11,4	16,2	17,5	18,1	17,8	15,1
Centro de Estudos de Salazar	18,7	18,7	19,2	19,4	18,3	14,9	14,0	14,4	16,0	17,7	18,2	18,5	17,3
Centro de Estudos de Gangassol	16,3	16,2	16,4	16,1	12,8	9,6	9,4	12,3	14,9	16,0	16,3	16,3	14,4
Henrique de Carvalho	17,5	17,6	17,5	17,0	14,1	12,2	12,4	15,0	17,0	17,5	17,5	17,7	16,1
Nova Gaia	16,8	16,8	17,0	17,0	14,9	12,0	12,1	13,2	15,6	16,2	16,4	16,5	15,4
Teixeira de Sousa	17,6	17,6	17,7	17,1	15,0	12,5	12,1	14,5	16,6	17,5	17,5	17,5	16,1
Gabela	17,0	16,4	17,5	17,9	15,6	11,7	10,6	12,1	14,6	16,2	17,4	17,1	15,3
Porto Amboim	22,4	22,9	23,2	23,3	21,7	18,7	17,1	17,4	18,7	20,9	22,3	22,1	20,9
Santa Comba	15,8	15,1	16,1	16,0	12,2	7,8	8,7	9,8	13,8	15,7	16,2	15,9	13,6
Luso	16,2	16,3	16,0	14,8	11,6	9,0	9,3	11,8	14,4	15,8	16,0	16,2	14,0
Coemba	16,6	16,4	16,5	15,2	8,3	4,2	3,9	7,2	12,0	15,4	16,2	16,5	12,4
Silva Porto (S.M.A.)	14,5	14,4	14,6	13,9	10,6	8,2	8,5	10,7	13,6	14,5	14,5	14,5	12,7
Lobito	22,1	22,5	23,5	23,5	20,9	17,4	16,3	16,1	17,9	20,3	20,9	21,8	20,3
Centro de Estudos da Chianga	14,0	13,6	14,0	13,3	9,7	6,8	7,2	9,6	12,1	13,6	14,0	14,0	11,8
Estação Zootécnica da Ganda	15,4	15,5	16,2	16,3	14,6	12,3	12,4	13,3	14,0	15,5	15,8	15,8	14,7
Cuíma	14,4	14,1	14,2	13,8	10,0	7,4	7,4	9,4	12,5	14,0	14,4	14,1	12,1
Chitembo	14,9	15,1	16,0	14,0	10,6	7,6	7,9	10,4	13,8	14,7	14,8	15,1	12,9
Vila Artur de Paiva	15,6	15,4	15,5	13,9	8,2	4,4	4,7	6,1	12,4	15,2	15,8	15,8	11,9
Vila Arriaga	18,1	18,1	18,9	18,4	16,1	12,7	13,1	12,8	14,4	16,9	18,1	17,8	16,3
Serpa Pinto	16,2	15,8	16,0	13,2	7,8	3,7	3,3	5,8	10,1	14,6	15,7	16,0	11,5
Sá da Bandeira	13,7	13,6	14,0	13,3	10,4	8,0	8,5	11,2	13,7	13,9	13,9	13,8	12,3
Centro de Estudos da Humpata	12,4	12,2	12,6	11,3	7,5	5,2	5,4	7,3	9,5	10,9	12,2	12,1	9,9
Moçâmedes (S.M.A.)	19,0	19,8	20,7	18,8	14,1	12,6	12,7	13,7	14,8	15,9	17,4	17,8	16,4
Porto Alexandre	17,7	18,3	19,3	17,6	14,4	12,9	12,7	13,1	13,7	14,8	16,5	16,8	15,7
Mavinga	17,5	17,4	16,2	13,2	7,6	4,2	3,1	5,7	10,8	15,1	17,0	17,3	12,1
Pereira D'Eça	18,2	18,0	17,9	16,0	11,0	7,3	6,8	9,1	13,7	17,7	18,8	18,0	14,4
Cuangar	17,0	17,1	16,3	14,4	9,4	2,9	2,7	5,4	11,0	15,1	16,7	17,4	12,1

Anexo I.5: Valores medios de temperaturas mínimas (° C). Fuente: Azevedo et al., (1972)

POSTO METEOROLÓGICO	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Maio	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Ano
Buco Zau	9	9	12	12	5	0	1	2	4	8	12	10	84
Cabinda	8	10	12	13	5	0	0	1	3	10	14	9	85
Santo António do Zaire	6	8	10	11	4	0	0	0	1	4	8	6	52
São Salvador	5	7	9	14	7	0	0	0	1	6	11	9	69
Quimbele	12	11	15	16	8	1	1	1	7	13	18	13	116
Ambrizete	8	9	12	14	4	0	0	1	4	9	11	7	79
Dundo	18	17	21	20	6	1	1	4	11	15	21	21	156
Carmona (S.M.A.)	13	13	18	23	11	1	0	1	7	17	21	16	141
Caungula	11	11	14	13	2	0	0	3	8	13	16	14	105
Luanda (Observatório)	4	5	10	12	2	0	0	1	2	5	8	5	54
Sunginge	12	12	14	13	2	0	0	1	5	11	14	13	97
Centro de Estudos de Salazar	13	12	18	21	8	6	9	11	13	22	21	15	169
Centro de Estudos do Gangassol	9	9	16	16	3	0	0	1	6	12	17	11	120
Henrique de Carvalho	18	16	19	15	2	0	0	2	7	13	19	19	130
Nova Gaia	11	10	13	11	2	0	0	0	6	12	13	11	89
Teixeira de Sousa	16	16	16	10	1	0	0	1	4	10	15	18	107
Gabela	7	7	15	16	3	0	0	0	2	11	13	10	84
Porto Amboim	4	5	6	9	2	0	0	1	2	8	9	6	52
Santa Comba	15	11	19	19	5	0	0	1	10	21	23	18	142
Luso	22	20	22	12	2	0	0	0	3	13	20	23	137
Coemba	21	16	18	10	2	0	0	0	3	10	18	19	117
Silva Porto (S.M.A.)	22	18	22	13	2	0	0	1	4	14	21	23	140
Lobito	4	5	11	7	1	0	0	0	1	6	7	7	49
Centro de Estudos da Chianga	19	16	20	13	2	0	0	1	3	14	20	21	129
Estação Zootécnica da Ganda	12	10	19	14	2	0	0	0	3	14	18	16	108
Cuíma	14	11	15	9	1	0	0	0	1	10	14	16	91
Chitembo	15	13	17	8	2	0	0	0	2	10	13	15	95
Vila Artur de Paiva	15	14	14	8	1	0	0	0	1	6	13	14	86
Vila Arriaga	11	11	17	11	1	0	0	0	0	6	10	10	77
Serpa Pinto	21	17	18	8	2	0	0	0	2	9	17	18	112
Sá da Bandeira	16	13	19	10	1	0	0	0	1	10	15	16	101
Centro de Estudos da Humpata	13	12	17	10	1	0	0	0	1	7	13	12	86
Moçâmedes	3	3	5	2	0	0	0	0	0	2	2	2	19
Porto Alexandre	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4
Mavinga	18	18	14	5	1	0	0	0	1	5	13	17	92
Pereira D'Eça	11	12	10	5	0	0	0	0	0	3	8	8	57
Cuangar	11	11	10	4	1	0	0	0	1	3	8	9	58

Anexo I.6: Numero de días de precipitación. Fuente: Azevedo et al., (1972)

POSTO METEOROLÓGICO	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Maio	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Ano
Buco Zau	93	88	95	84	79	85	73	77	72	78	84	85	993
Cabinda	70	67	63	62	66	75	74	83	81	87	77	74	879
Santo Antonio do Zaire	81	77	84	71	71	73	72	76	80	89	83	83	940
São Salvador	69	75	81	62	58	68	79	96	106	100	72	70	936
Ambrizete	110	104	103	80	76	78	76	79	86	103	111	103	1109
Dundo	54	54	59	63	102	145	157	124	80	72	55	53	1018
Carmona (S.M.A.)	99	97	101	74	120	154	140	131	133	113	85	104	1351
Caungula	74	60	78	76	129	210	256	205	95	80	67	71	1401
Luanda	84	85	79	63	41	57	51	47	52	71	74	76	780
Sunginge	69	74	81	78	112	141	159	159	139	103	74	77	1266
Centro de Estudos de Salazar	55	57	48	36	59	67	57	54	58	55	49	50	645
Centro de Estudos do Gangassol	104	102	91	74	132	174	195	185	156	111	79	92	1495
Henrique de Carvalho	111	111	104	134	248	320	372	385	245	172	105	106	2413
Nova Gaia	71	68	71	73	115	176	211	213	140	107	71	75	1391
Teixeira de Sousa	135	95	100	148	291	349	397	397	315	240	135	121	2723
Gabela	100	90	90	78	113	135	108	71	104	86	80	90	1145
Porto Amboim	121	111	108	84	89	85	82	81	87	94	103	112	1157
Santa Comba	121	146	116	113	221	298	355	343	237	151	102	109	2312
Luso (S.M.A.)	91	96	84	115	183	210	248	309	285	200	101	278	2200
Coemba	95	78	82	122	199	187	212	275	270	148	94	85	1847
Silva Porto (S.M.A.)	89	94	84	109	167	192	228	282	270	187	94	86	1882
Lobito	132	132	128	110	109	97	92	90	97	116	128	132	1363
Centro de Estudos da Chianga	122	115	122	153	245	295	357	427	382	230	130	114	2692
Estação Zootécnica da Ganda	79	76	85	108	230	259	289	277	186	150	113	79	1931
Cuima	144	140	140	162	239	260	273	347	329	229	161	148	2572
Vila Artur de Paiva	117	101	109	124	158	164	181	243	295	246	147	126	2011
Vila Arriaga	114	95	77	95	188	169	194	169	167	198	166	142	1774
Serpa Pinto	97	88	91	106	141	157	189	251	294	250	142	118	1924
Sá da Bandeira	161	172	124	142	245	277	314	391	440	326	226	211	3029
Centro de Estudos da Humpata	150	130	109	129	187	217	264	319	330	254	183	182	2454
Moçâmedes	159	151	162	141	134	92	87	93	105	124	155	162	1565
Mavinga	131	95	139	174	200	183	199	266	360	319	179	139	2384
Pereira D'Eça	270	178	208	222	278	280	324	390	463	468	385	305	3771
Cuangar	208	174	177	211	262	265	284	404	411	414	329	265	3404

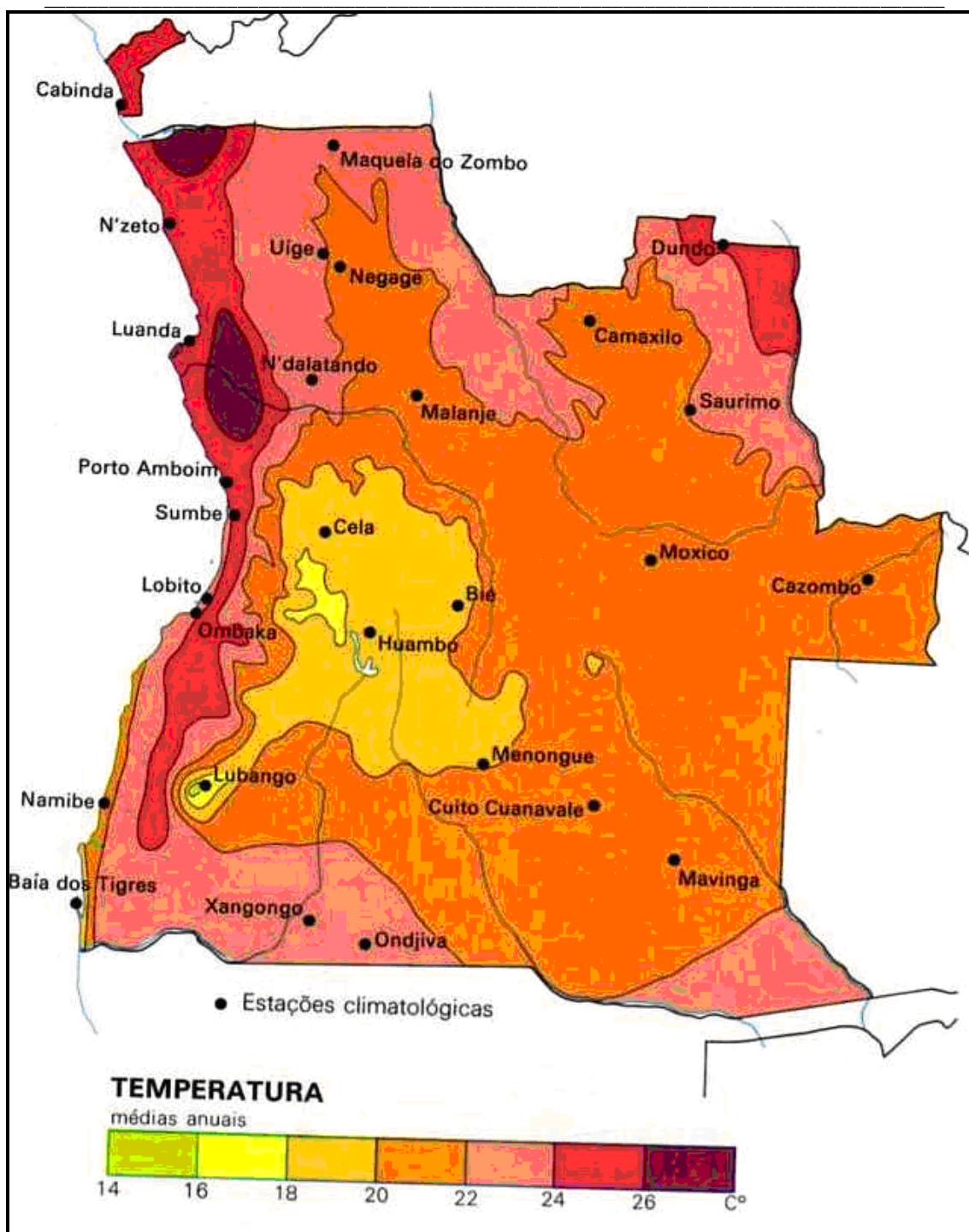
Anexo I.7: Evaporación Piche (mm). Fuente: Azevedo et al., (1972)

POSTO METEOROLÓGICO	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Maió	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Ano
Buco Zau	144	131	146	141	133	92	73	74	87	118	134	142	1415
Cabinda	142	130	146	139	126	76	70	74	89	118	128	139	1377
Santo António do Zaire	150	137	152	144	137	89	68	71	96	128	141	148	1461
São Salvador	110	103	118	110	104	75	65	70	85	107	105	111	1163
Quimbele	107	102	108	100	104	91	80	84	93	101	99	102	1171
Ambrizete	141	132	141	134	118	74	62	65	81	109	125	136	1318
Dundo	111	102	110	110	110	96	99	112	110	114	108	111	1293
Carmona (S.M.A.)	101	94	105	97	99	81	72	67	79	94	95	100	1084
Caungula	89	80	88	85	88	77	80	86	83	86	83	89	1014
Luanda (Observatório)	147	135	150	139	125	80	63	65	80	110	130	138	1362
Sunginge	114	108	118	109	94	66	68	88	115	118	110	114	1222
Centro de Estudos de Salazar	105	97	107	102	99	73	63	64	74	94	98	103	1079
Centro de Estudos do Gangassol	94	86	94	86	78	62	64	80	88	93	88	93	1006
Henrique de Carvalho	97	89	94	91	83	67	72	93	102	102	94	93	1082
Cabuta Cassanha	114	99	110	103	99	77	65	64	64	90	105	112	1102
Nova Gaia	87	80	86	82	77	65	72	79	87	91	84	88	978
Teixeira de Sousa	101	91	99	92	85	63	67	90	108	114	101	101	1112
Gabela	93	82	91	88	83	59	50	52	66	82	87	92	925
Porto Amboina	140	132	145	137	116	74	60	64	76	104	128	134	1310
Santa Comba	82	74	91	86	74	52	58	71	88	93	89	89	947
Luso	92	82	87	80	67	50	53	73	95	102	90	91	962
Coemba	95	84	92	85	60	41	42	60	86	101	92	94	932
Silva Porto (S.M.A.)	80	73	79	72	60	46	50	66	83	88	80	81	858
Lobito	133	132	142	137	106	69	58	60	70	99	106	122	1234
Centro de Estudos da Chianga	81	73	78	72	59	46	51	67	83	89	80	81	960
Estação Zootécnica da Ganda	81	74	82	81	76	67	64	78	87	93	85	84	952
Cuíma	85	76	83	76	62	48	51	65	84	92	83	82	887
Chitembo	88	82	88	77	64	43	48	67	91	98	90	90	926
Vila Artur de Paiva	96	84	90	77	56	40	42	55	89	109	100	103	941
Vila Arriaga	115	99	113	114	106	75	76	75	88	126	132	128	1247
Serpa Pinto	100	86	93	77	55	37	37	54	81	111	103	103	937
Sá da Bandeira	81	70	76	70	59	47	50	68	87	91	83	83	865
Centro de Estudos da Humpata	80	68	74	65	53	41	44	57	71	81	79	81	794
Moçâmedes (S.M.A.)	108	106	124	102	70	49	44	51	60	75	92	80	961
Porto Alexandre	106	97	113	95	65	48	46	50	58	73	89	96	961
Mavinga	112	95	100	81	53	34	34	51	86	118	111	113	988
Pereira D'Eça	132	105	110	92	59	35	35	58	102	143	145	138	1154
Cuangular	122	103	105	90	58	31	31	48	83	125	125	133	1054

Anexo I.8: Evapotranspiración potencial calculada (mm), (Thornthwaite). Fuente: Azevedo et al., (1972)

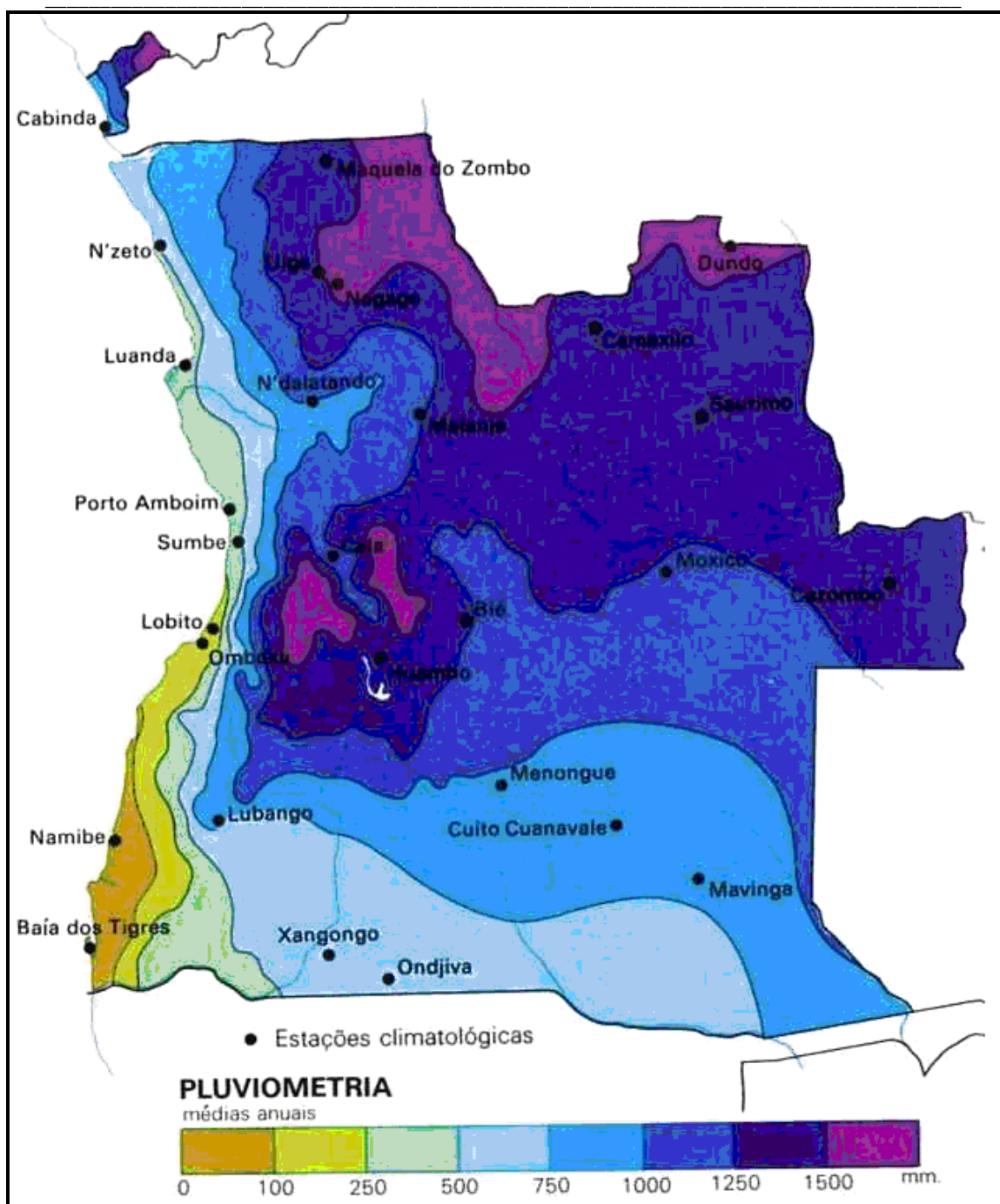
POSTO METEOROLÓGICO	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Maio	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Ano
Dundo	112	102	109	110	142	140	142	126	116	125	109	115	1448
Luanda (Observatório)	182	167	167	146	136	106	92	93	112	147	162	177	1687
Centro de Estudos de Salazar	128	125	122	109	126	114	95	85	98	116	120	125	1363
Centro de Estudos do Gangassol	130	114	115	108	128	131	135	134	144	134	112	127	1512
Centro de Estudos da Chianga	129	122	159	146	180	181	203	248	245	185	144	132	2074
Centro de Estudos da Humpata	140	128	123	120	135	126	143	162	198	184	142	157	1758

Anexo I.9: Evaporación tina clase A (mm). Fuente: Azevedo et al., (1972)



Escala 1:14 000 000

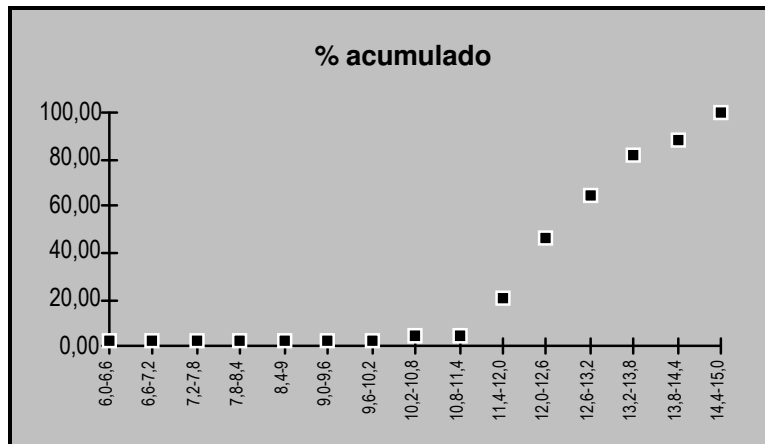
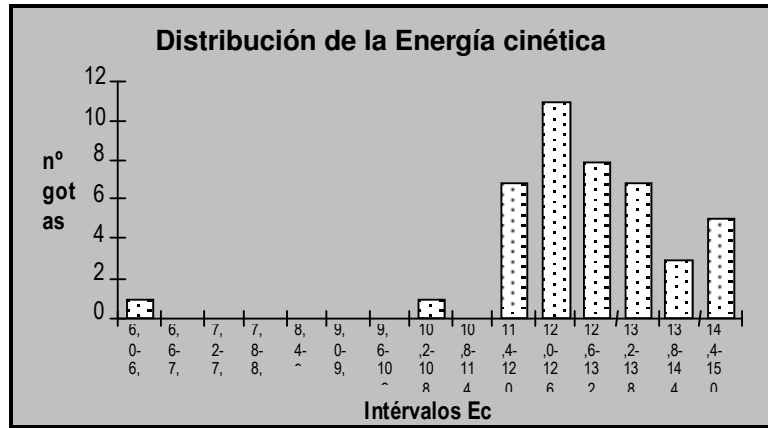
Anexo I.10: Temperatura media anual (° C). Fuente: Atlas geográfico, (1982)



Escala 1:14 000 000

Anexo I.11: Precipitación media anual (mm). Fuente: Atlas geográfico, (1982)

ANEXO II: GRAFICAS DE LA DETERMINACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA



Anexo II.1: Distribución de la energía cinética y porcentaje acumulado.

Fuente: Ibáñez (2001)

ANEXO III: BALANCE HÍDRICO Y PÉRDIDA DE SUELO

<i>Tratamientos</i>	<i>Infiltración (mm/h)</i>	<i>Escorrentía (mm)</i>	<i>Perdida de suelo (g/m²)</i>	<i>concentración (g/l)</i>	<i>Tasa de Infiltración (mm/h)</i>
<i>1s</i>	70,093	15,408	427,143	27,722	42,992
<i>1e</i>	118,257	1,510	29,122	19,284	114,973
<i>1t</i>	63,388	20,714	803,939	38,811	56,859
<i>2s</i>	122,571	0,000	0,000	0,000	122,571
<i>2e</i>	122,571	0,000	0,000	0,000	122,571
<i>2t</i>	122,571	0,000	0,000	0,000	122,571
<i>3s</i>	64,554	20,306	132,388	6,520	53,184
<i>3e</i>	93,359	10,224	131,163	12,828	85,845
<i>3t</i>	58,082	22,571	878,408	38,917	45,054
<i>4s</i>	80,181	14,837	40,082	2,702	68,184
<i>4e</i>	100,589	7,694	49,000	6,369	93,024
<i>4t</i>	63,971	20,510	673,612	32,843	53,193
<i>5s</i>	66,012	19,796	209,980	10,607	40,939
<i>5e</i>	80,006	14,898	143,449	9,629	75,633
<i>5t</i>	70,093	18,367	1155,755	62,924	61,380

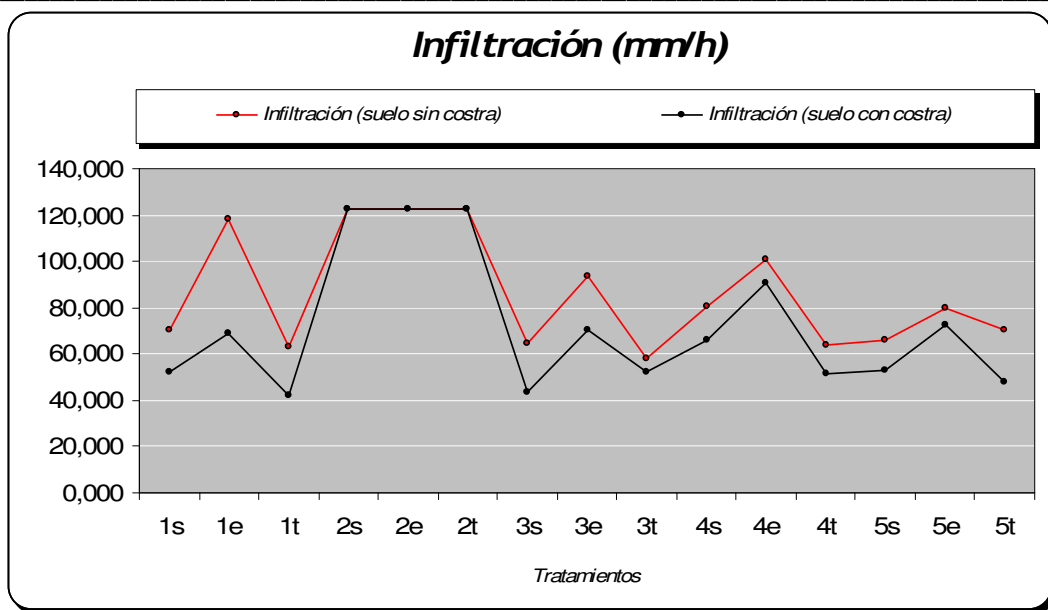
Anexo III.1. Cuantificación de los parámetros evaluados en la simulación de lluvia (suelo sin costra)

<i>Tratamientos</i>	<i>Infiltración (mm/h)</i>	<i>Escorrentía (mm)</i>	<i>Perdida de suelo (g/m²)</i>	<i>concentración (g/l)</i>	<i>Tasa de Infiltración (mm/h)</i>
<i>1s</i>	51,901	24,735	316,204	12,784	44,920
<i>1e</i>	69,219	18,673	219,776	11,769	42,813
<i>1t</i>	42,280	28,102	2068,224	73,597	32,779
<i>2s</i>	122,571	0,000	0,000	0,000	122,57
<i>2e</i>	122,571	0,000	0,000	0,000	122,57
<i>2t</i>	122,571	0,000	0,000	0,000	122,57
<i>3s</i>	43,446	27,694	294,020	10,617	35,005
<i>3e</i>	70,560	18,204	161,531	8,873	57,303
<i>3t</i>	52,017	24,694	992,143	40,178	40,944
<i>4s</i>	65,662	19,918	201,449	10,114	55,225
<i>4e</i>	90,501	11,224	77,694	6,922	85,837
<i>4t</i>	51,259	24,959	963,694	38,611	37,675
<i>5s</i>	53,184	24,286	259,041	10,666	43,419
<i>5e</i>	72,717	17,449	163,633	9,378	61,350
<i>5t</i>	48,227	26,020	1136,755	43,687	40,939

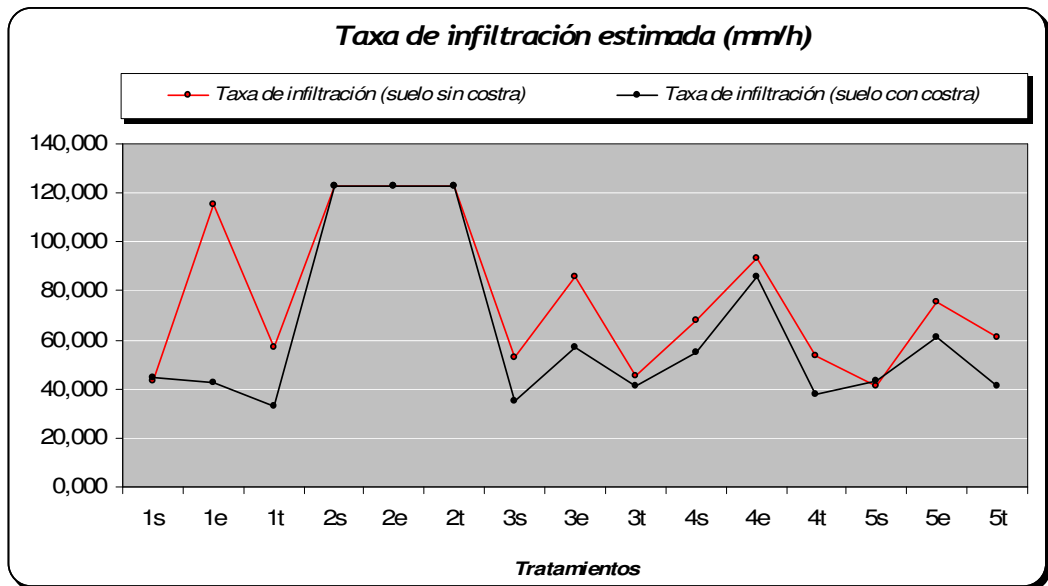
Anexo III.2. Cuantificación de los parámetros evaluados en la simulación de lluvia (suelo con costra)

<i>Tratamientos</i>	<i>Residuos arrastrados (g)</i>	<i>Inicio encharcamiento (min)</i>	<i>Inicio de escorrentia (min)</i>
<i>1ss</i>	4,37	1,00	3,00
<i>1es</i>	1,04	1,00	4,00
<i>1ts</i>	0,00	0,20	0,35
<i>2ss</i>	0,00	0,00	0,00
<i>2es</i>	0,00	0,00	0,00
<i>2ts</i>	0,00	0,00	0,00
<i>3ss</i>	4,32	1,00	2,30
<i>3es</i>	1,67	3,00	3,33
<i>3ts</i>	0,00	0,50	1,16
<i>4ss</i>	7,42	1,00	2,50
<i>4es</i>	4,16	2,00	3,00
<i>4ts</i>	0,00	0,20	0,30
<i>5ss</i>	7,90	1,00	3,16
<i>5es</i>	1,88	2,00	3,16
<i>5ts</i>	0,00	0,20	0,80
<i>1sc</i>	9,93	0,54	1,37
<i>1ec</i>	3,26	0,51	2,20
<i>1tc</i>	0,00	0,33	1,02
<i>2sc</i>	0,00	0,00	0,00
<i>2ec</i>	0,00	0,00	0,00
<i>2tc</i>	0,00	0,00	0,00
<i>3sc</i>	15,64	0,58	2,00
<i>3ec</i>	6,58	1,09	2,19
<i>3tc</i>	0,00	0,20	0,54
<i>4sc</i>	10,82	0,56	1,32
<i>4ec</i>	9,05	1,02	1,58
<i>4tc</i>	0,00	0,21	0,26
<i>5sc</i>	16,97	0,50	2,00
<i>5ec</i>	10,25	0,49	2,11
<i>5tc</i>	0,00	0,23	0,54

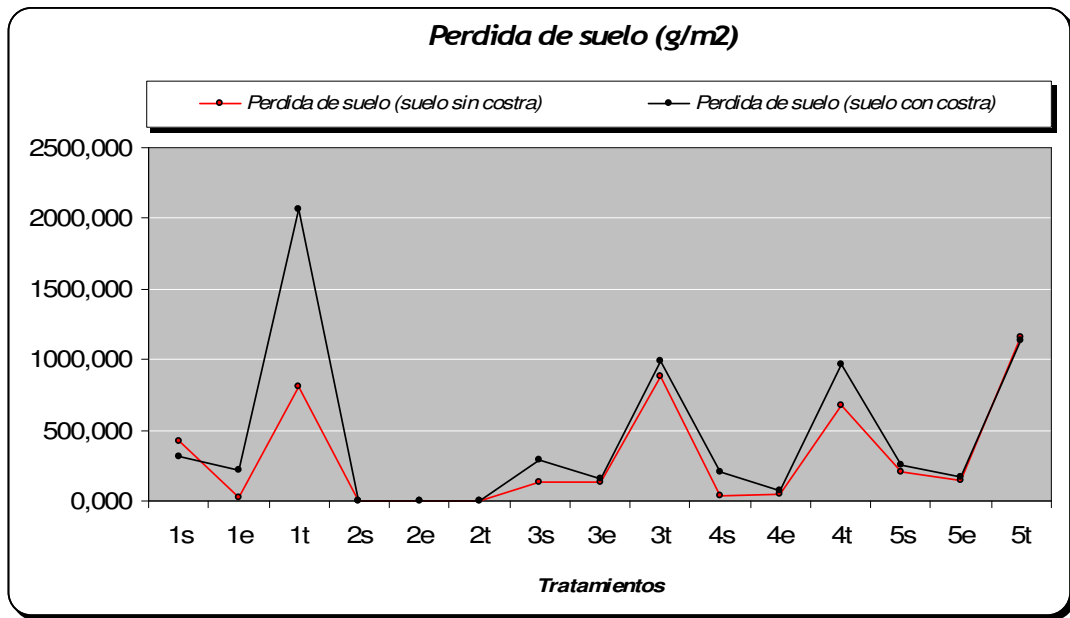
Anexo III.3. Variables dependientes de la escorrentia



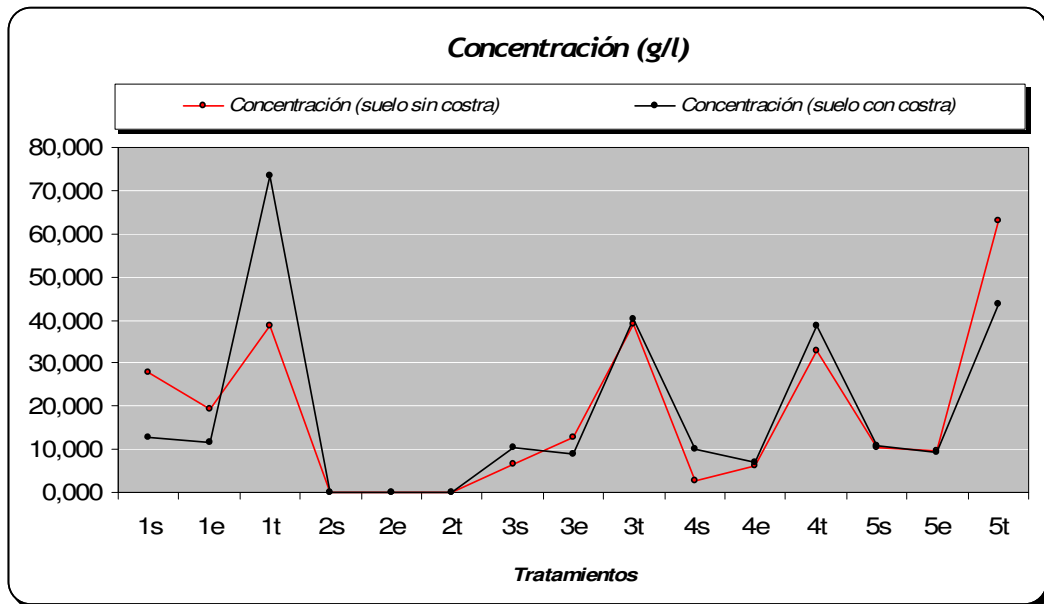
Anexo III.4. Dinámica de la infiltración durante el experimento en los tratamientos superficial, enterrado y testigo (con costra y sin costra).



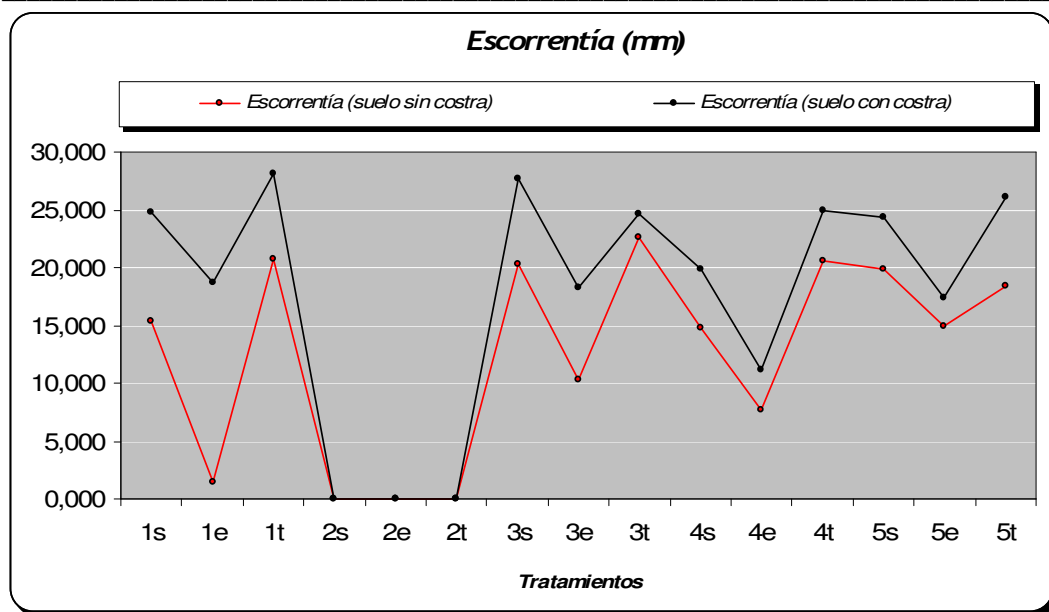
Anexo III.5. Tasa de infiltración estimada con la ecuación de Horton.



Anexo III.6 Dinámica de la pérdida de suelo durante el experimento en los tratamientos superficial, enterrado y testigo (con costra y sin costra).



Anexo III.7. Dinámica de la concentración durante el experimento en los tratamientos superficial, enterrado y testigo (con costra y sin costra).



Anexo III.8. Dinámica de la escorrentía durante el experimento en los tratamientos superficial, enterrado y testigo (con costra y sin costra).

<i>Tratamientos</i>	<i>3 minutos</i>	<i>6 minutos</i>	<i>9 minutos</i>	<i>12 minutos</i>	<i>15 minutos</i>	<i>18 minutos</i>	<i>21 minutos</i>	<i>Total</i>
<i>Iss</i>	0,600	1,000	1,000	1,200	1,250	1,250	1,250	7,550
<i>Isc</i>	1,150	1,520	1,750	1,950	1,900	1,950	1,900	12,120
<i>Ies</i>	0,000	0,100	0,115	0,120	0,125	0,140	0,140	0,740
<i>Iec</i>	0,200	1,100	1,400	1,600	1,600	1,600	1,650	9,150
<i>Its</i>	0,750	1,610	1,610	1,610	1,610	1,610	1,350	10,150
<i>Itc</i>	1,120	1,950	2,000	2,200	2,100	2,200	2,200	13,770
<i>2ss</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>2sc</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>2es</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>2ec</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>2ts</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>2tc</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>3ss</i>	0,400	1,350	1,650	1,700	1,700	1,700	1,450	9,950
<i>3sc</i>	0,820	2,010	2,090	2,220	2,230	2,100	2,100	13,570
<i>3es</i>	0,270	0,770	0,680	0,660	0,810	0,900	0,920	5,010
<i>3ec</i>	0,250	1,300	1,500	1,470	1,400	1,600	1,400	8,920
<i>3ts</i>	0,500	1,460	1,750	1,750	1,800	1,900	1,900	11,060
<i>3tc</i>	0,900	1,650	1,850	2,000	1,900	1,950	1,850	12,100
<i>4ss</i>	0,250	0,850	1,260	1,260	1,350	1,200	1,100	7,270
<i>4sc</i>	0,660	1,450	1,250	1,600	1,650	1,650	1,500	9,760
<i>4es</i>	0,120	0,500	0,550	0,600	0,600	0,750	0,650	3,770
<i>4ec</i>	0,250	0,700	0,900	0,900	0,900	0,850	1,000	5,500
<i>4ts</i>	0,600	1,300	1,600	1,600	1,600	1,650	1,700	10,050
<i>4tc</i>	0,800	1,750	1,900	2,080	1,900	1,800	2,000	12,230
<i>5ss</i>	0,200	0,900	1,150	1,650	2,000	2,000	1,800	9,700
<i>5sc</i>	0,620	2,300	2,300	2,200	0,350	1,900	2,230	11,900
<i>5es</i>	0,850	1,100	0,900	1,050	1,100	1,150	1,150	7,300
<i>5ec</i>	0,200	1,100	1,350	1,400	1,500	1,500	1,500	8,550
<i>5ts</i>	0,500	1,500	1,400	1,420	1,400	1,390	1,390	9,000
<i>5tc</i>	1,050	1,800	1,900	2,000	2,000	2,000	2,000	12,750

Anexo III.9. Cuantificación de los valores de escorrentía (1)

<i>Tratamientos</i>	<i>3 minutos</i>	<i>6 minutos</i>	<i>9 minutos</i>	<i>12 minutos</i>	<i>15 minutos</i>	<i>18 minutos</i>	<i>21 minutos</i>	<i>Total</i>
<i>1ss</i>	1,224	2,041	2,041	2,449	2,551	2,551	2,551	15,408
<i>1sc</i>	2,347	3,102	3,571	3,980	3,878	3,980	3,878	24,735
<i>1es</i>	0,000	0,204	0,235	0,245	0,255	0,286	0,286	1,510
<i>1ec</i>	0,408	2,245	2,857	3,265	3,265	3,265	3,367	18,673
<i>1ts</i>	1,531	3,286	3,286	3,286	3,286	3,286	2,755	20,714
<i>1tc</i>	2,286	3,980	4,082	4,490	4,286	4,490	4,490	28,102
<i>2ss</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>2sc</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>2es</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>2ec</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>2ts</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>2tc</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>3ss</i>	0,816	2,755	3,367	3,469	3,469	3,469	2,959	20,306
<i>3sc</i>	1,673	4,102	4,265	4,531	4,551	4,286	4,286	27,694
<i>3es</i>	0,551	1,571	1,388	1,347	1,653	1,837	1,878	10,224
<i>3ec</i>	0,510	2,653	3,061	3,000	2,857	3,265	2,857	18,204
<i>3ts</i>	1,020	2,980	3,571	3,571	3,673	3,878	3,878	22,571
<i>3tc</i>	1,837	3,367	3,776	4,082	3,878	3,980	3,776	24,694
<i>4ss</i>	0,510	1,735	2,571	2,571	2,755	2,449	2,245	14,837
<i>4sc</i>	1,347	2,959	2,551	3,265	3,367	3,367	3,061	19,918
<i>4es</i>	0,245	1,020	1,122	1,224	1,224	1,531	1,327	7,694
<i>4ec</i>	0,510	1,429	1,837	1,837	1,837	1,735	2,041	11,224
<i>4ts</i>	1,224	2,653	3,265	3,265	3,265	3,367	3,469	20,510
<i>4tc</i>	1,633	3,571	3,878	4,245	3,878	3,673	4,082	24,959
<i>5ss</i>	0,408	1,837	2,347	3,367	4,082	4,082	3,673	19,796
<i>5sc</i>	1,265	4,694	4,694	4,490	0,714	3,878	4,551	24,286
<i>5es</i>	1,735	2,245	1,837	2,143	2,245	2,347	2,347	14,898
<i>5ec</i>	0,408	2,245	2,755	2,857	3,061	3,061	3,061	17,449
<i>5ts</i>	1,020	3,061	2,857	2,898	2,857	2,837	2,837	18,367
<i>5tc</i>	2,143	3,673	3,878	4,082	4,082	4,082	4,082	26,020

Anexo III.10. Cuantificación de los valores de escorrentía (mm)

<i>Tratamientos</i>	<i>3 minutos</i>	<i>6 minutos</i>	<i>9 minutos</i>	<i>12 minutos</i>	<i>15 minutos</i>	<i>18 minutos</i>	<i>21 minutos</i>	<i>Total</i>
<i>1ss</i>	24,490	40,816	40,816	48,980	51,020	51,020	51,020	308,163
<i>1sc</i>	46,939	62,041	71,429	79,592	77,551	79,592	77,551	494,694
<i>1es</i>	0,000	4,082	4,694	4,898	5,102	5,714	5,714	30,204
<i>1ec</i>	8,163	44,898	57,143	65,306	65,306	65,306	67,347	373,469
<i>1ts</i>	30,612	65,714	65,714	65,714	65,714	65,714	55,102	414,286
<i>1tc</i>	45,714	79,592	81,633	89,796	85,714	89,796	89,796	562,041
<i>2ss</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>2sc</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>2es</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>2ec</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>2ts</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>2tc</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>3ss</i>	16,327	55,102	67,347	69,388	69,388	69,388	59,184	406,122
<i>3sc</i>	33,469	82,041	85,306	90,612	91,020	85,714	85,714	553,878
<i>3es</i>	11,020	31,429	27,755	26,939	33,061	36,735	37,551	204,490
<i>3ec</i>	10,204	53,061	61,224	60,000	57,143	65,306	57,143	364,082
<i>3ts</i>	20,408	59,592	71,429	71,429	73,469	77,551	77,551	451,429
<i>3tc</i>	36,735	67,347	75,510	81,633	77,551	79,592	75,510	493,878
<i>4ss</i>	10,204	34,694	51,429	51,429	55,102	48,980	44,898	296,735
<i>4sc</i>	26,939	59,184	51,020	65,306	67,347	67,347	61,224	398,367
<i>4es</i>	4,898	20,408	22,449	24,490	24,490	30,612	26,531	153,878
<i>4ec</i>	10,204	28,571	36,735	36,735	36,735	34,694	40,816	224,490
<i>4ts</i>	24,490	53,061	65,306	65,306	65,306	67,347	69,388	410,204
<i>4tc</i>	32,653	71,429	77,551	84,898	77,551	73,469	81,633	499,184
<i>5ss</i>	8,163	36,735	46,939	67,347	81,633	81,633	73,469	395,918
<i>5sc</i>	25,306	93,878	93,878	89,796	14,286	77,551	91,020	485,714
<i>5es</i>	34,694	44,898	36,735	42,857	44,898	46,939	46,939	297,959
<i>5ec</i>	8,163	44,898	55,102	57,143	61,224	61,224	61,224	348,980
<i>5ts</i>	20,408	61,224	57,143	57,959	57,143	56,735	56,735	367,347
<i>5tc</i>	42,857	73,469	77,551	81,633	81,633	81,633	81,633	520,408

Anexo III.11. Cuantificación de los valores de escorrentía (mm/h)

<i>Tratamientos</i>	<i>3 minutos</i>	<i>6 minutos</i>	<i>9 minutos</i>	<i>12 minutos</i>	<i>15 minutos</i>	<i>18 minutos</i>	<i>21 minutos</i>	<i>Total</i>
<i>1ss</i>	13,4	40,1	25,84	34,11	29,5	32,02	34,33	209,300
<i>1sc</i>	14,68	27,86	22,11	23,25	22,81	22,78	21,45	154,940
<i>1es</i>	0	2,07	2,12	1,75	2,38	3,28	2,67	14,270
<i>1ec</i>	2,33	18,54	17,76	26,65	15,64	12,68	14,09	107,690
<i>1ts</i>	22,04	52,97	61,92	74,65	62,9	59,86	59,59	393,930
<i>1tc</i>	87,53	158,85	148,97	158,60	145,82	156,27	157,39	1013,430
<i>2ss</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000
<i>2sc</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000
<i>2es</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000
<i>2ec</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000
<i>2ts</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000
<i>2tc</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000
<i>3ss</i>	4,26	16,87	13,44	8,02	7,89	5,42	8,97	64,870
<i>3sc</i>	10,93	25,8	22,59	21,54	20,67	22,1	20,44	144,070
<i>3es</i>	3,980	13,350	9,210	8,900	9,100	10,220	9,510	64,270
<i>3ec</i>	2,75	13,82	17,50	12,76	10,45	12,35	9,52	79,150
<i>3ts</i>	68,43	63,11	70,13	62,62	25,26	72,5	68,37	430,420
<i>3tc</i>	49,95	72,24	77,74	68,73	72,53	67,67	77,29	486,150
<i>4ss</i>	0,86	2,6	3,82	3,84	2,97	3,04	2,51	19,640
<i>4sc</i>	8,45	19,63	15,36	14,05	14,05	14,44	12,73	98,710
<i>4es</i>	1,45	4,79	3,86	2,91	3,44	4,47	3,09	24,010
<i>4ec</i>	1,45	7,35	7,5	5,87	5,66	4,31	5,93	38,070
<i>4ts</i>	21,2	40,91	57,16	58,89	45,33	51,72	54,86	330,070
<i>4tc</i>	29,35	62,02	72,41	88	71,92	72,29	76,22	472,210
<i>5ss</i>	3,45	14,02	14,23	22,16	18,84	15,06	15,13	102,890
<i>5sc</i>	9,26	25,92	21,51	20,16	24,24	11,81	14,03	126,930
<i>5es</i>	1,16	17,32	11,65	11,77	11,99	9,61	6,79	70,290
<i>5ec</i>	1,63	15,73	14,62	12,20	12,71	11,20	12,09	80,180
<i>5ts</i>	61,07	90,48	86,6	94,08	86,31	78,98	68,8	566,320
<i>5tc</i>	49,34	73,53	79,82	96,86	92,33	91,58	73,55	557,010

Anexo III.12. Cuantificación de los valores de pérdida de suelo (g)

Tratamientos	3 minutos	6 minutos	9 minutos	12 minutos	15 minutos	18 minutos	21 minutos
<i>1ss</i>	22,333	40,100	25,840	28,425	23,600	25,616	27,464
<i>1sc</i>	12,765	18,329	12,634	11,923	12,005	11,682	11,289
<i>1es</i>	0,000	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000	6,000
<i>1ec</i>	11,650	16,855	12,686	16,656	9,775	7,925	8,539
<i>1ts</i>	29,387	32,901	38,460	46,366	39,068	37,180	44,141
<i>1tc</i>	78,152	81,462	74,485	72,091	69,438	71,032	71,541
<i>2ss</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>2sc</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>2es</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>2ec</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>2ts</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>2tc</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>3ss</i>	10,650	12,496	8,145	4,718	4,641	3,188	6,186
<i>3sc</i>	13,329	12,836	10,809	9,703	9,269	10,524	9,733
<i>3es</i>	14,741	17,338	13,544	13,485	11,235	11,356	10,337
<i>3ec</i>	11,000	10,631	11,667	8,680	7,464	7,719	6,800
<i>3ts</i>	136,860	43,226	40,074	35,783	14,033	38,158	35,984
<i>3tc</i>	55,500	43,782	42,022	34,365	38,174	34,703	41,778
<i>4ss</i>	3,440	3,059	3,032	3,048	2,200	2,533	2,282
<i>4sc</i>	12,803	13,538	12,288	8,781	8,515	8,752	8,487
<i>4es</i>	12,083	9,580	7,018	4,850	5,733	5,960	4,754
<i>4ec</i>	5,800	10,500	8,333	6,522	6,289	5,071	5,930
<i>4ts</i>	35,333	31,469	35,725	36,806	28,331	31,345	32,271
<i>4tc</i>	36,688	35,440	38,111	42,308	37,853	40,161	38,110
<i>5ss</i>	17,250	15,578	12,374	13,430	9,420	7,530	8,406
<i>5sc</i>	14,935	11,270	9,352	9,164	69,257	6,216	6,291
<i>5es</i>	1,365	15,745	12,944	11,210	10,900	8,357	5,904
<i>5ec</i>	8,150	14,300	10,830	8,714	8,473	7,467	8,060
<i>5ts</i>	122,140	60,320	61,857	66,254	61,650	56,820	49,496
<i>5tc</i>	46,990	40,850	42,011	48,430	46,165	45,790	36,775

Anexo III.13. Cuantificación de los valores concentración (g/l)

<i>Tratamientos</i>	<i>3 minutos</i>	<i>6 minutos</i>	<i>9 minutos</i>	<i>12 minutos</i>	<i>15 minutos</i>	<i>18 minutos</i>	<i>21 minutos</i>	<i>Total</i>
<i>1ss</i>	27,347	81,837	52,735	69,612	60,204	65,347	70,061	427,143
<i>1sc</i>	29,959	56,857	45,122	47,449	46,551	46,490	43,776	316,204
<i>1es</i>	0,000	4,224	4,327	3,571	4,857	6,694	5,449	29,122
<i>1ec</i>	4,755	37,837	36,245	54,388	31,918	25,878	28,755	219,776
<i>1ts</i>	44,980	108,102	126,367	152,347	128,367	122,163	121,612	803,939
<i>1tc</i>	178,633	324,184	304,020	323,673	297,592	318,918	321,204	2068,224
<i>2ss</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>2sc</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>2es</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>2ec</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>2ts</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>2tc</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>3ss</i>	8,694	34,429	27,429	16,367	16,102	11,061	18,306	132,388
<i>3sc</i>	22,306	52,653	46,102	43,959	42,184	45,102	41,714	294,020
<i>3es</i>	8,122	27,245	18,796	18,163	18,571	20,857	19,408	131,163
<i>3ec</i>	5,612	28,204	35,714	26,041	21,327	25,204	19,429	161,531
<i>3ts</i>	139,653	128,796	143,122	127,796	51,551	147,959	139,531	878,408
<i>3tc</i>	101,939	147,429	158,653	140,265	148,020	138,102	157,735	992,143
<i>4ss</i>	1,755	5,306	7,796	7,837	6,061	6,204	5,122	40,082
<i>4sc</i>	17,245	40,061	31,347	28,673	28,673	29,469	25,980	201,449
<i>4es</i>	2,959	9,776	7,878	5,939	7,020	9,122	6,306	49,000
<i>4ec</i>	2,959	15,000	15,306	11,980	11,551	8,796	12,102	77,694
<i>4ts</i>	43,265	83,490	116,653	120,184	92,510	105,551	111,959	673,612
<i>4tc</i>	59,898	126,571	147,776	179,592	146,776	147,531	155,551	963,694
<i>5ss</i>	7,041	28,612	29,041	45,224	38,449	30,735	30,878	209,980
<i>5sc</i>	18,898	52,898	43,898	41,143	49,469	24,102	28,633	259,041
<i>5es</i>	2,367	35,347	23,776	24,020	24,469	19,612	13,857	143,449
<i>5ec</i>	3,327	32,102	29,837	24,898	25,939	22,857	24,673	163,633
<i>5ts</i>	124,633	184,653	176,735	192,000	176,143	161,184	140,408	1155,755
<i>5tc</i>	100,694	150,061	162,898	197,673	188,429	186,898	150,102	1136,755

Anexo III.14. Cuantificación de los valores de pérdida de suelo (g/m^2)

<i>Tratamientos</i>	<i>3 minutos</i>	<i>6 minutos</i>	<i>9 minutos</i>	<i>12 minutos</i>	<i>15 minutos</i>	<i>18 minutos</i>	<i>21 minutos</i>	<i>Total</i>
<i>1ss</i>	2,503	1,503	1,603	1,583	1,603	1,613	1,613	12,021
<i>1sc</i>	1,853	1,483	1,253	1,053	1,103	1,053	1,103	8,901
<i>1es</i>	3,003	2,903	2,888	2,883	2,878	2,863	2,863	20,281
<i>1ec</i>	2,803	1,903	1,603	1,403	1,403	1,403	1,353	11,871
<i>1ts</i>	2,253	1,393	1,393	1,393	1,393	1,393	1,653	10,871
<i>1tc</i>	1,883	1,053	1,003	0,803	0,903	0,803	0,803	7,251
<i>2ss</i>	3,003	3,003	3,003	3,003	3,003	3,003	3,003	21,021
<i>2sc</i>	3,003	3,003	3,003	3,003	3,003	3,003	3,003	21,021
<i>2es</i>	3,003	3,003	3,003	3,003	3,003	3,003	3,003	21,021
<i>2ec</i>	3,003	3,003	3,003	3,003	3,003	3,003	3,003	21,021
<i>2ts</i>	3,003	3,003	3,003	3,003	3,003	3,003	3,003	21,021
<i>2tc</i>	3,003	3,003	3,003	3,003	3,003	3,003	3,003	21,021
<i>3ss</i>	2,603	1,653	1,353	1,303	1,303	1,303	1,553	11,071
<i>3sc</i>	2,183	0,993	0,913	0,783	0,773	0,903	0,903	7,451
<i>3es</i>	2,733	2,233	2,323	2,343	2,193	2,103	2,083	16,011
<i>3ec</i>	2,753	1,703	1,503	1,533	1,603	1,403	1,603	12,101
<i>3ts</i>	2,503	1,543	1,253	1,253	1,203	1,103	1,103	9,961
<i>3tc</i>	2,103	1,353	1,153	1,003	1,103	1,053	1,153	8,921
<i>4ss</i>	2,753	2,153	1,743	1,743	1,653	1,803	1,903	13,751
<i>4sc</i>	2,343	1,553	1,753	1,403	1,353	1,353	1,503	11,261
<i>4es</i>	2,883	2,503	2,453	2,403	2,403	2,253	2,353	17,251
<i>4ec</i>	2,753	2,303	2,103	2,103	2,103	2,153	2,003	15,521
<i>4ts</i>	2,403	1,703	1,403	1,403	1,403	1,353	1,303	10,971
<i>4tc</i>	2,203	1,253	1,103	0,923	1,103	1,203	1,003	8,791
<i>5ss</i>	2,803	2,103	1,853	1,353	1,003	1,003	1,203	11,321
<i>5sc</i>	2,383	0,703	0,703	0,803	2,653	1,103	0,773	9,121
<i>5es</i>	2,153	1,903	2,103	1,953	1,903	1,853	1,853	13,721
<i>5ec</i>	2,803	1,903	1,653	1,603	1,503	1,503	1,503	12,471
<i>5ts</i>	2,503	1,503	1,603	1,583	1,603	1,613	1,613	12,021
<i>5tc</i>	1,953	1,203	1,103	1,003	1,003	1,003	1,003	8,271

Anexo III.15. Infiltración (l)

<i>Tratamientos</i>	<i>3 minutos</i>	<i>6 minutos</i>	<i>9 minutos</i>	<i>12 minutos</i>	<i>15 minutos</i>	<i>18 minutos</i>	<i>21 minutos</i>	<i>Total</i>
<i>Iss</i>	5,11	3,07	3,27	3,23	3,27	3,29	3,29	24,533
<i>Isc</i>	3,78	3,03	2,56	2,15	2,25	2,15	2,25	18,165
<i>Ies</i>	6,13	5,92	5,89	5,88	5,87	5,84	5,84	41,390
<i>Iec</i>	5,72	3,88	3,27	2,86	2,86	2,86	2,76	24,227
<i>Its</i>	4,60	2,84	2,84	2,84	2,84	2,84	3,37	22,186
<i>Itc</i>	3,84	2,15	2,05	1,64	1,84	1,64	1,64	14,798
<i>2ss</i>	6,13	6,13	6,13	6,13	6,13	6,13	6,13	42,900
<i>2sc</i>	6,13	6,13	6,13	6,13	6,13	6,13	6,13	42,900
<i>2es</i>	6,13	6,13	6,13	6,13	6,13	6,13	6,13	42,900
<i>2ec</i>	6,13	6,13	6,13	6,13	6,13	6,13	6,13	42,900
<i>2ts</i>	6,13	6,13	6,13	6,13	6,13	6,13	6,13	42,900
<i>2tc</i>	6,13	6,13	6,13	6,13	6,13	6,13	6,13	42,900
<i>3ss</i>	5,31	3,37	2,76	2,66	2,66	2,66	3,17	22,594
<i>3sc</i>	4,46	2,03	1,86	1,60	1,58	1,84	1,84	15,206
<i>3es</i>	5,58	4,56	4,74	4,78	4,48	4,29	4,25	32,676
<i>3ec</i>	5,62	3,48	3,07	3,13	3,27	2,86	3,27	24,696
<i>3ts</i>	5,11	3,15	2,56	2,56	2,46	2,25	2,25	20,329
<i>3tc</i>	4,29	2,76	2,35	2,05	2,25	2,15	2,35	18,206
<i>4ss</i>	5,62	4,39	3,56	3,56	3,37	3,68	3,88	28,063
<i>4sc</i>	4,78	3,17	3,58	2,86	2,76	2,76	3,07	22,982
<i>4es</i>	5,88	5,11	5,01	4,90	4,90	4,60	4,80	35,206
<i>4ec</i>	5,62	4,70	4,29	4,29	4,29	4,39	4,09	31,676
<i>4ts</i>	4,90	3,48	2,86	2,86	2,86	2,76	2,66	22,390
<i>4tc</i>	4,50	2,56	2,25	1,88	2,25	2,46	2,05	17,941
<i>5ss</i>	5,72	4,29	3,78	2,76	2,05	2,05	2,46	23,104
<i>5sc</i>	4,86	1,43	1,43	1,64	5,41	2,25	1,58	18,614
<i>5es</i>	4,39	3,88	4,29	3,99	3,88	3,78	3,78	28,002
<i>5ec</i>	5,72	3,88	3,37	3,27	3,07	3,07	3,07	25,451
<i>5ts</i>	5,11	3,07	3,27	3,23	3,27	3,29	3,29	24,533
<i>5tc</i>	3,99	2,46	2,25	2,05	2,05	2,05	2,05	16,880

Anexo III.16. Infiltración (mm)

<i>Tratamientos</i>	<i>3 minutos</i>	<i>6 minutos</i>	<i>9 minutos</i>	<i>12 minutos</i>	<i>15 minutos</i>	<i>18 minutos</i>	<i>21 minutos</i>	<i>media</i>
<i>1ss</i>	102,163	61,347	65,429	64,612	65,429	65,837	65,837	70,093
<i>1sc</i>	75,633	60,531	51,143	42,980	45,020	42,980	45,020	51,901
<i>1es</i>	122,571	118,490	117,878	117,673	117,469	116,857	116,857	118,257
<i>1ec</i>	114,408	77,673	65,429	57,265	57,265	57,265	55,224	69,219
<i>1ts</i>	91,959	56,857	56,857	56,857	56,857	56,857	67,469	63,388
<i>1tc</i>	76,857	42,980	40,939	32,776	36,857	32,776	32,776	42,280
<i>2ss</i>	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571
<i>2sc</i>	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571
<i>2es</i>	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571
<i>2ec</i>	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571
<i>2ts</i>	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571
<i>2tc</i>	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571
<i>3ss</i>	106,245	67,469	55,224	53,184	53,184	53,184	63,388	64,554
<i>3sc</i>	89,102	40,531	37,265	31,959	31,551	36,857	36,857	43,446
<i>3es</i>	111,551	91,143	94,816	95,633	89,510	85,837	85,020	93,359
<i>3ec</i>	112,367	69,510	61,347	62,571	65,429	57,265	65,429	70,560
<i>3ts</i>	102,163	62,980	51,143	51,143	49,102	45,020	45,020	58,082
<i>3tc</i>	85,837	55,224	47,061	40,939	45,020	42,980	47,061	52,017
<i>4ss</i>	112,367	87,878	71,143	71,143	67,469	73,592	77,673	80,181
<i>4sc</i>	95,633	63,388	71,551	57,265	55,224	55,224	61,347	65,662
<i>4es</i>	117,673	102,163	100,122	98,082	98,082	91,959	96,041	100,589
<i>4ec</i>	112,367	94,000	85,837	85,837	85,837	87,878	81,755	90,501
<i>4ts</i>	98,082	69,510	57,265	57,265	57,265	55,224	53,184	63,971
<i>4tc</i>	89,918	51,143	45,020	37,673	45,020	49,102	40,939	51,259
<i>5ss</i>	114,408	85,837	75,633	55,224	40,939	40,939	49,102	66,012
<i>5sc</i>	97,265	28,694	28,694	32,776	108,286	45,020	31,551	53,184
<i>5es</i>	87,878	77,673	85,837	79,714	77,673	75,633	75,633	80,006
<i>5ec</i>	114,408	77,673	67,469	65,429	61,347	61,347	61,347	72,717
<i>5ts</i>	102,163	61,347	65,429	64,612	65,429	65,837	65,837	70,093
<i>5tc</i>	79,714	49,102	45,020	40,939	40,939	40,939	40,939	48,227

Anexo III.17. Infiltración (mm/h)

ANEXO IV: ANÁLISIS DE REGRESIÓN

Ecuación de regresión de Philip

$$Inf = a/\sqrt{t} + b$$

<i>Tratamientos</i>	<i>3 minutos</i>	<i>6 minutos</i>	<i>9 minutos</i>	<i>12 minutos</i>	<i>15 minutos</i>	<i>18 minutos</i>	<i>21 minutos</i>	<i>Kp 1h mm/h</i>
<i>1ss</i>	92,414	77,068	70,270	66,217	63,451	61,410	59,823	51,736
<i>1sc</i>	75,108	59,153	52,084	47,871	44,995	42,872	41,223	32,814
<i>1es</i>	121,997	119,426	118,286	117,607	117,143	116,801	116,535	115,180
<i>1ec</i>	110,070	81,984	69,542	62,124	57,063	53,326	50,422	35,621
<i>1ts</i>	82,520	69,366	63,539	60,065	57,695	55,945	54,585	47,652
<i>1tc</i>	71,480	51,404	42,511	37,209	33,591	30,920	28,845	18,265
<i>2ss</i>	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571
<i>2sc</i>	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571
<i>2es</i>	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571
<i>2ec</i>	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571
<i>2ts</i>	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571
<i>2tc</i>	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571
<i>3ss</i>	98,012	75,009	64,818	58,743	54,598	51,538	49,159	37,036
<i>3sc</i>	78,790	54,491	43,725	37,308	32,929	29,696	27,183	14,377
<i>3es</i>	109,202	98,309	93,484	90,607	88,644	87,195	86,069	80,328
<i>3ec</i>	103,390	80,819	70,819	64,858	60,791	57,788	55,454	43,559
<i>3ts</i>	96,402	70,056	58,384	51,427	46,679	43,174	40,450	26,565
<i>3tc</i>	80,245	60,838	52,241	47,115	43,618	41,036	39,029	28,802
<i>4ss</i>	107,778	88,804	80,399	75,388	71,969	69,444	67,483	57,483
<i>4sc</i>	90,934	73,559	65,862	61,273	58,142	55,830	54,034	44,877
<i>4es</i>	115,913	105,378	100,710	97,928	96,029	94,627	93,538	87,986
<i>4ec</i>	109,600	96,469	90,652	87,185	84,818	83,071	81,714	74,794
<i>4ts</i>	93,927	73,332	64,208	58,769	55,057	52,317	50,188	39,334
<i>4tc</i>	81,888	60,830	51,502	45,940	42,145	39,344	37,167	26,069
<i>5ss</i>	117,634	82,143	66,420	57,047	50,650	45,929	42,259	23,555
<i>5sc</i>	76,300	60,407	53,366	49,169	46,305	44,190	42,547	34,171
<i>5es</i>	87,380	82,310	80,064	78,725	77,812	77,137	76,613	73,941
<i>5ec</i>	109,123	84,094	73,005	66,395	61,884	58,554	55,966	42,775
<i>5ts</i>	92,414	77,068	70,270	66,217	63,451	61,410	59,823	51,736
<i>5tc</i>	74,412	56,410	48,434	43,680	40,436	38,041	36,179	26,692

Anexo IV.1. Valor estimado de la tasa de infiltración (Kp) por la ecuación de regresión de Philip (mm/h)

Ecuación de regresión de Horton

$$Inf = f_c + (f_o - f_c)e^{-kt}$$

Tratamientos	3 minutos	6 minutos	9 minutos	12 minutos	15 minutos	18 minutos	21 minutos	K 1h mm/h
<i>1ss</i>	79,207	73,937	70,672	68,648	67,394	66,617	66,135	42,992
<i>1sc</i>	55,041	49,781	47,255	46,042	45,459	45,179	45,045	44,920
<i>1es</i>	120,150	119,186	118,397	117,752	117,224	116,793	116,440	114,973
<i>1ec</i>	86,527	77,391	70,140	64,386	59,820	56,196	53,321	42,813
<i>1ts</i>	70,251	65,131	61,968	60,014	58,807	58,062	57,601	56,859
<i>1tc</i>	52,782	45,376	40,712	37,774	35,924	34,759	34,024	32,779
<i>2ss</i>	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571
<i>2sc</i>	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571
<i>2es</i>	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571
<i>2ec</i>	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571
<i>2ts</i>	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571
<i>2tc</i>	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571	122,571
<i>3ss</i>	79,336	64,256	57,872	55,169	54,024	53,540	53,334	53,184
<i>3sc</i>	61,419	53,319	47,701	43,804	41,100	39,225	37,925	35,005
<i>3es</i>	88,461	73,937	70,672	68,648	67,394	66,617	66,135	85,845
<i>3ec</i>	84,801	76,714	71,002	66,968	64,118	62,106	60,684	57,303
<i>3ts</i>	66,347	60,197	55,821	52,706	50,490	48,913	47,790	45,054
<i>3tc</i>	59,892	53,253	48,940	46,137	44,316	43,133	42,365	40,944
<i>4ss</i>	88,588	77,086	72,068	69,878	68,923	68,506	68,324	68,184
<i>4sc</i>	82,728	67,890	61,057	57,910	56,461	55,794	55,487	55,225
<i>4es</i>	100,892	99,946	99,100	98,344	97,667	97,063	96,522	93,024
<i>4ec</i>	96,256	90,937	88,334	87,059	86,435	86,130	85,980	85,837
<i>4ts</i>	77,592	69,313	63,842	60,227	57,838	56,259	55,216	53,193
<i>4tc</i>	68,412	55,689	48,232	43,862	41,301	39,799	38,919	37,675
<i>5ss</i>	96,130	67,195	53,430	46,881	43,766	42,284	41,579	40,939
<i>5sc</i>	87,386	63,315	52,422	47,493	45,263	44,253	43,797	43,419
<i>5es</i>	81,096	78,305	76,940	76,272	75,946	75,786	75,708	75,633
<i>5ec</i>	81,949	74,184	69,346	66,331	64,453	63,282	62,553	61,350
<i>5ts</i>	82,041	76,082	71,839	68,818	66,666	65,135	64,044	61,380
<i>5tc</i>	60,209	50,512	45,694	43,301	42,112	41,522	41,228	40,939

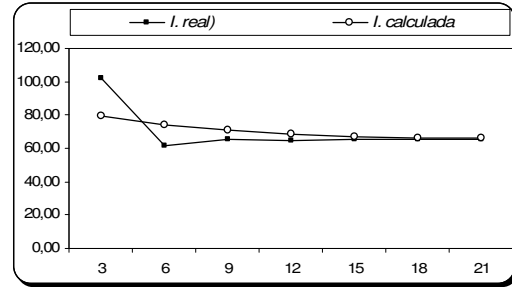
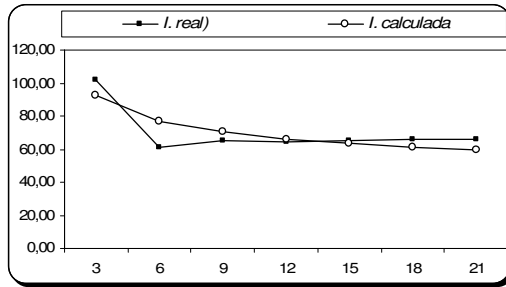
Anexo IV.2. Valor estimado de la tasa de infiltración (K) por la ecuación de regresión de Horton (mm/h)

**ANEXO V: AJUSTE DE LA TASA DE INFILTRACIÓN CON LAS ECUACIONES
DE REGRESIÓN DE PHILIP Y HORTON**

Grafica de regresión de Philip

Grafica de regresión de Horton

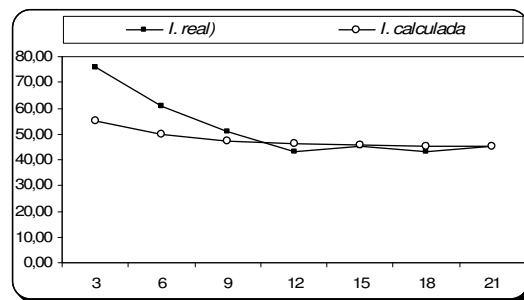
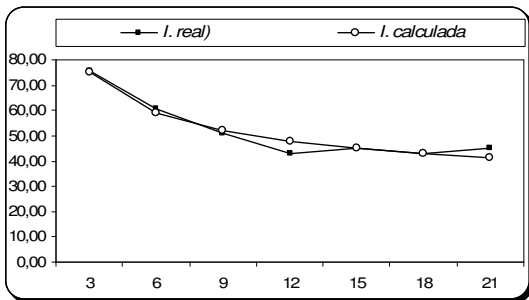
1SS



a	90,75
b	40,020
R,P	1,000
Kp 1h	51,74

fo	65,35
fc	42,99
k	0,15950
Rh	0,98863
K 1h	42,99156

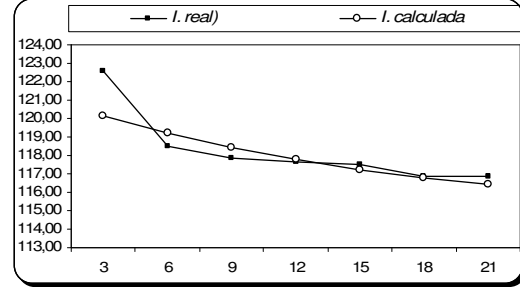
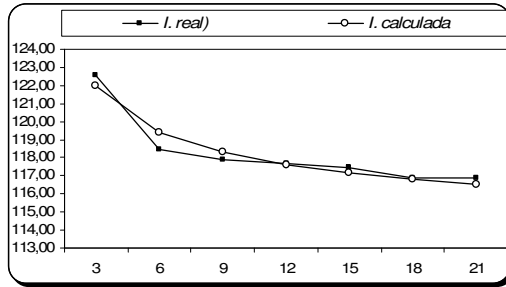
1SC



a	94,35
b	20,633
R,P	1,000
Kp 1h	32,81

fo	65,991
fc	44,92
k	0,24444
Rh	0,9000
K 1h	44,92042

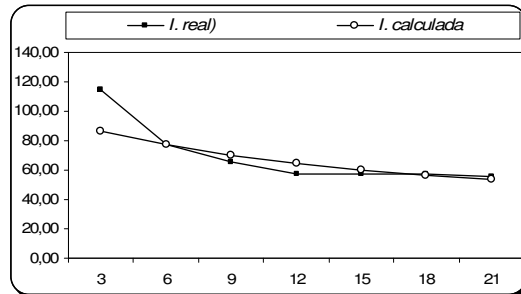
1ES



a	15,21
b	113,216
R,P	1,000
Kp 1h	115,18

fo	121,33
fc	114,86
k	0,06707
Rh	0,99769
K 1h	114,97289

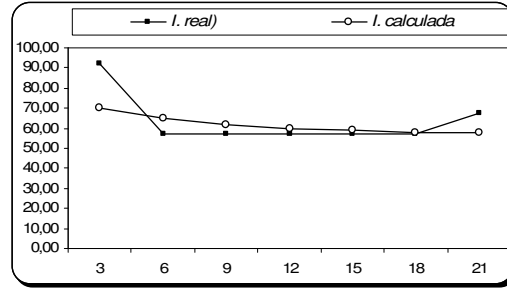
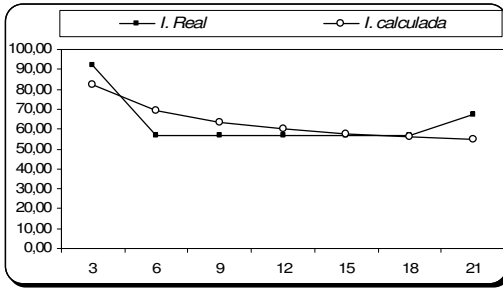
1EC



a	166,09
b	14,179
R,P	1,000
Kp 1h	35,62

fo	98,04
fc	42,27
k	0,07707
Rh	0,94079
K 1h	42,81265

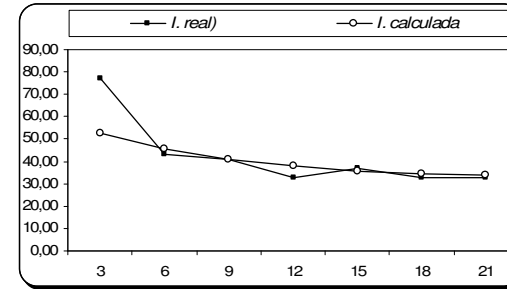
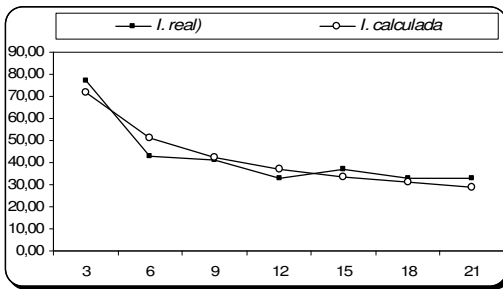
1TS



a	77,79
b	37,610
R,P	1,000
Kp 1h	47,65

fo	78,54
fc	56,86
k	0,16058
Rh	0,95787
K 1h	56,85856

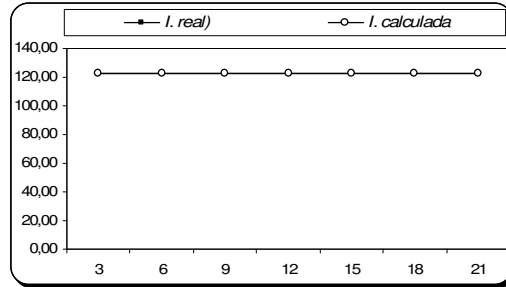
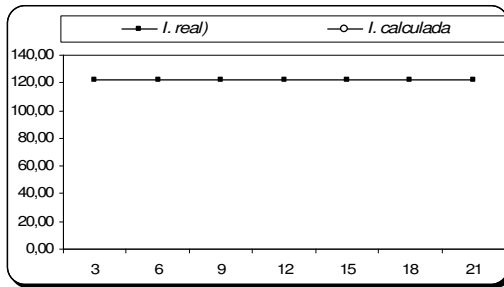
1TC



a	118,72
b	2,938
R,P	1,000
Kp 1h	18,26

fo	64,54
fc	32,78
k	0,15410
Rh	0,90933
K 1h	32,77858

2SS

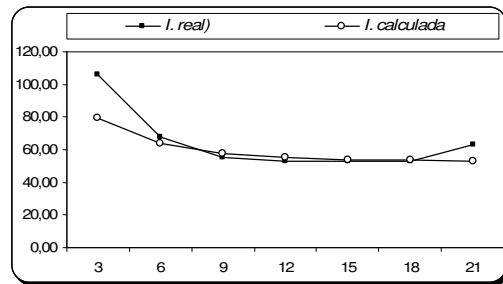
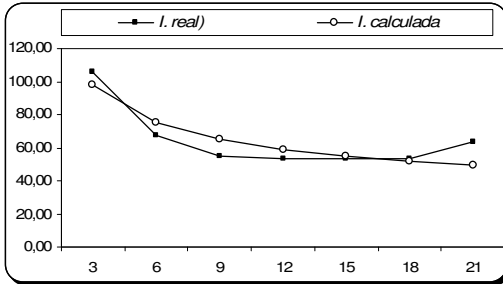


a	0,00
b	122,571
R,P	1,000
Kp 1h	122,57

fo	122,57
fc	122,57
k	0,000
Rh	1,0000
K 1h	122,57143

Obs.: este comportamiento fue semejante a los tratamientos 2SC, 2ES, 2EC, 2TS, 2TC.

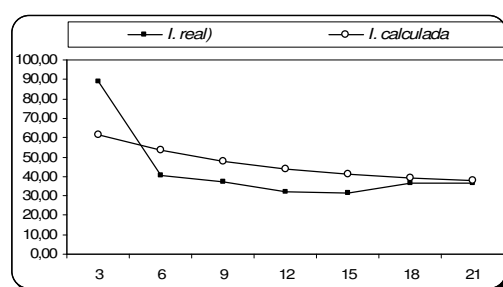
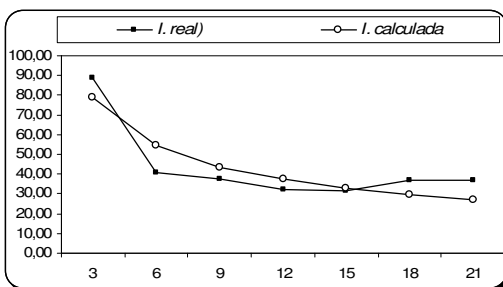
3SS



a	136,03
b	19,475
R,P	1,000
Kp 1h	37,04

fo	114,95
fc	53,18
k	0,286
Rh	0,9003
K 1h	53,18368

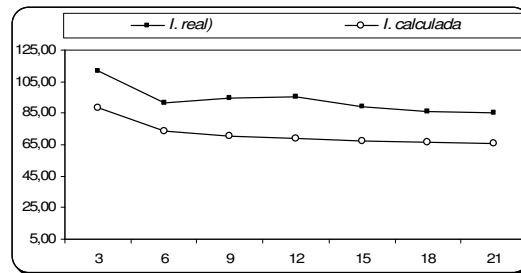
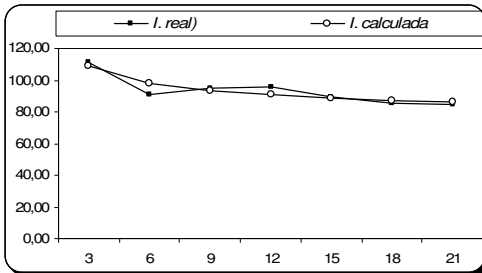
3SC



a	143,70
b	-4,174
R,P	1,000
Kp 1h	14,38

fo	73,097
fc	34,98
k	0,12194
Rh	0,99269

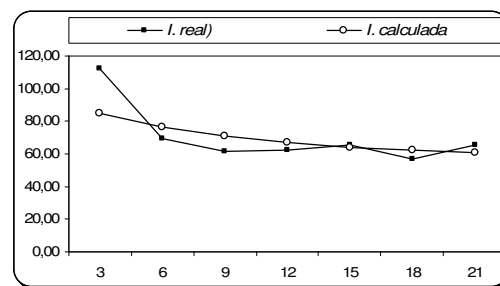
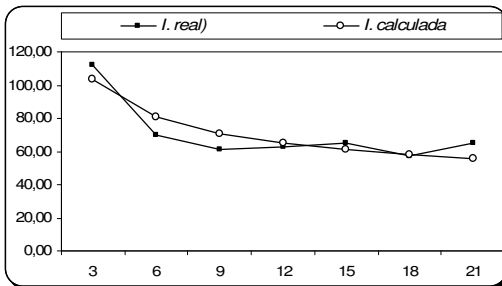
3ES



a	64,42
b	72,012
R,P	1,000
Kp 1h	80,33

fo	107,588
fc	85,02
k	0,05515
Rh	0,76886
K 1h	85,84512

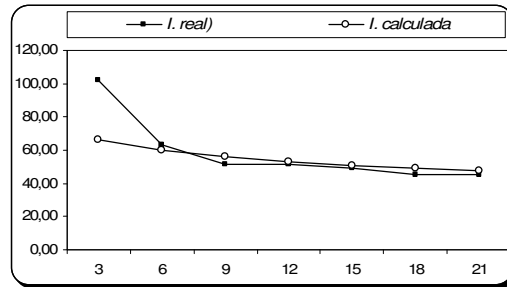
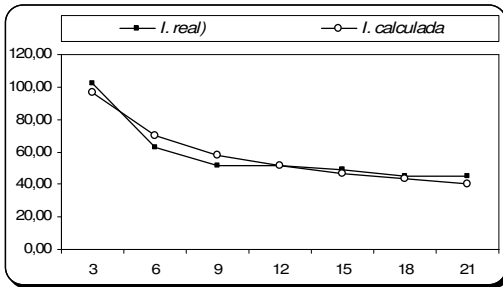
3EC



a	133,48
b	26,327
R,P	1,000
Kp 1h	43,56

fo	96,25
fc	57,27
k	0,116
Rh	0,9625
K 1h	57,30253

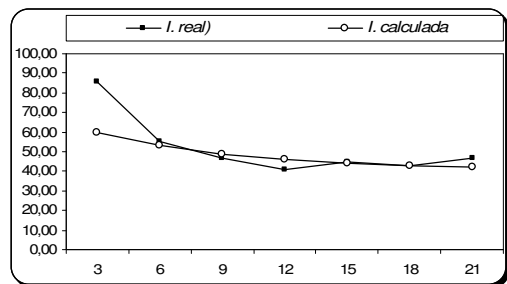
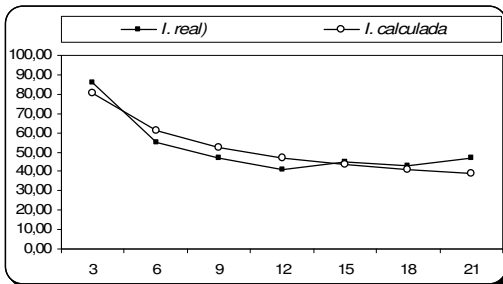
3TS



a	155,80
b	6,452
R,P	1,000
Kp 1h	26,57

fo	74,99
fc	45,02
k	0,113
Rh	0,9001
K 1h	45,05365

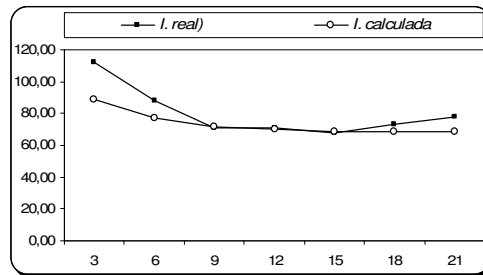
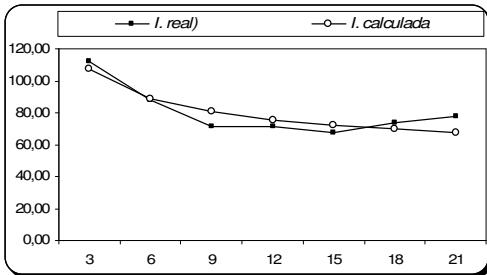
3TC



a	114,76
b	13,986
R,P	1,000
Kp 1h	28,80

fo	70,11
fc	40,94
k	0,144
Rh	0,9012
K 1h	40,94402

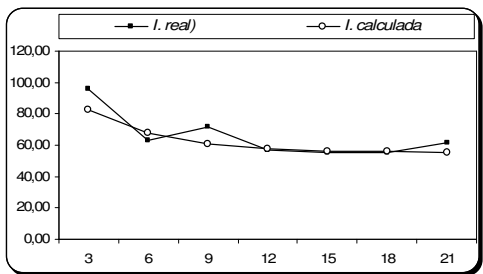
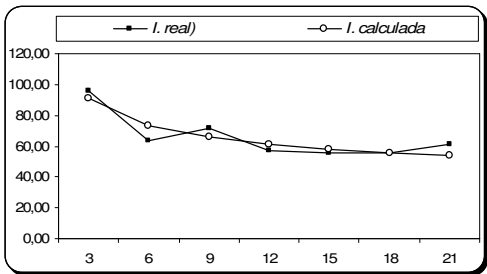
4SS



a	112,20
b	42,998
R,P	1,000
Kp 1h	57,48

fo	114,95
fc	68,18
k	0,276
Rh	0,9040
K 1h	68,18368

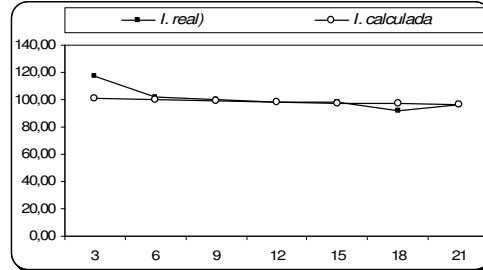
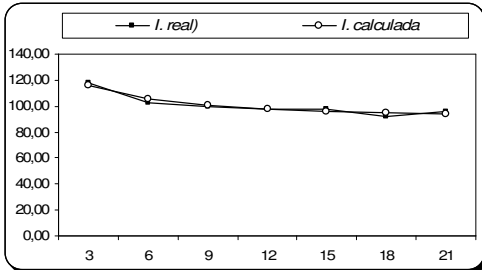
4SC



a	102,75
b	31,612
R,P	1,000
Kp 1h	44,88

fo	114,95
fc	55,22
k	0,258
Rh	0,9425
K 1h	55,22450

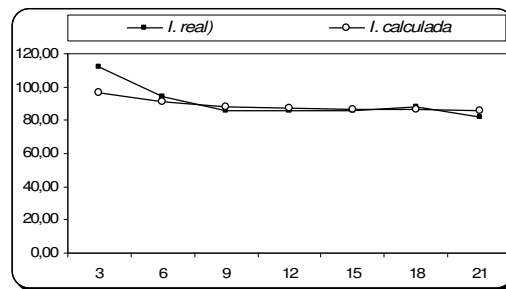
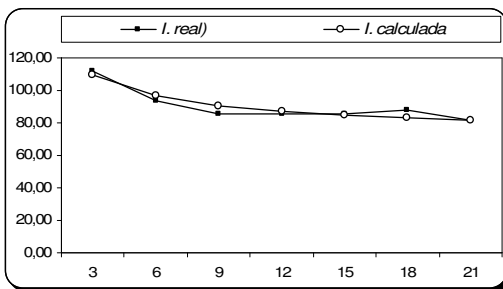
4ES



a	62,30
b	79,942
R,P	1,000
Kp 1h	87,99

fo	101,95
fc	91,96
k	0,037
Rh	0,9766
K 1h	93,02380

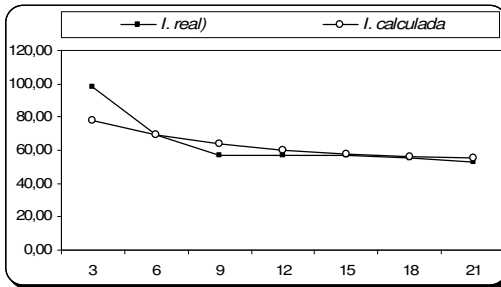
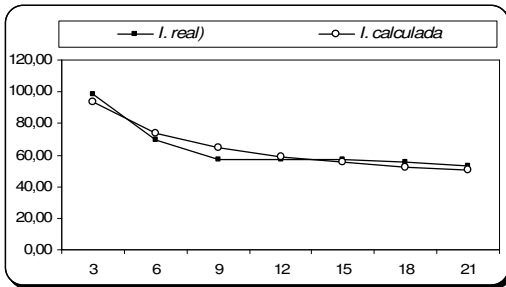
4EC



a	77,65
b	64,770
R,P	1,000
Kp 1h	74,79

fo	107,12
fc	85,84
k	0,238
Rh	0,9758
K 1h	85,83675

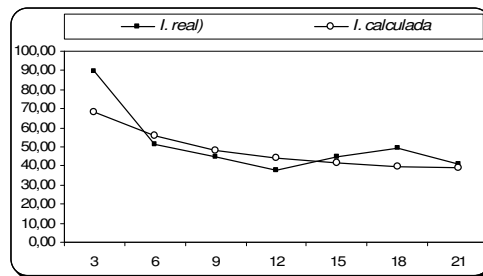
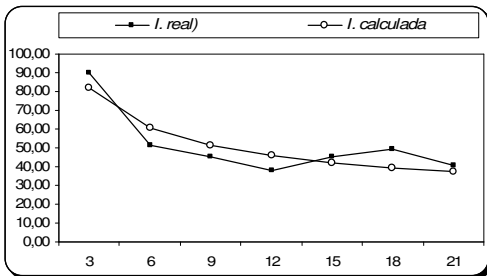
4TS



a	121,79
b	23,610
R,P	1,000
Kp 1h	39,33

fo	90,12
fc	53,18
k	0,138
Rh	0,9649
K 1h	53,19299

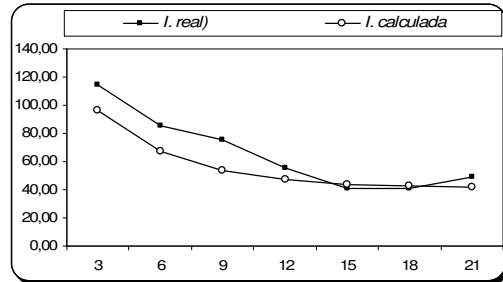
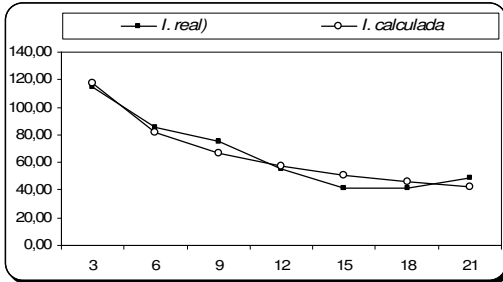
4TC



a	124,53
b	9,993
R,P	1,000
Kp 1h	26,07

fo	90,12
fc	37,67
k	0,178
Rh	0,9116
K 1h	37,67467

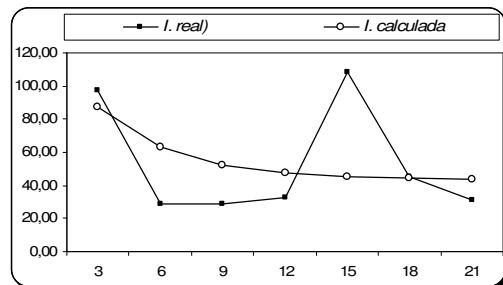
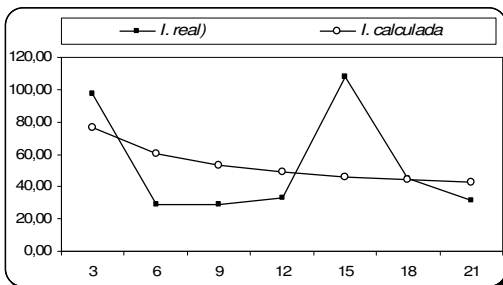
5SS



a	209,88
b	-3,541
R,P	1,000
Kp 1h	23,55

fo	156,95
fc	40,94
k	0,248
Rh	0,8323
K 1h	40,93882

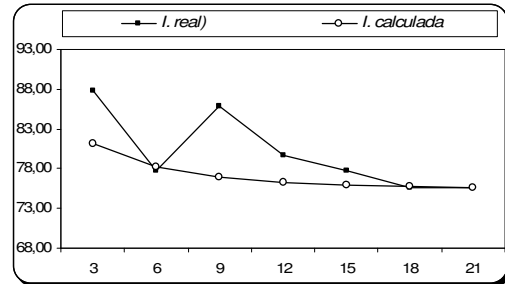
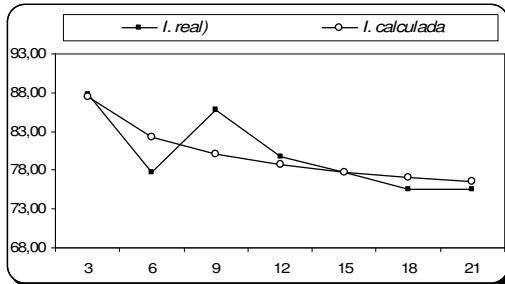
5SC



a	93,99
b	22,038
R,P	1,000
Kp 1h	34,17

fo	140,58
fc	43,42
k	0,264
Rh	0,9156
K 1h	43,41911

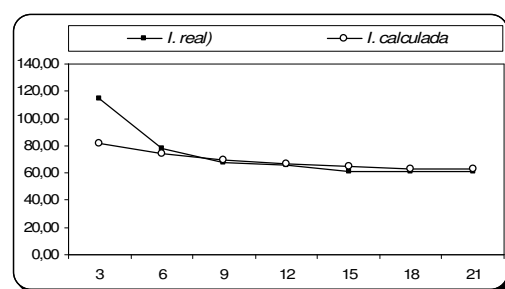
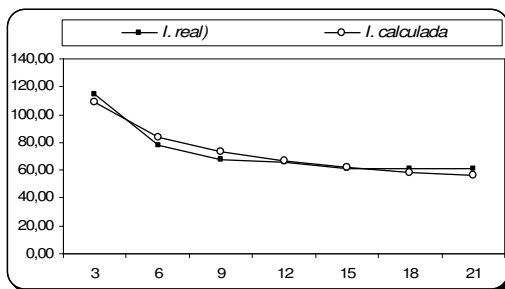
5ES



a	29,98
b	70,071
R,P	1,000
Kp 1h	73,94

fo	86,80
fc	75,63
k	0,238
Rh	0,9630
K 1h	75,63266

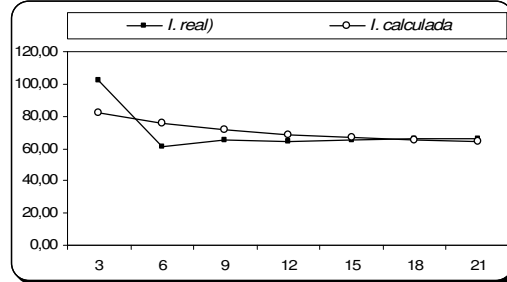
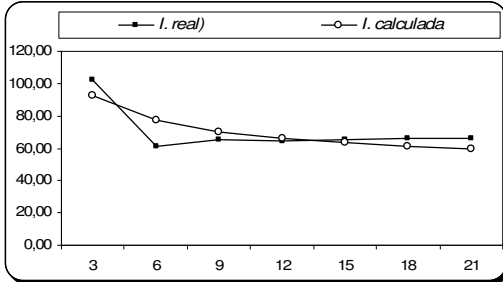
5EC



a	148,02
b	23,666
R,P	1,000
Kp 1h	42,78

fo	94,41
fc	61,35
k	0,158
Rh	0,9239
K 1h	61,34951

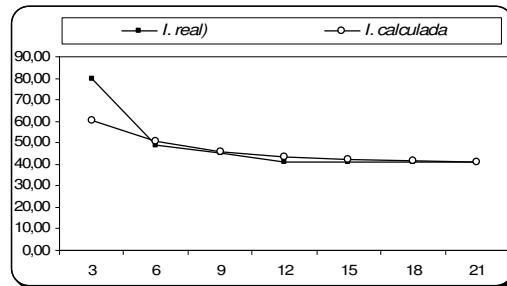
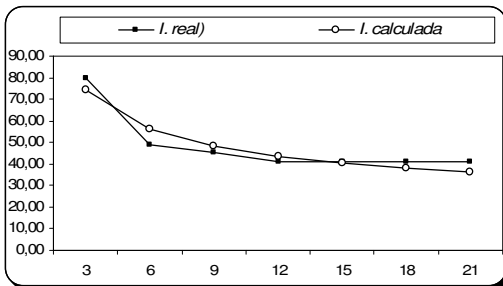
5TS



a	90,75
b	40,020
R,P	1,000
Kp 1h	51,74

fo	90,41
fc	61,35
k	0,113
Rh	0,9943
K 1h	61,37956

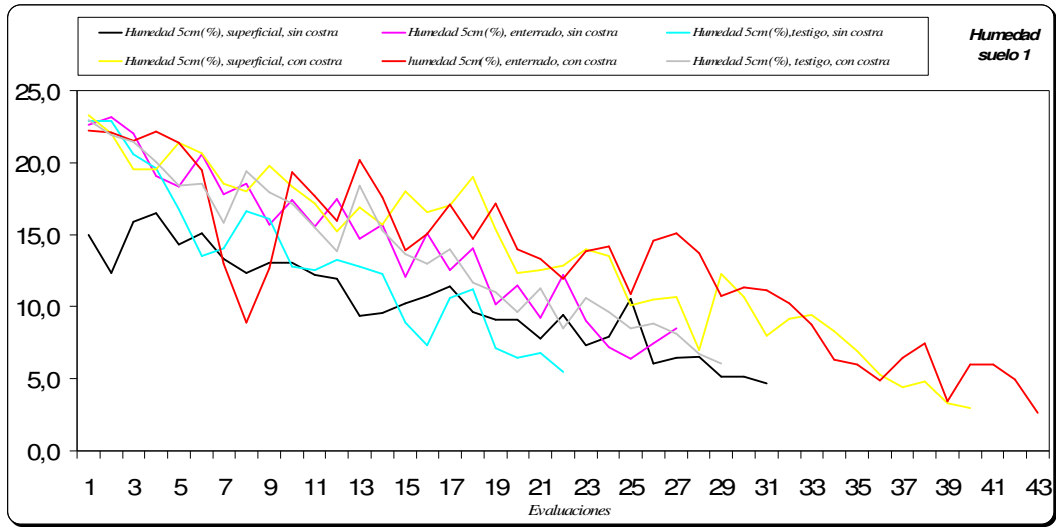
5TC



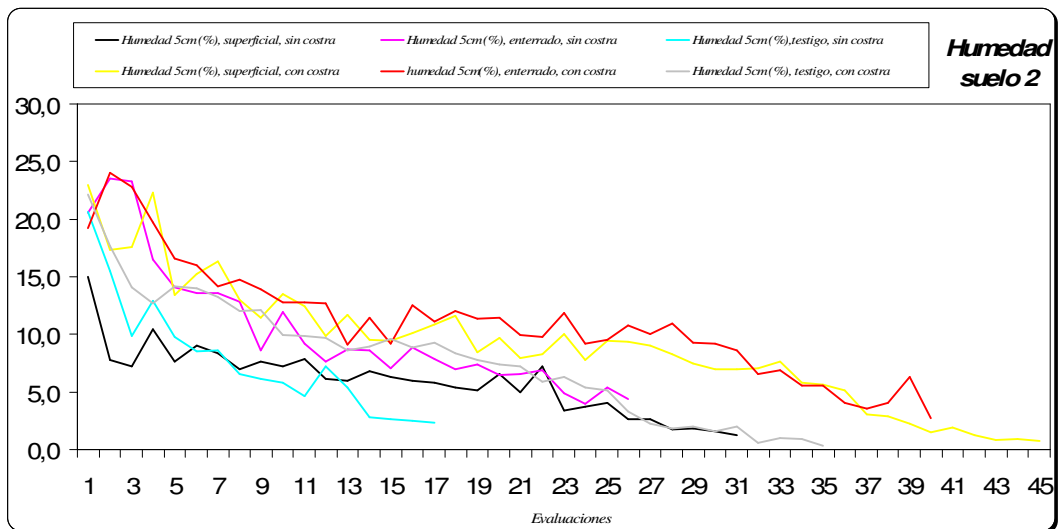
a	106,46
b	12,948
R,P	1,000
Kp 1h	26,69

fo	79,73
fc	40,94
k	0,233
Rh	0,9363
K 1h	40,93881

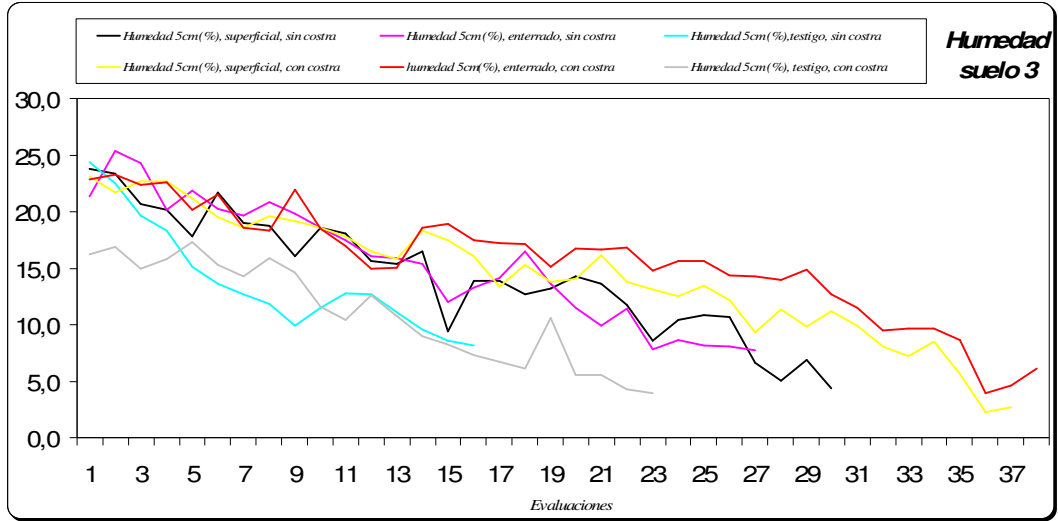
ANEXO VI: ESTUDIO DE LA HUMEDAD DEL SUELO (5 cm de profundidad)



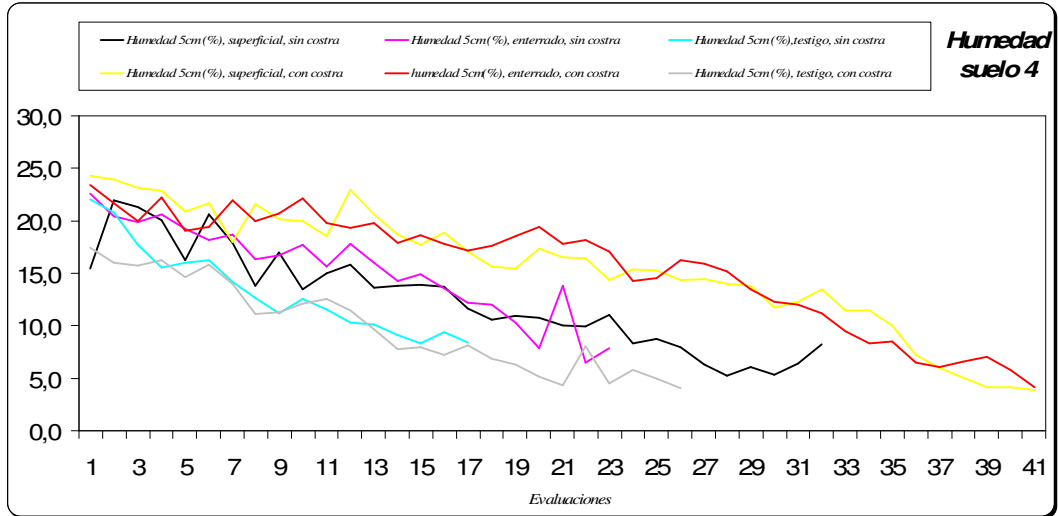
Anexo VI.1. Medición de la humedad a los 5cm de profundidad en el suelo 1



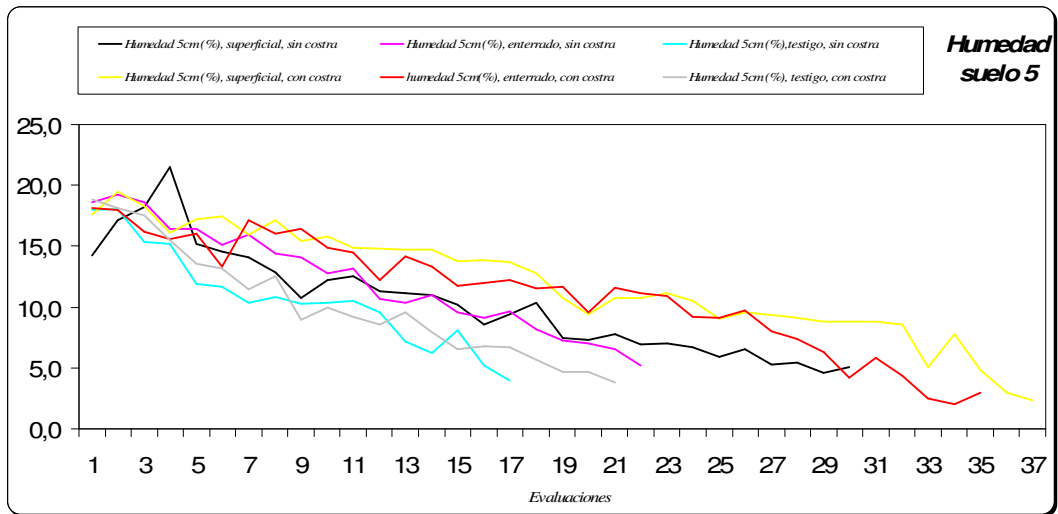
Anexo VI.2. Medición de la humedad a los 5cm de profundidad en el suelo 2



Anexo VI.3. Medición de la humedad a los 5cm de profundidad en el suelo 3

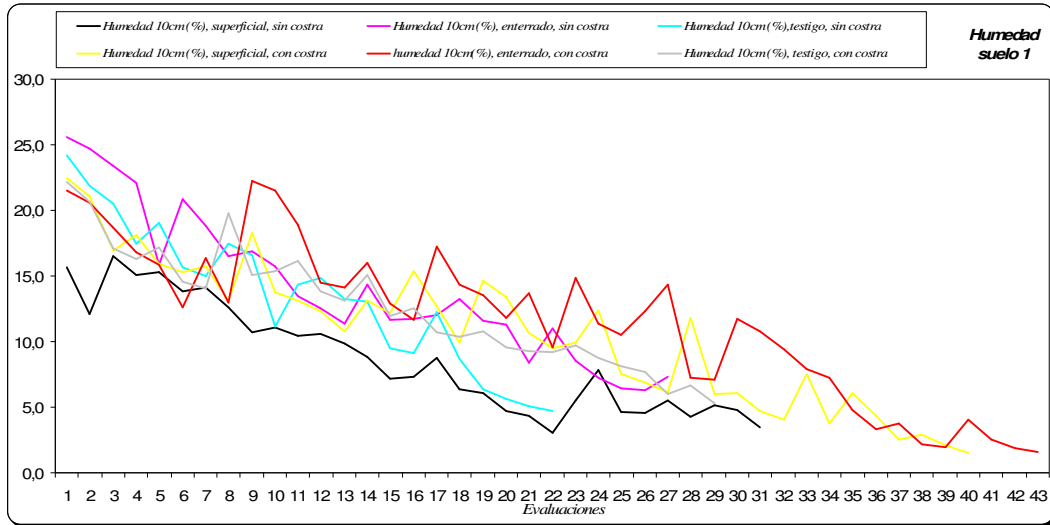


Anexo VI.4. Medición de la humedad a los 5cm de profundidad en el suelo 4

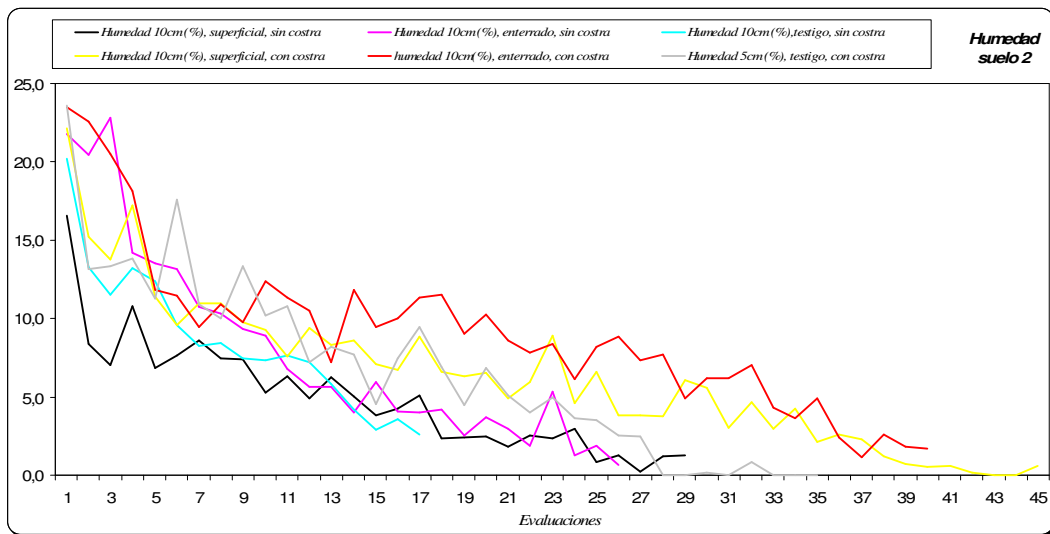


Anexo VI.5. Medición de la humedad a los 5cm de profundidad en el suelo 5

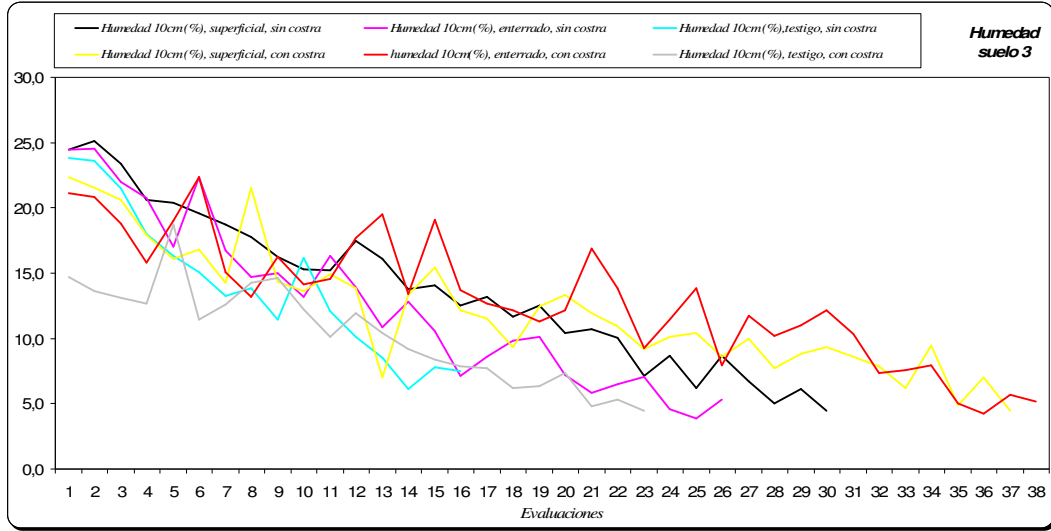
ANEXO VII: ESTUDIO DE LA HUMEDAD DEL SUELO (10 cm de profundidad)



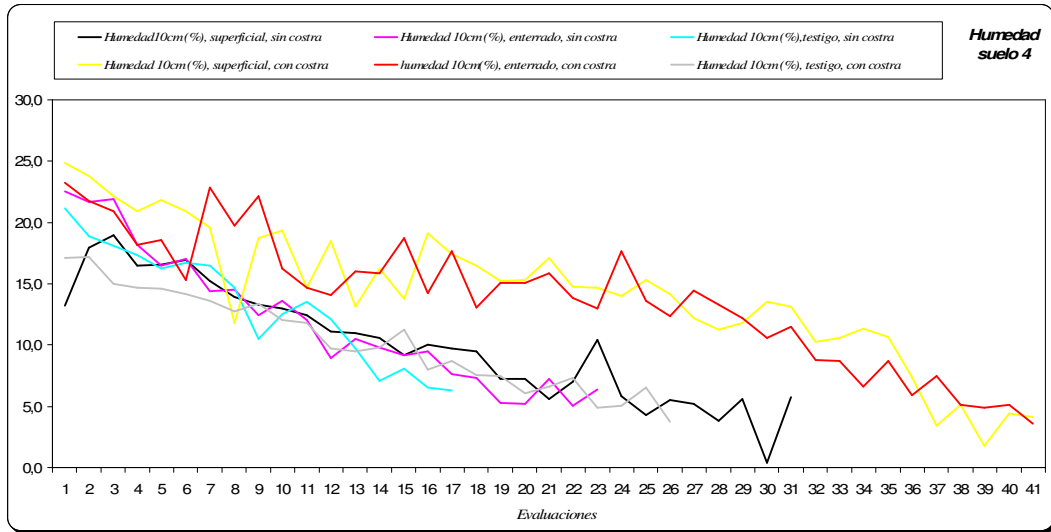
Anexo VII.1. Medición de la humedad a los 10cm de profundidad en el suelo 1



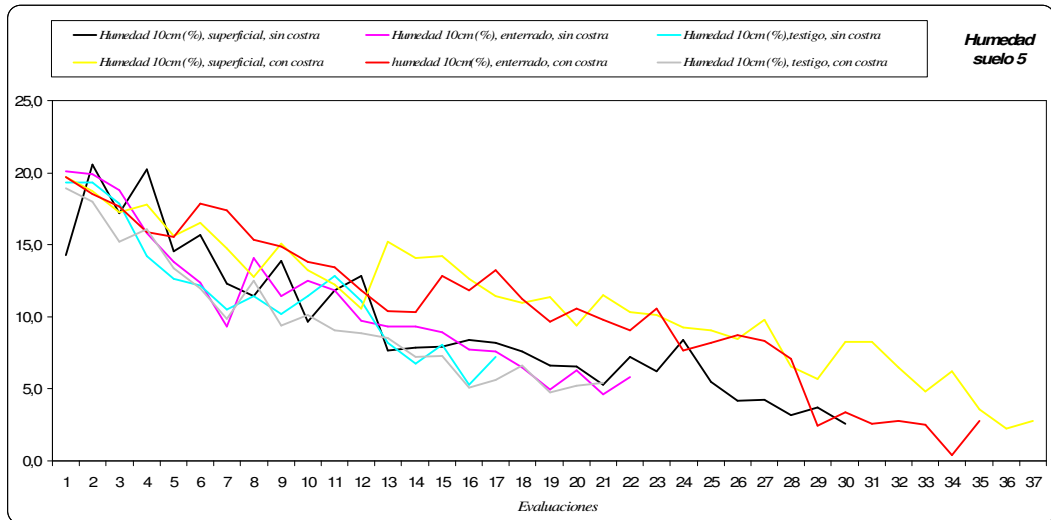
Anexo VII.2. Medición de la humedad a los 10cm de profundidad en el suelo 2



Anexo VII.3. Medición de la humedad a los 10cm de profundidad en el suelo 3

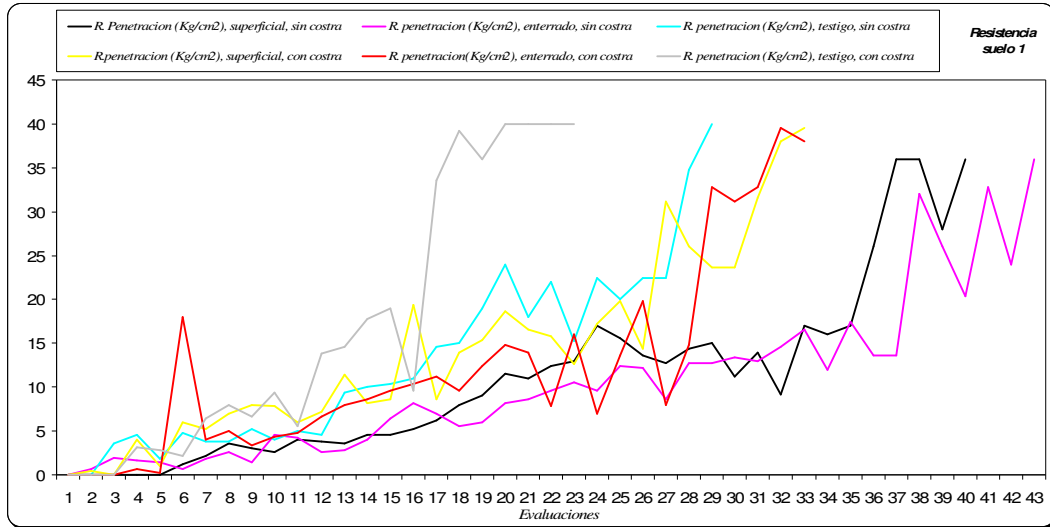


Anexo VII.4. Medición de la humedad a los 10cm de profundidad en el suelo 4

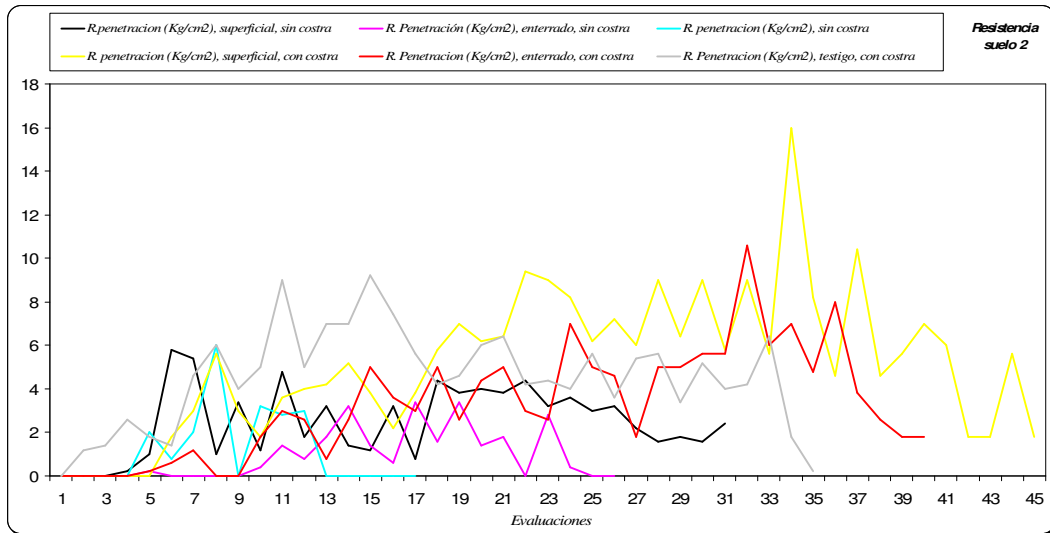


Anexo VII.5 Medición de la humedad a los 10cm de profundidad en el suelo 5

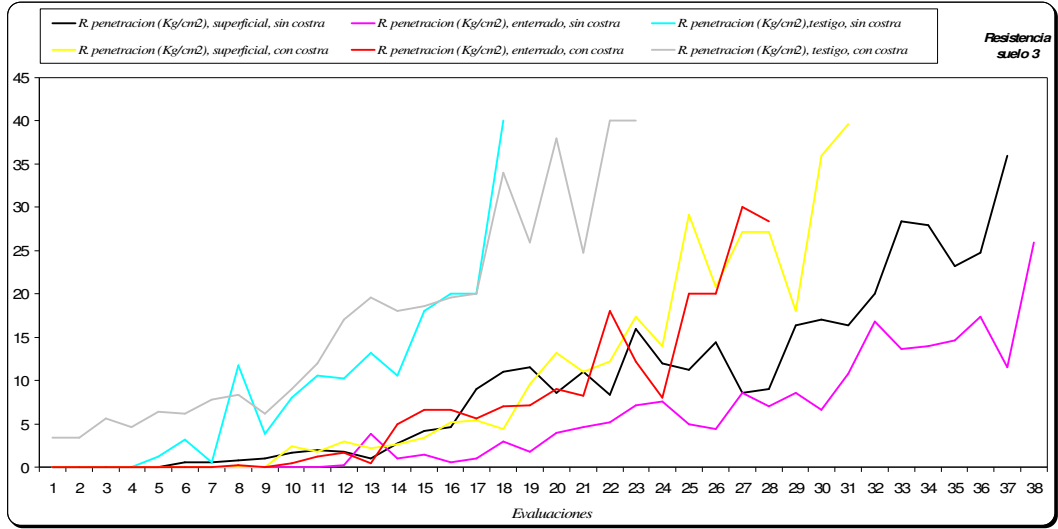
ANEXO VIII: RESISTENCIA A LA PENETRACION



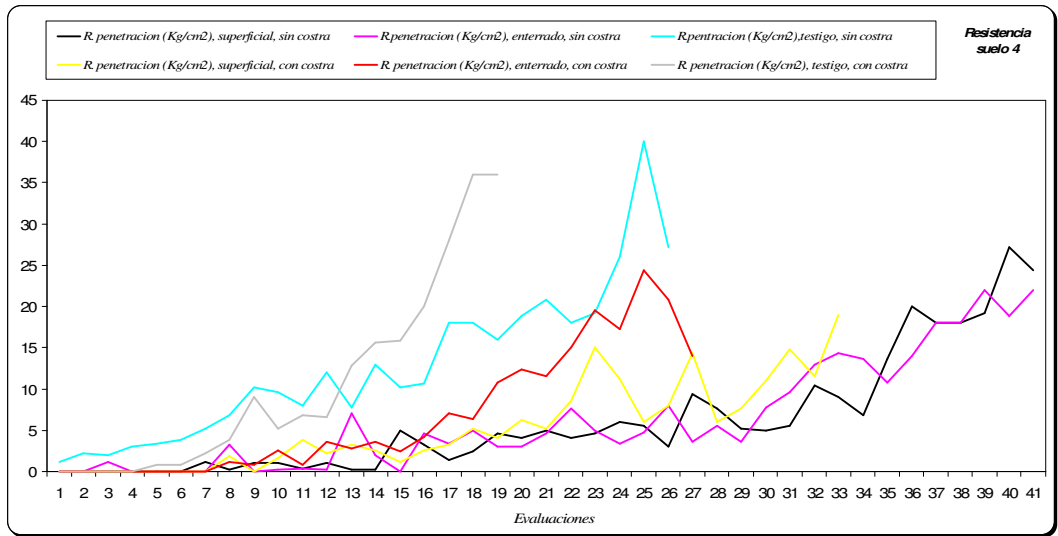
Anexo VIII.1. Medición de la resistencia a la penetración en el suelo 1



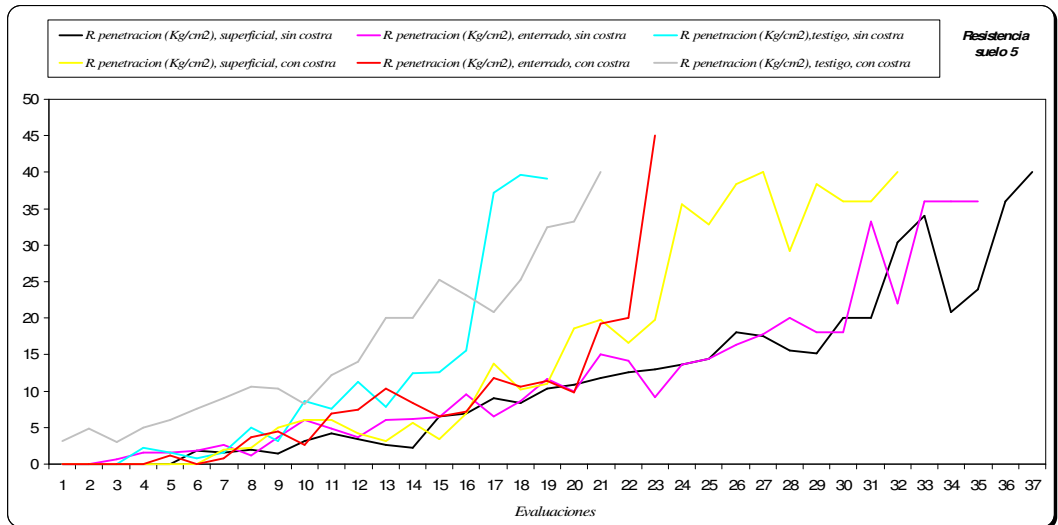
Anexo VIII.2. Medición de la resistencia a la penetración en el suelo 2



Anexo VIII.3. Medición de la resistencia a la penetración en el suelo 3

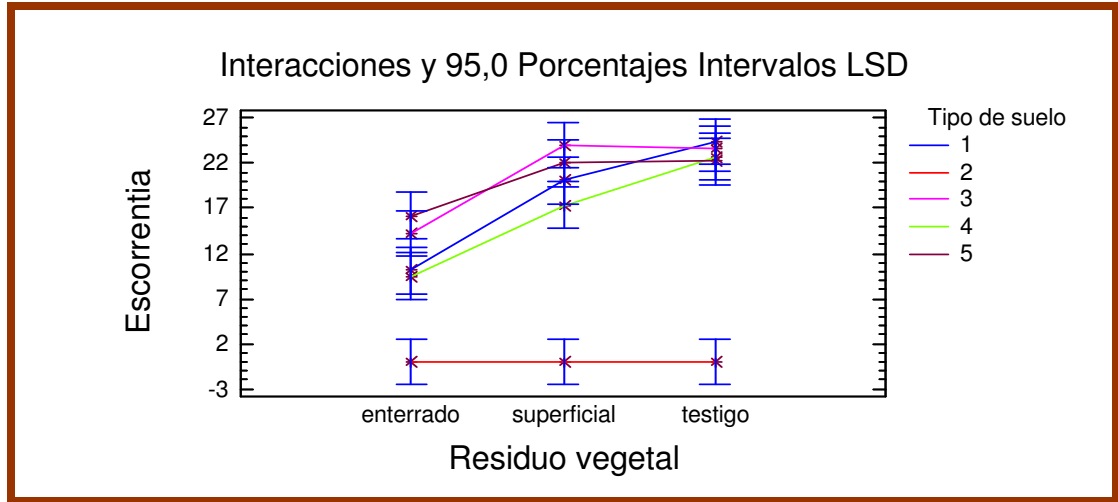


Anexo VIII.4. Medición de la resistencia a la penetración en el suelo 4

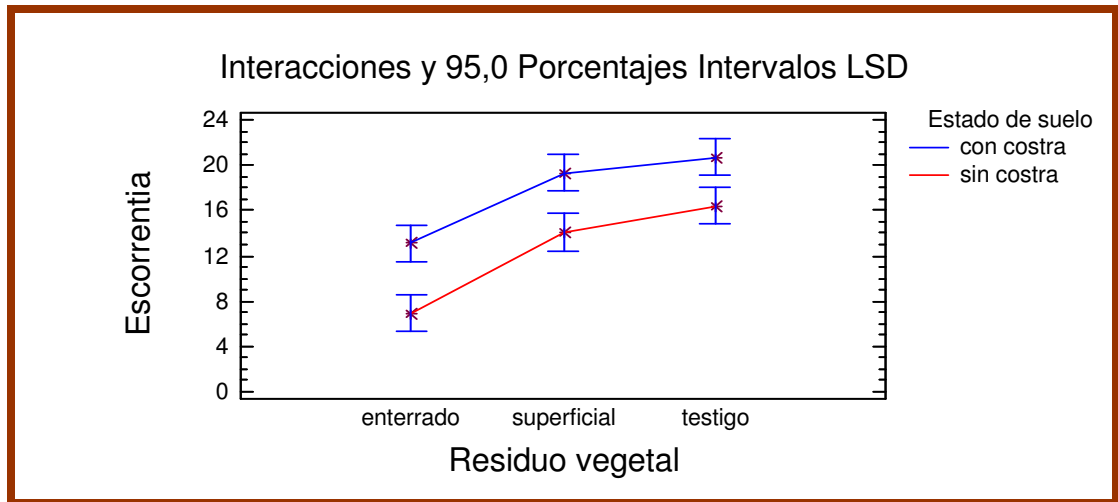


Anexo VIII.5. Medición de la resistencia a la penetración en el suelo 5

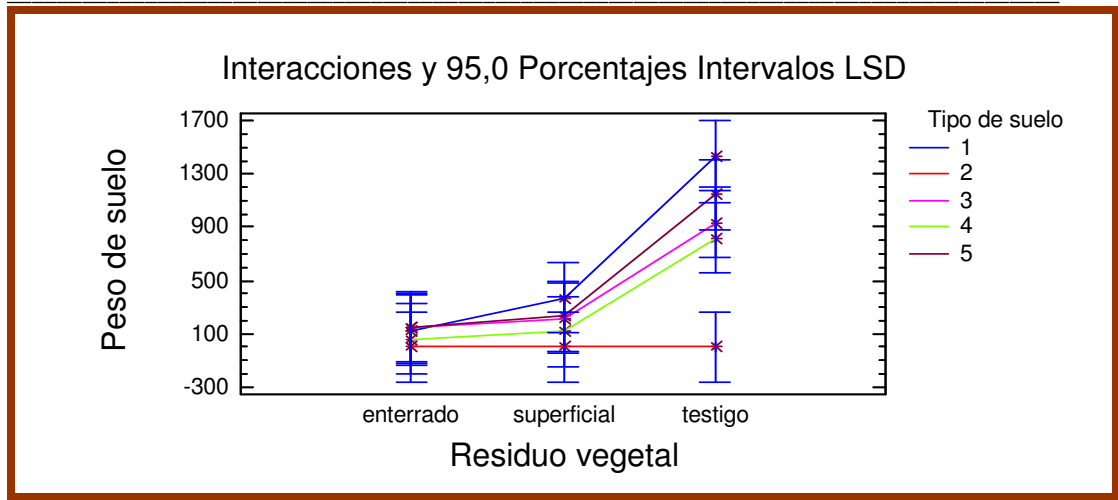
**ANEXO IX: RESUMEN ESTADISTICO DEL EFECTO DE LA POSICION
DEL RESIDUO VEGETAL EN RELACION AL TIPO DE SUELO
Y ESTADO DEL SUELO**



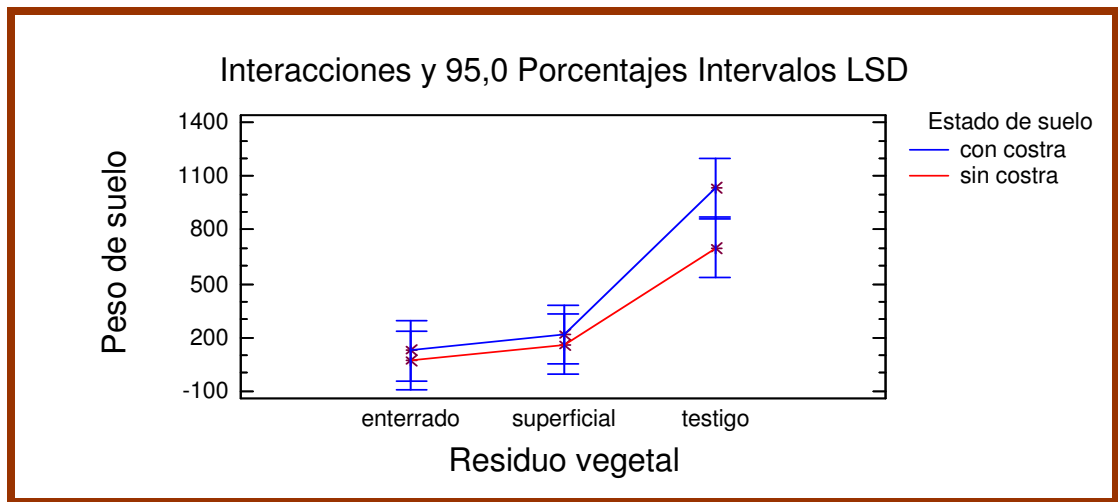
Anexo IX.1. Variación de la escorrentía en relación al residuo vegetal y el tipo del suelo



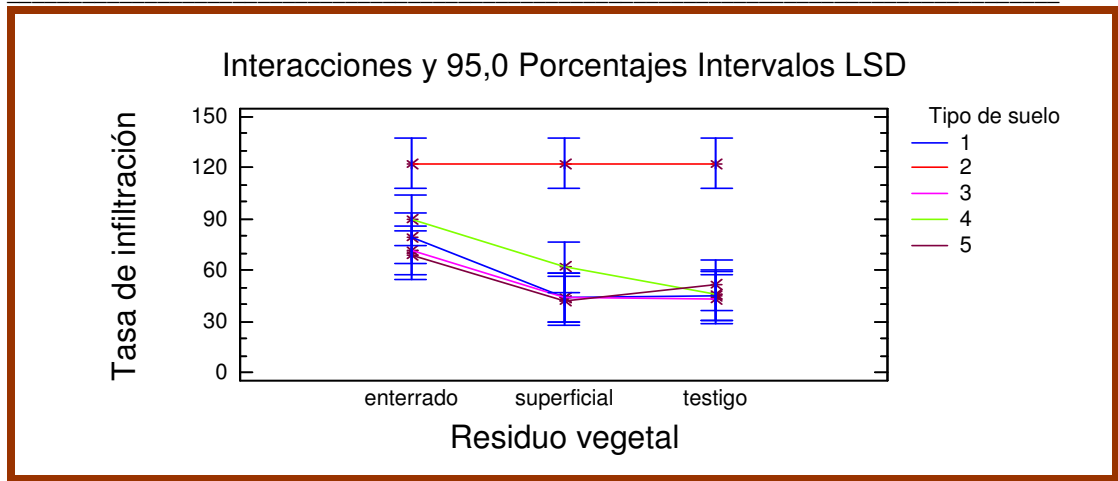
Anexo IX.2. Variación de la escorrentía en relación al residuo vegetal y al estado del suelo



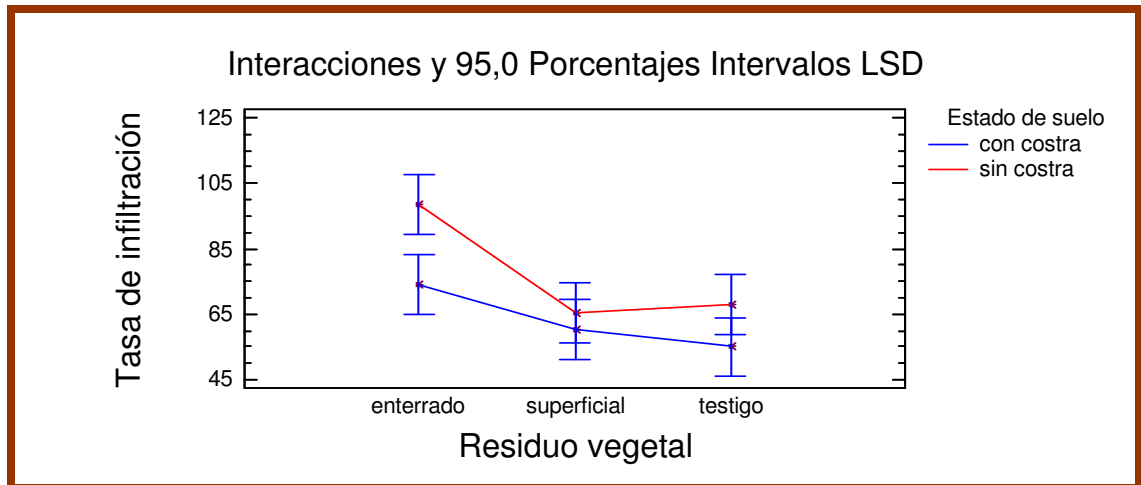
Anexo IX.3. Variación de la pérdida del suelo en relación al residuo vegetal y el tipo del suelo



Anexo IX.4. Variación de la pérdida del suelo en relación al residuo vegetal y el estado del suelo

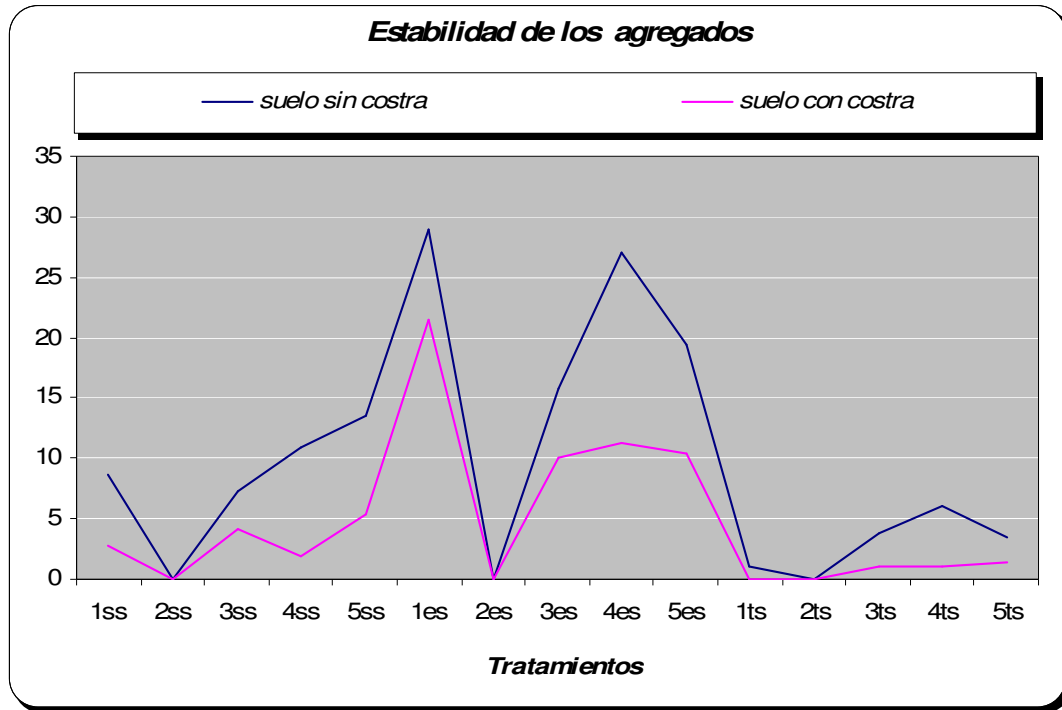


Anexo IX.5. Variación de la pérdida del suelo en relación al residuo vegetal y el estado del suelo

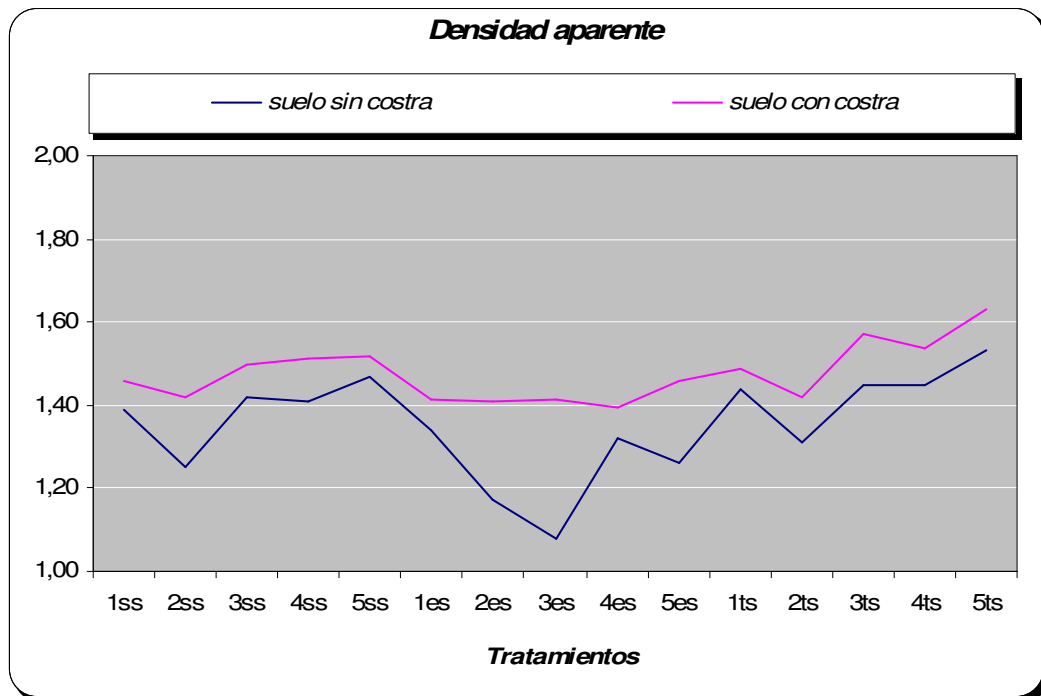


Anexo IX.6. Variación de la pérdida del suelo en relación al residuo vegetal y el estado del suelo

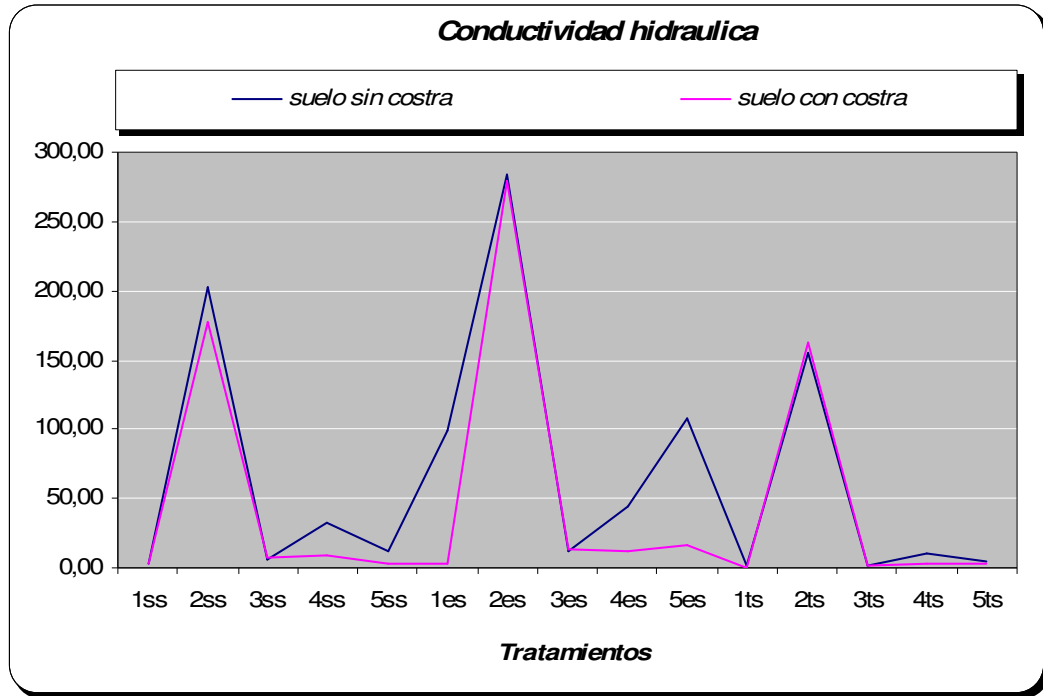
ANEXO X: PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO



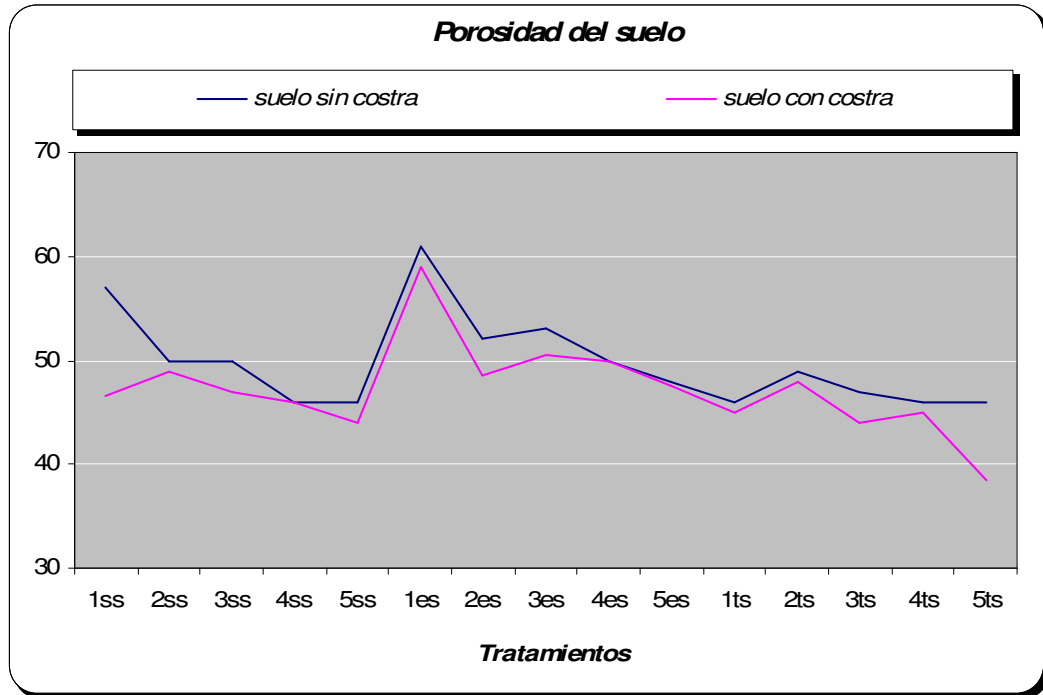
Anexo X.1. Variación de la estabilidad de los agregados en los tratamientos superficial, enterrado y testigo (con costra y sin costra).



Anexo X.2. Variación de la densidad aparente en los tratamientos superficial, enterrado y testigo (con costra y sin costra).



Anexo X.3. Variación de la conductividad hidráulica en los tratamientos superficial, enterrado y testigo (con costra y sin costra).



Anexo X.4. Variación de la porosidad del suelo en los tratamientos superficial, enterrado y testigo (con costra y sin costra).

<i>Tratamientos</i>	<i>Estabilidad de los Agregados (%)</i>	<i>Densidad aparente (g/m³)</i>	<i>Conductividad Hidráulica (cm/h)</i>	<i>Porosidad del suelo (%)</i>
<i>1ss</i>	8,7	1,39	3,43	57
<i>2ss</i>	0	1,25	202,66	50
<i>3ss</i>	7,3	1,42	6,25	50
<i>4ss</i>	11	1,41	31,88	46
<i>5ss</i>	13,5	1,47	11,43	46
<i>1es</i>	29	1,34	99,18	61
<i>2es</i>	0	1,17	283,73	52
<i>3es</i>	15,7	1,08	12,01	53
<i>4es</i>	27,1	1,32	44,22	50
<i>5es</i>	19,4	1,26	108,33	48
<i>1ts</i>	1	1,44	1,35	46
<i>2ts</i>	0	1,31	155,89	49
<i>3ts</i>	3,8	1,45	2,19	47
<i>4ts</i>	6,1	1,45	9,98	46
<i>5ts</i>	3,5	1,53	5,08	46

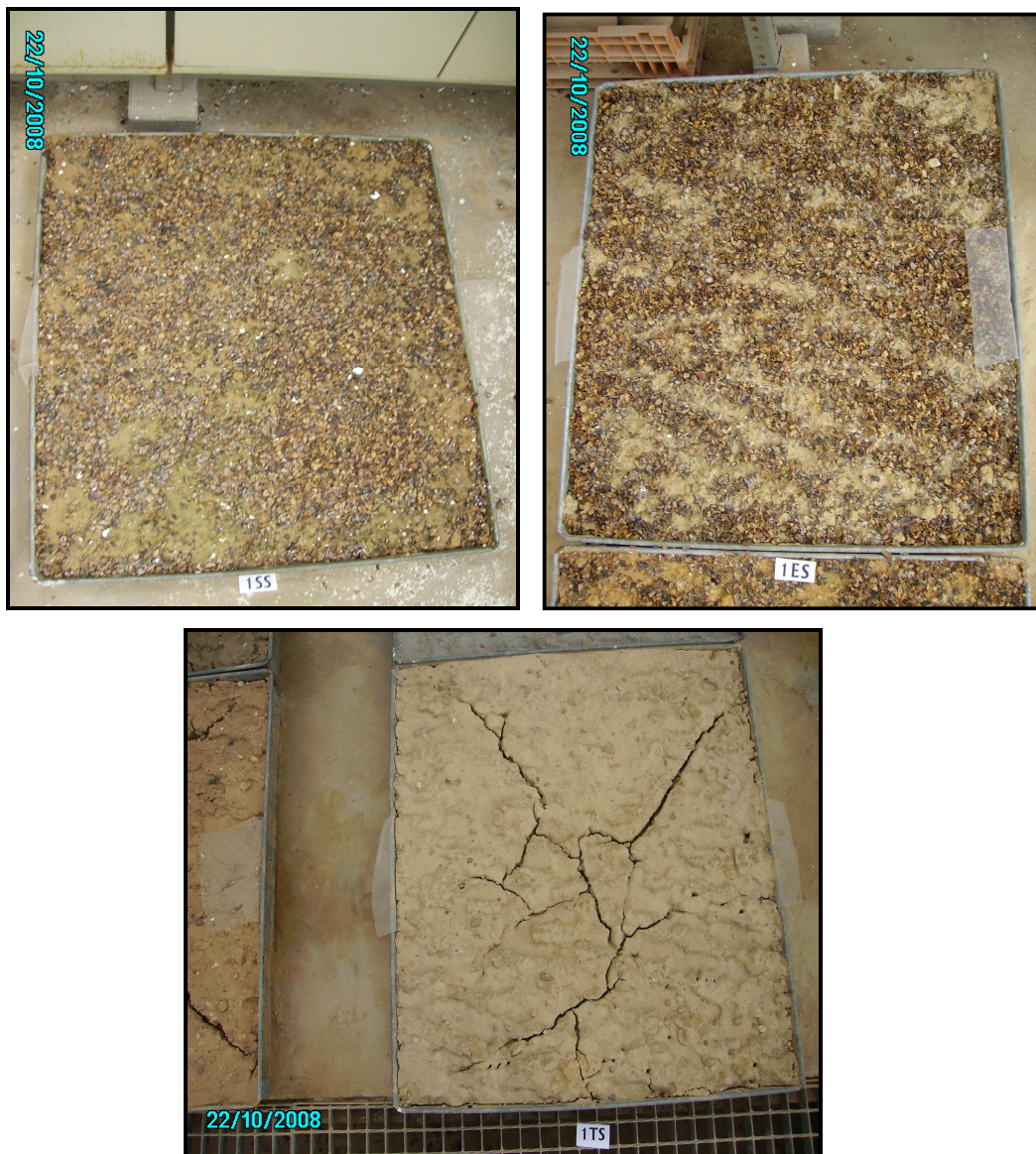
Anexo X.5. Valores de las propiedades físicas estudiadas en suelo sin costra

<i>Tratamientos</i>	<i>Estabilidad de los Agregados (%)</i>	<i>Densidad aparente (g/m³)</i>	<i>Conductividad Hidráulica (cm/h)</i>	<i>Porosidad del suelo (%)</i>
<i>1sc</i>	2,75	1,46	2,87	46,5
<i>2sc</i>	0	1,42	176,86	49,0
<i>3sc</i>	4,15	1,50	6,85	47
<i>4sc</i>	1,85	1,51	8,83	46
<i>5sc</i>	5,375	1,52	2,87	44,0
<i>1ec</i>	21,4	1,41	2,78	59
<i>2ec</i>	0	1,41	280,04	48,5
<i>3ec</i>	10,125	1,41	14,01	50,5
<i>4ec</i>	11,25	1,40	12,13	50
<i>5ec</i>	10,35	1,46	16,21	47,5
<i>1tc</i>	0	1,49	0,31	45
<i>2tc</i>	0	1,42	162,13	48
<i>3tc</i>	1,125	1,57	1,85	44
<i>4tc</i>	1,05	1,54	2,32	45
<i>5tc</i>	1,35	1,63	3,55	38,5

Anexo X.6. Valores de las propiedades físicas estudiadas en suelo con costra

**ANEXO XI: IMÁGENES DEL DESARROLLO DE LA VEGETACIÓN
ESPONTÁNEA Y LA COSTRA**

Anexo XI.1. Comparación del desarrollo de la vegetación espontánea 5 meses después de la simulación de lluvia en los tratamientos superficiales (s), enterrado (e), y testigo (t) en los suelos 1, 2, 3, 4, 5. sin formación de encostramiento (s).



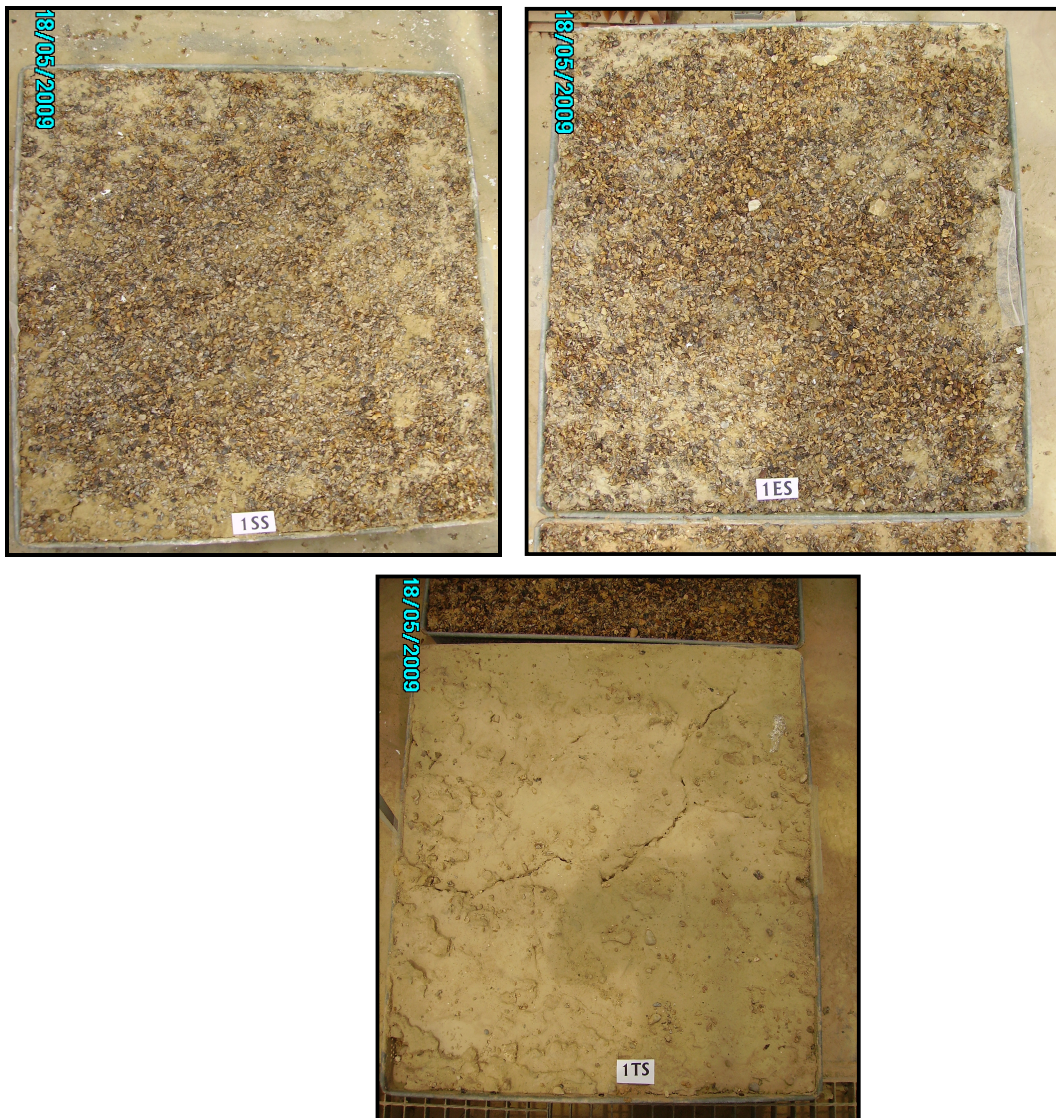








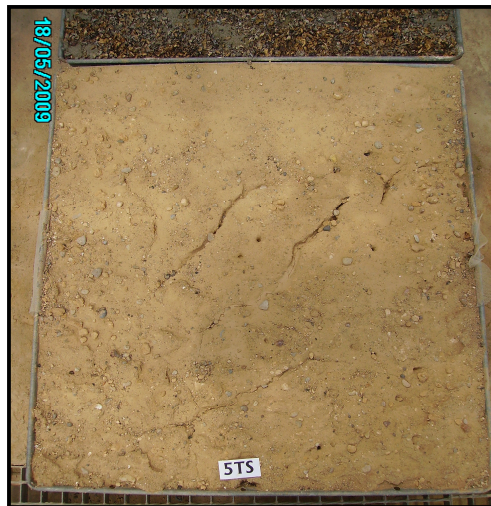
Anexo XI.2. Comparación del desarrollo de la vegetación espontánea 5 meses después de la simulación de lluvia en los tratamientos superficiales (s), enterrado (e), y testigo (t) en los suelos 1, 2, 3, 4,5. con formación de encostramiento (c = s).













Anexo XI.3. Encostramiento en los tratamientos