



# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRICOLAS

**CAMPUS MONTECILLO**  
POSTGRADO EN HIDROCIENCIAS

**MODELACION DE LA RELACION PRECIPITACION-ESCURRIMIENTO  
EN LOTES DE ESCURRIMIENTO EN LABORATORIO, USANDO UN  
SIMULADOR DE LLUVIAS TIPO MORIN E INFORMACION  
HIDROLOGICA Y ESPECTRAL**

**MA. ISABEL MARIN SOSA**

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRA EN CIENCIAS**

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MEXICO

2007

La presente tesis, titulada: **Modelación de la relación precipitación-escorrentía en lotes de escorrentía en laboratorio, usando un simulador de lluvias tipo Morin e información hidrológica y espectral**, realizada por el alumno: **Ma. Isabel Marín Sosa**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS  
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



DR. FERNANDO PAZ PELLAT

ASESOR:



DR. ENRIQUE PALACIOS VELEZ

ASESOR:



DR. ENRIQUE RUBIÑOS PANTA

ASESOR:



DR. JOSE LUIS OROPEZA MOTA

ASESOR:



DR. MARIO MARTÍNEZ MENES

Montecillo, Texcoco, México, 22 de Noviembre de 2007

# MODELACION DE LA RELACION PRECIPITACION-ESCURRIMIENTO EN LOTES DE ESCURRIMIENTO EN LABORATORIO, USANDO UN SIMULADOR DE LLUVIAS TIPO MORIN E INFORMACION HIDROLOGICA Y ESPECTRAL

Ma. Isabel Marín Sosa, Mc.  
Colegio de Postgraduados, 2007

La respuesta hidrológica de un medio depende fuertemente de las características hidráulicas de los suelos y de la condición de vegetación. A nivel de cuenca estas condiciones presentan una alta variabilidad espacial y temporal, lo que dificulta su modelación en forma simple. Aunque existen diferentes métodos de modelación de la relación precipitación-escorrimento, donde sobresale el método del Número de Curva, están limitados debido a la poca disponibilidad de información espacial y temporal confiable. Ante esto, los sensores remotos tienen la ventaja de adquirir información espacialmente exhaustiva y en tiempos de visita cortos al mismo punto de la superficie terrestre, por lo que en este trabajo se presentan los desarrollos, en cuanto al uso de la información espectral (sensores remotos pasivos), para modelar la respuesta hidrológica, relación precipitación-escorrimento, en suelo desnudo y mezcla suelo-vegetación. En el primer caso, se presentan varios modelos para el uso operacional de las reflectancias en la modelación hidrológica; además, se analiza y discute un modelo de estimación de la humedad de los suelos, en su componente temporal, y se revisa usando datos de lotes de escurrimento de suelos desnudos sujetos a un evento estandarizado de precipitación y una fuente de iluminación constante. Los datos experimentales muestran que el modelo se comporta bien, la tasa de secado y el tiempo de inicio al secado muestran una correlación significativa que puede usarse para construir un modelo que solo utilice un parámetro, haciéndolo atractivo y similar al paradigma del número de curva.

**Palabras clave:** Sensores remotos, relación precipitación-escorrimento, suelo desnudo, mezcla suelo-vegetación.

## ABSTRACT

The hydrologic response of a medium depends strongly on the hydraulic characteristics of soils and the condition of vegetation. At watershed level, these conditions present a high space and temporal variability, which makes difficult its modeling in simple form. Although there are different methods for modeling the precipitation-runoff relation, where it excels the method of the Number of Curve, they are limited due to the little availability of reliable space and temporal information. Due to the capacity of the remote sensing to acquire information specially exhaustive in very short time of visit over the same point on the terrestrial surface, this document presents the development works, as far as the use of the spectral information (passive remote sensing), in order to model the hydrologic answer of the precipitation-runoff relation, in simple soils and soils and vegetation mix. In the first case, several models for the operational use of reflectances in the hydrologic modeling appear; in addition, a model of estimation of the humidity of soils is analyzed and discussed, in its temporal component, and it is reviewed using data of runoff lots of bare soils subject to a standardized precipitation event and a constant illumination source. The experimental records show that the model behaves well, the rate of drying and the time of beginning to the drying show a significant correlation that it can be used to make a model that uses only one parameter, doing it attractive and similar to the paradigm of the number of curve.

**Key Words:** Remote sensing, precipitation-runoff relation, bare soil, soil-vegetation mix.

## AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico que me brindó durante mis estudios de maestría en el Colegio de Postgraduados, sin el cual no hubiera sido posible la realización de los mismos.

Al Colegio de Postgraduados, por la enorme oportunidad de formarme como Maestra en ciencias, en una institución de tan alto nivel como ésta.

Al Dr. Fernando Paz Pellat, sin el cual no hubiera sido posible la realización de este trabajo, gracias por la confianza brindada, por el apoyo incondicional y por inspirarme en todo momento a ser mejor profesionista, mejor persona y mejor amiga.

Al M.C. Alejandro Cano González, por su enorme paciencia y apoyo durante la fase experimental del presente trabajo.

Al Dr. José Luís Oropeza Mota. Pieza clave para la realización de este trabajo, gracias por la confianza depositada en el proyecto y por las facilidades otorgadas para la realización de la fase experimental.

Al M.C. José Donald Ríos Berber, por la confianza y apoyo depositados durante la fase experimental de este trabajo, gracias por las atinadas observaciones durante el experimento y por los buenos momentos compartidos.

Al M.C. Patricio Sánchez Guzmán, por todas las asesorías y apoyo durante el desarrollo de esta tesis, tus observaciones contribuyeron siempre a la mejora de este trabajo.

A los miembros del consejo particular: Dr. Enrique Palacios Vélez, Dr. Enrique Rubiños Panta, Dr. Mario Martínez Ménes. Sin los cuales no hubiera sido posible la culminación de este trabajo. Gracias por el apoyo y confianza que me brindaron.

A las personas que apoyaron durante las mediciones experimentales: José Chávez, Enrique Romero y Marcos Casiano, su ayuda fue de gran valor para que este trabajo se llevara a cabo, mil gracias.

A todo el equipo de GRENASER, Martín, Fermín, Alfonso, Nahielli, Nelda, Magali, por hacer más amena mi estancia durante el desarrollo de la tesis, gracias por todas las risas y buenos momentos que hemos compartido.

A la “canoneta”, enorme apoyo desde el principio hasta el fin de la tesis, que facilitó en todo momento la realización del trabajo.

## **RECONOCIMIENTO**

Este trabajo de investigación es parte del proyecto para el desarrollo de un sistema de clasificación de la vegetación natural y estimación de la capacidad de carga usando sensores remotos, CONTRATO NO. ADJ-DCTA-C-VEG-033-2007 con AGROASEMEX, S.A. de C.V.

## DEDICATORIA

A ti, porque tus ojos vieron mi rostro antes de yo ver la luz, me formaste en el vientre de mi madre, me diste vida y libertad para vivirla, desde siempre me buscaste y de todos los tropiezos me levantaste. A tí, que siempre perseveraste y nunca desmayaste hasta encontrarme. A ti, que me enseñaste a verte en todo tiempo, en todo lugar, en la compañía, en la soledad, en la salud, en la enfermedad, en todos los abrazos, en todos los besos, en todos los amigos y en todas las personas que han estado cerca cuando más lo necesito. A ti, por ser fuente inagotable de amor y el único que tiene la capacidad de sorprenderme **todos los días**.

Gracias, DIOS.

A mi madre, Elena Sosa Alvillar, por todos los abrazos y besos oportunos, por guiarme en amor y sabiduría, por enseñarme a amar la vida y a mis semejantes, pero sobre todo por ser la mujer más valiente que he conocido.

A mis hermanos, Felipe, Gabriel, Cándida, Luis, Rosario, por creer en mi en todo momento, por amarme y por aceptarme con defectos y virtudes. En la distancia o en la cercanía, les amo a todos.

Alejandro Becerril y Nora Velmares, por acogerme en un momento difícil de mi existencia, por ayudarme a sanar mis heridas, por enseñarme una nueva forma de vida e inspirarme a permanecer en ella. Por todos los consejos, por toda la motivación, por todo el amor que me dan, mil gracias.

Al Dr. Daniel Sepúlveda Jiménez, responsable en gran medida de mi decisión de ingresar al colegio, gracias por motivarme a perseguir mis sueños y creer en mi capacidad para alcanzarlos, sobre todo, gracias por el enorme apoyo y amistad que me brindó durante mi etapa de tesista en licenciatura.

A mis tíos Juana Sosa y Juan Franco, por el apoyo moral y económico que me han dado en los momentos más difíciles y porque les amo.

A mis amigos: Araceli, Griselda, Rocío, Eliezer, por todas las risas, por todo el llanto, por su amistad desinteresada y por todos los momentos lindos que hemos vivido.

Al Dr. Fernando Paz Pellat, nunca olvidaré tu trabajo, esmero y tiempo invertidos en esta tesis, gracias por ser agente motivador de todos los que estamos a tu alrededor. Ha sido una verdadera bendición conocerte.

## CONTENIDO

	Página
<b>CAPITULO 1. INTRODUCCION GENERAL</b>	
1.1 Descripción de capítulos de la tesis.....	2
1.2 Revisión de literatura.....	4
1.2.1 Modelos de simulación.....	4
1.2.2 Simulación de lluvia.....	9
1.3 Objetivos generales de la tesis.....	12
1.4 Referencias.....	13
<b>CAPITULO 2. ELEMENTOS PARA EL DESARROLLO DE UNA HIDROLOGIA OPERACIONAL CON SENSORES REMOTOS: SUELO DESNUDO</b>	
2.1 Introducción.....	15
2.2 Un paradigma para una hidrología operacional.....	16
2.3 Reflectancia de los suelos y contenido de humedad.....	18
2.3.1 Relación entre $R_{PMP}$ y $R_{CC}$ .....	25
2.4 Evolución temporal de la humedad y reflectancia de los suelos.....	28
2.5 Conclusiones.....	33
2.6 Referencias.....	32
<b>CAPITULO 3. ELEMENTOS PARA EL DESARROLLO DE UNA HIDROLOGIA OPERACIONAL CON SENSORES REMOTOS: MEZCLA SUELO-VEGETACION</b>	
3.1 Introducción.....	35
3.2 Uso clásico de los sensores remotos pasivos en hidrología.....	36
3.3 Un enfoque alternativo del uso de los sensores remotos.....	39
3.3.1 Atrayentes espectrales de la dinámica del Crecimiento de la vegetación.....	40
3.4 Bases teóricas para el uso de sensores remotos en la relación precipitación-escurrimiento.....	49



3.4.1 Límites de balance de energía y agua.....	50
3.5 Conclusiones.....	53
3.6 Referencias.....	54
CAPITULO 4. MODELACIÓN TEMPORAL DE LOS CAMBIOS EN LA HUMEDAD DEL SUELO USANDO SENSORES REMOTOS	
4.1 Modelo temporal de la humedad de los suelos con reflectancias.....	59
4.1.1 Relación entre la reflectancia y el contenido de humedad en suelos.....	59
4.1.2 Modelación temporal de la humedad y reflectancia de los suelos.....	61
4.2 Experimento de humedad del suelo en un simulador de lluvia.....	63
4.2.1 Características de los suelos en los lotes de escurrimiento.....	66
4.2.2 Resultados hidráulicos de los lotes de escurrimiento.....	68
4.2.3 Resultados de reflectancia de los lotes de escurrimiento.....	69
4.3 Comentarios finales.....	72
4.5 Referencias.....	72
CAPITULO 5. CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES.....	75
ANEXO A. DESCRIPCION DEL EXPERIMENTO REALIZADO.....	76

## LISTA DE CUADROS

	Página
Cuadro 1.1 Componentes del modelo EPIC.....	4
Cuadro 1.2 Componentes del modelo SWAT.....	5
Cuadro 1.3 Componentes del modelo WEPP.....	8
Cuadro 2.1 Bandas espectrales del sensor TM/ETM.....	19
Cuadro 2.2 Estimación del parámetro m para combinaciones de bandas espectrales .....	27
Cuadro 4.1 Propiedades físicas y químicas de los suelos usados en el experimento.....	66
Cuadro 4.2 Datos de las curvas de retención de humedad.....	67
Cuadro 4.3 Parámetros del modelo temporal de humedad de los suelos.....	70
Cuadro A.1 Orden de colocación de suelos en los lotes de escurrimiento del simulador.....	81

## LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1 Componentes principales de un simulador de lluvia de disco rotatorio.....	11
Figura 1.2 Funcionamiento del disco rotatorio.....	12
Figura 2.1 Firmas espectrales de dos suelos en función de su humedad.....	20
Figura 2.2 Cambio de la reflectancia del IRC con la humedad para dos suelos.....	21
Figura 2.3 Evolución temporal de la humedad e IRC para el suelo sin labranza.....	23
Figura 2.4 Relación entre la humedad e IRC en el día 1 del suelo sin labranza.....	24
Figura 2.5 Relación entre $\theta_{sr}$ y la humedad del suelo sin labranza.....	24
Figura 2.6 Relación entre las reflectancias de un suelo seco con las de CC y PMP.....	25
Figura 2.7 Relación entre RPMP y RCC para dos suelos.....	26
Figura 2.8 Efecto de escala en la distribución de la humedad del suelo en el IRC.....	28
Figura 2.9 Modelo de la evolución temporal de la reflectancia-humedad del suelo.....	29
Figura 2.10 Evolución temporal del IRC asociado a la humedad del suelo.....	30
Figura 2.11 Modelo ajustado al segundo estado de la evaporación del suelo.....	31
Figura 2.12 Modelos temporales de las reflectancias para las bandas del IRC e IRM1 para el segundo día del suelo sin labranza.....	31
Figura 3.1 Firmas espectrales típicas de hojas de cultivos agrícolas (adaptada de Gausman <i>et al.</i> , 1973).....	41

Figura 3.2 Relaciones entre bandas espectrales para un suelo desnudo franco arcillo limoso (adaptado de Beck <i>et al.</i> , 1975).....	42
Figura 3.3 Dinámica del crecimiento de la vegetación en el espacio espectral R-IRC.....	42
Figura 3.4 Espacios transformados IVPP-R y dIRC-R en los datos de la figura 3.3.....	43
Figura 3.5 Espacios transformados IVPP-R y dIRC-R para un experimento de maíz (adaptado de Bausch, 1993).....	44
Figura 3.6 Modelo esquemático general para la estimación de un índice global equivalente de la humedad del suelo-vegetación.....	45
Figura 3.7 Geometría de una cultivo sembrado en surcos .....	46
Figura 3.8 Patrones espectrales de la dinámica del crecimiento de la vegetación asociados a los espacios del R-IRM1 e IRM1-IRC.....	48
Figura 3.9 Espacios transformados para las bandas del IRM1(B5) e IRC (B4), para el caso de una línea del suelo con constantes $a_{45} = -3.566$ y $b_{45} = 0.642$ .....	48
Figura 3.10 Espacios transformados para las bandas del IRM1(B5) e IRC (B4), para el caso de una línea del suelo con constantes (a) $a_{45} = 0$ y $b_{45} = 1$ ; y (b) $a_{45} = 0.1$ y $b_{45} = 0.5$ .....	49
Figura 3.11 Ejemplo de relación exponencial entre $R_n/P$ y $(Q-I)/P$ .....	53
Figura 4.1 Relación entre $\theta_{sr}$ y la humedad de un suelo sin labranza.....	60
Figura 4.2 Modelo de la evolución temporal de la reflectancia-humedad del suelo.....	62
Figura 4.3 Modelación del segundo estado de la evaporación del suelo.....	63
Figura 4.4 Arreglo experimental para el análisis de la respuesta temporal de suelos desnudos bajo iluminación artificial en un simulador de lluvia tipo rotatorio.....	64
Figura 4.5 Curvas de retención de humedad de los suelos del experimento...	67

Figura 4.6 Infiltración de los cinco suelos del experimento en lotes de escurrimiento.....	68
Figura 4.7 Relación mejor y peor entre Rcc y RPMP para los suelos del experimento.....	69
Figura 4.8 Ajuste del modelo de la figura 4.2 a los suelos del experimento.....	70
Figura 4.9 Relación entre el parámetro q estimado de la banda IRM1 y la infiltración en una hora de los lotes de escurrimiento para los suelos del experimento.....	71
Figura 4.10 Relación entre q de la banda IRM1 y $t_d$ .....	71
Figura A.1 Acondicionamiento del área del simulador de lluvia.....	77
Figura A.2 Distribución de lámparas para iluminación artificial.....	78
Figura A.3 Dimensiones de la base pentagonal de las lámparas.....	78
Figura A.4 Distribución de lámparas en los lotes.....	79
Figura A.5 Secado de suelos.....	79
Figura A.6 Componentes y dimensiones de un lote de escurrimiento.....	80
Figura A.7 Disposición de lotes dentro del área del simulador.....	80
Figura A.8 Colocación de malla de fierro y grava en lote de escurrimiento.....	81
Figura A.9 Colocación de gravilla en lote de escurrimiento.....	81
Figura A.10 Colocación de suelo en lote de escurrimiento.....	82
Figura A.11 Compactación de suelo de lotes experimentales.....	82
Figura A.12 Perfil de suelo montado en lote experimental.....	82
Figura A.13 Equipo de medición.....	83
Figura A.14 Sensores de temperatura y reflectancia.....	83
Figura A.15 Posiciones del sensor en el lote, para las mediciones de temperatura y reflectancia.....	84

Figura A.16 Forma de medición de temperatura y reflectancia.....	84
Figura A.17 Colocación de recipientes para humedecimiento del sistema.....	85
Figura A.18 Procedimiento para el humedecimiento del sistema.....	86
Figura A.19 Agua de escurrimiento.....	86

## CAPITULO 1. INTRODUCCION GENERAL

La estimación de los escurrimientos superficiales, como respuesta ante eventos de precipitación, ha sido una de las tareas básicas en la modelación de los procesos hidrológicos en cuencas o en parcelas experimentales. La búsqueda de la relación precipitación-escurrimiento a estas escalas se ha enfocado principalmente al uso de modelos hidrológicos de diferentes tipos, tales como el SWAT (Neitsch *et al.*, 2002) y EPIC (Sharpley y Williams, 1990), entre otros. Este tipo de modelos, aun cuando utilizan un método sencillo como el Número de Curva (NC) (SCS, 1972) para parametrizar la relación precipitación-escurrimiento, requieren de una enorme cantidad de parámetros para su calibración, además de que modelan el flujo de agua por compartimentos: atmósfera-suelo-planta-manejo, lo cual demanda conocer a detalle la cuenca e información que no está disponible en forma operacional o que no está actualizada.

El método del NC, ampliamente usado en estudios hidrológicos, fue desarrollado para estimar el escurrimiento ante cambios en el uso y tipo de suelo a lo largo del año, requiriendo conocer únicamente el tipo de vegetación, su condición de cobertura y la humedad antecedente (antes del evento de lluvia) del suelo. Sin embargo su uso se complica debido a que en la mayoría de veces falta información sobre las condiciones temporales de la parcela o cuenca. En México, para alimentar estos modelos generalmente se recurre a los mapas temáticos del INEGI con una periodicidad promedio de 10 años, muy diferente a las necesidades de contar con información durante el ciclo de crecimiento anual de la vegetación, tampoco se cuenta con información acerca de la humedad antecedente del suelo.

Así que, la falta de información confiable constituye un factor limitante para la estimación de la relación precipitación-escurrimiento en cuencas o en cualquier otra escala espacial. Una alternativa para obtener información son los sensores remotos, debido a que usándolos de manera adecuada son capaces de caracterizar la

respuesta hidráulica del suelo en forma espacial y temporal, para el desarrollo de modelos basados en información puramente espectral.

Considerando que el escurrimiento superficial depende aparte del tipo de suelo y su condición de humedad también de la vegetación, en este trabajo se presentan los desarrollos que involucran el uso de sensores remotos para establecer los parámetros asociados al tipo y uso de suelo en la modelación de la relación precipitación-escurrimiento.

Para estudiar el comportamiento de la discusión teórica aquí presentada, con respecto a las condiciones reales, se desarrolló un experimento en el que se evaluó la respuesta hidrológica de “suelo desnudo” ante un evento de lluvia controlado, así como la respuesta térmica y espectral del mismo a diferentes grados de humedad (seco, capacidad de campo y saturado) y durante su proceso de secado con luz artificial.

De este modo, este trabajo presenta un primer acercamiento al uso de sensores remotos en aplicaciones hidrológicas operacionales, mismo que servirá de base para el desarrollo de futuras investigaciones donde se pueda escalar de estimaciones en laboratorio a estimaciones en campo a nivel de cuenca ligados al uso de otro tipo de sensores tales como los montados en plataformas satelitales.

## **1.1 Descripción de capítulos de la tesis.**

El presente documento, generado a partir del trabajo de investigación, se encuentra escrito en forma de capítulos. Cada capítulo, a excepción del primero, corresponde a un tema específico de la investigación, y presenta una parte introductoria, una parte de desarrollo del tema y las respectivas conclusiones.



Las referencias bibliográficas se presentan siempre al final de cada capítulo.

El capítulo 1 corresponde a la parte introductoria de toda la investigación, se presenta en forma breve una revisión de literatura de temas generales y una introducción general a la investigación realizada.

En el capítulo 2 se presentan los desarrollos para el uso operacional de la información espectral en la modelación hidrológica en suelo desnudo, usando el paradigma del número de curva. Se analiza por segmentos lineales la evolución temporal de la humedad y las reflectancias, de tal forma que con un solo parámetro, el tiempo de secado, se pueda caracterizar en forma completa.

En el capítulo 3 se revisa el uso de la información espectral para modelar la respuesta hidrológica de la mezcla suelo-vegetación y se establecen los fundamentos teóricos para el uso de los sensores remotos en la modelación de la relación precipitación-escorrentía usando balances de energía y masa.

En el capítulo 4 se analiza y discute un modelo de estimación de la humedad de los suelos usando sensores remotos, en su componente temporal, y se revisa usando datos experimentales de lotes de escorrentía de suelos desnudos sujetos a un evento estandarizado de precipitación y una fuente de iluminación constante.

Se incluye además en el documento, un anexo con la descripción del experimento que se realizó para obtener los datos usados en el capítulo 4. Se describe de forma general el procedimiento seguido y se complementa con imágenes del proceso.

## 1.2 Revisión de literatura

### 1.2.1 Modelos de simulación

En las últimas décadas se ha desarrollado una gran variedad de modelos computacionales para el estudio y simulación de la respuesta hidrológica del suelo ante eventos de lluvia. Algunos modelos como EPIC, SWAT o WEPP, son ampliamente utilizados en estudios de erosión, infiltración y escurrimiento, sin embargo, tienen la característica de que requieren una enorme cantidad de parámetros para su calibración. Esto torna difícil su aplicación en México, ya que para utilizarlos es necesario conocer a detalle el área de estudio requiriendo información que resulta muy difícil de acceder en términos de tiempo y costo. A continuación se presenta una breve descripción de tales modelos, sus componentes y datos de entrada.

#### **Modelo EPIC (Erosion-Productivity Impact Calculator)**

EPIC es un modelo de simulación mecanística, usado para examinar los efectos a largo plazo de la erosión del suelo sobre la producción del cultivo (Williams *et al.*, 1983). En el cuadro 1.1 se resumen sus componentes.

Cuadro 1.1. Componentes del modelo EPIC.

<b>COMPONENTE</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
HIDROLÓGICO	Realiza un balance hídrico a partir de: precipitación, escurrimiento superficial, escurrimiento subsuperficial, evapotranspiración, drenaje, irrigación. Simula el escurrimiento superficial usando el método del número de curva y el escurrimiento máximo con el método racional modificado.
CLIMÁTICO	Estima la ocurrencia de lluvia considerando la condición de humedad de un día previo. Estima variables climáticas tales como: Temperatura del aire, radiación solar y humedad relativa.
EROSIÓN	Simula la erosión hídrica causada por lluvia, escurrimientos superficiales e irrigación. Simula erosión eólica.

Cuadro 1.1 Componentes del modelo EPIC. Continuación...

<b>COMPONENTE</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
SUELO	Considera un perfil de suelo con un máximo de 10 capas, incluyendo propiedades físicas tales como constantes de humedad, textura, N y C orgánico, pH, suma de bases, CIC, CaCO <sub>3</sub> y NO <sub>3</sub> , conductividad hidráulica, residuos de cultivo. Realiza un seguimiento de los nutrientes N y P.
CULTIVO	Incluye subrutinas de desarrollo de cultivos anuales y perennes. Simula: intercepción de energía, conversión de energía a biomasa, aprovechamiento de agua y aprovechamiento de nutrientes.
MANEJO	Considera rotación de cultivos, aplicación de riego, uso de fertilizantes químicos y orgánicos, aplicación de pesticidas, prácticas de conservación de suelos.
ECONÓMICO	Incluye un paquete sencillo para calcular el costo total de producción de cosecha a nivel anual.

Fuente: Williams, 1990.

### **Modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool)**

El modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) fue desarrollado por el USDA-ARS (Servicio de Investigación Agrícola de E.U.) para predecir el impacto de las prácticas de manejo del suelo y vegetación sobre la producción de agua, sedimentos y químicos agrícolas en grandes cuencas complejas con variación de suelos y condiciones de uso y manejo en largos periodos de tiempo. Los principales componentes del modelo se ubican en ocho divisiones principales: clima, hidrología, crecimiento de la cobertura superficial, erosión, nutrientes, pesticidas y manejo de cultivos (Neitsch *et al.*, 2002), ver cuadro 1.2

Cuadro 1.2 Componentes del modelo SWAT.

<b>Componente</b>	<b>Variable</b>	<b>Descripción</b>
<b>Clima</b>	Precipitación diaria	Permite introducir estos datos o bien pueden ser generados durante la simulación.
	Temperatura máx/mínima del aire	
	Radiación Solar	
	Vel. del Viento	
	Humedad Relativa	

Cuadro 1.2 Componentes del modelo SWAT. Continuación....

Componente	Variable	Descripción
<b>Hidrología</b>	Lluvia interceptada en el dosel	Es el agua interceptada por las superficies vegetativas (dosel), donde se sostiene y se hace disponible para la evaporación.
	Infiltración	Es la entrada de agua en el perfil del suelo. Se calcula como la diferencia entre la cantidad de precipitación y la cantidad de escurrimiento superficial. El método de Green & Ampt modela directamente la infiltración pero requiere datos de precipitación en incrementos de tiempo pequeños.
	Redistribución	Se refiere al movimiento continuo del agua en un perfil del suelo, después de la entrada del agua (vía la precipitación o la irrigación) ha cesado en la superficie del suelo.
	Evapotranspiración	La Et potencial se puede calcular por tres métodos: Hargreaves (Hargreaves et al., 1985), Priestley-Taylor (Priestley and Taylor, 1972), y Penman-Monteith (Monteith, 1965).
	Flujo subsuperficial lateral	Para predecir este flujo se utiliza un modelo de onda cinemática que toma en cuenta la variación de la conductividad, la pendiente y el contenido de agua en el suelo
	Escorrimento superficial	El modelo simula los volúmenes de escurrimiento superficial y escurrimiento pico para cada Unidad de Respuesta Hidrológica (URH) utilizando datos diarios de precipitación.
	Estanques	Son las estructuras de almacenamiento de agua dentro de una subcuenca que interceptan el escurrimiento superficial.
	Canales tributarios	Canales que suministran a los canales principales dentro de una subcuenca.
	Flujo de retorno	Flujo de retorno o flujo base, es el volumen del flujo en la corriente originado del agua subterránea.
<b>Crecimiento de la Cobertura Superficial</b>	Crecimiento potencial	El aumento potencial en la biomasa por un día es una función de la energía interceptada y de la eficiencia de la planta en convertir energía a biomasa.
	Transpiración actual y potencial	Es una función de la transpiración potencial y la disponibilidad de agua en el suelo.

Cuadro 1.2 Componentes del modelo SWAT. Continuación....

Componente	Variable	Descripción
<b>Crecimiento de la Cobertura Superficial</b>	Extracción de nutrientes	El uso de nitrógeno y fósforo por la planta se estiman con una aproximación al suministro y la demanda, las demandas diarias se calculan como la diferencia entre la concentración actual del elemento en la planta y la concentración óptima.
	Crecimiento contenido	Es el crecimiento y la producción potencial de la planta, que no se alcanzan debido a limitaciones del ambiente. El modelo estima el estrés ocasionado por agua, nutrientes y temperatura.
<b>Erosión</b>	Factores de MUSLE	Se estima con la Ecuación Universal de la Perdida de Suelo Modificada (MUSLE), la cuál utiliza el volumen escurrido, el escurrimiento pico y el área de la subcuenca para calcular la energía erosiva.
<b>Nutrientes</b>	Nitrógeno Y Fósforo	Traza el movimiento y transformación de diferentes formas de nitrógeno y fósforo en la cuenca. En el suelo, la transformación del nitrógeno y fósforo está gobernada por el ciclo del nitrógeno y ciclo del fósforo respectivamente.
<b>Pesticidas</b>	Mov. del pesticida en el escurrimiento	El movimiento del pesticida está controlado por su solubilidad, degradación de su vida media y el coeficiente de adsorción de carbono orgánico en el suelo. El transporte del pesticida por agua y sedimentos se calcula para cada evento de escurrimiento y el pesticida lixiviado se estima para cada capa de suelo cuando ocurre la percolación.
	Mov. del pesticida en el perfil del suelo	
	Mov. del pesticida en acuífero	
<b>Manejo</b>	Rotaciones	SWAT permite que el usuario defina las prácticas de manejo que ocurren en cada URH. El usuario puede definir el principio y final de la estación de crecimiento, especificar la sincronización y cantidades de fertilizante, pesticida e irrigación, así como la sincronización de las operaciones de labranza.
	Uso del agua	

Neitsch *et al.*, (2002)

## Modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project)

El modelo WEPP es un programa computacional de simulación continua que predice pérdidas de suelo y depositación de sedimentos por el flujo en laderas y por el flujo concentrado en pequeños canales (Flanagan y Nearing, 1995). Produce diferentes tipos de salidas, las más básicas contienen información resumida del escurrimiento y erosión que puede producirse durante una tormenta diaria, mensual o anual (Laboratorio Nacional de Erosión del Departamento de Agricultura de Estados Unidos, 1995).

Los componentes del modelo se muestran en el cuadro 1.3. Los parámetros de entrada incluyen cantidad e intensidad de la precipitación, textura del suelo, parámetros de crecimiento de las plantas, parámetros de descomposición del residuo, efectos de la incorporación del residuo sobre el suelo, forma y orientación de la pendiente y parámetros de erodabilidad del suelo. Las entradas mayores son los archivos de datos climáticos, datos de pendientes, datos del suelo y manejo del cultivo. La utilización de WEPP en una cuenca requiere datos adicionales que proporcionen información del canal y características de las depresiones, así como la configuración de la cuenca. (USDA-NSERL, 1995)

Cuadro 1.3 Componentes del modelo WEPP.

COMPONENTE	DESCRIPCIÓN
Generación climática	Genera datos diarios de: precipitación, temperatura máxima y mínima, radiación solar, velocidad y dirección del viento.
Irrigación	Acomoda los sistemas de riego dentro de cuatro opciones: 1) sin riego, 2) Nivel de disminución del agua en el suelo, 3) programación de fechas, 4) una combinación de las anteriores.
Infiltración	Se estima con la ecuación de Green & Ampt..
Hidráulica del flujo superficial	Se asume un flujo laminar amplio con dirección y desarrollo hidrográfico. Los procedimientos de dirección del flujo incluyen una solución analítica de las ecuaciones de la onda cinemática y un método aproximado que utiliza dos conjuntos de ecuaciones de regresión para la tasa de escurrimiento pico y para la duración del escurrimiento.

Cuadro 1.3 Componentes del modelo WEPP. Continuación...

COMPONENTE	DESCRIPCIÓN
Balance de agua	Mantiene un balance continuo de la humedad del suelo dentro de la zona radicular a nivel diario. Utiliza información climática (precipitación, temperatura y radiación solar diarios), infiltración (volumen de agua infiltrada), y crecimiento de las plantas (índice de área foliar, profundidad de las raíces y cobertura de residuos diarios).
Crecimiento de las plantas	Simula los cambios temporales de las variables de la planta que tienen influencia en el escurrimiento y los procesos de erosión. Predice la acumulación de biomasa como una función de las unidades calor y la radiación fotosintéticamente activa.
Descomposición del residuo	Estima la descomposición de la masa del residuo que está en contacto con la superficie del suelo, del material que ha sido incorporado y de la masa de raíces muertas. Los parámetros de descomposición pueden especificarse en un archivo de entrada.
Parámetros del suelo	Estos parámetros incluyen: rugosidad, densidad aparente, succión del frente de mojado, conductividad hidráulica, erosión entre canalillos, erosión en canalillos y esfuerzo hídrico cortante crítico.
Erosión y depositación en laderas.	Estima la erosión en dos formas 1) Erosión entre canalillos y 2) Erosión en canalillos
Procesos hidrológicos y de erosión en canales de la cuenca.	Este componente computa: infiltración, evapotranspiración, percolación, interceptación y almacenamiento en depresiones. Identificar zonas de desprendimiento y depositación de sedimentos dentro de canales construidos o flujo concentrado en cauces.
Componente de áreas de depositación.	Calcula los hidrogramas de salida y la concentración de sedimento para estructuras como terrazas, estanques o diques. Las entradas incluyen: volumen de escurrimiento, tasa de flujo, concentración de sedimentos, diámetro medio de partículas para 5 clases y la fracción de cada tamaño de partículas en el sedimento entrante.

Fuente: Flanagan *et al.*, 1995.

### 1.2.2 Simulación de lluvia

La simulación de lluvia es la técnica de aplicar agua a parcelas experimentales de una manera similar a la precipitación natural; es una herramienta que ha sido utilizada ampliamente en estudios de erosión, infiltración y escurrimiento (Sánchez y Asseline, 1999); permite hacer comparaciones del comportamiento de fenómenos como el escurrimiento bajo diferentes sistemas de manejo, y proporciona una forma relativamente fácil y económica de obtener una gran cantidad de datos, bajo condiciones controladas, en un periodo de tiempo corto (Sánchez *et al.*, 1999).

La lluvia es compleja, con interacciones entre propiedades físicas (tamaño de gota, velocidad de gota, etc.) y grandes variaciones climáticas basadas en la topografía e influencias marinas. De acuerdo con Blanquies *et al* (2003), la simulación de lluvia requiere varios criterios:

1. Distribución del tamaño de gota cercano a una lluvia natural.
2. Velocidad de impacto cercana a la velocidad terminal de la lluvia natural.
3. Intensidad uniforme de la lluvia y distribución al azar del tamaño de gota.
4. Aplicación uniforme de la lluvia sobre toda la parcela de prueba.
5. Angulo de impacto vertical.
6. Patrones reproducibles de intensidad y duración significantes.

De acuerdo con Stone *et al* (1999), las características de la parcela tales como propiedades de la superficie del suelo y cubierta vegetal, se miden primeramente para desarrollar relaciones funcionales entre tasas finales de infiltración y éstas características, o para desarrollar ecuaciones que estimen los parámetro de modelos de infiltración como el de Green y Ampt.

### **Simuladores de lluvia**

Blanquies *et al* (2003) menciona que los simuladores pueden clasificarse en dos grandes grupos: “simuladores formadores de gota” y “simuladores de inyector presurizado”. Los formadores de gota son imprácticos para su uso en campo, dado que requieren una gran distancia para alcanzar la velocidad terminal (10 metros) y no producen una distribución de las gotas a menos que se utilice una variedad de tubos formadores de gota de diferentes tamaños. Los simuladores de inyector presurizado están diseñados para una variedad de usos. Pueden ser usados en campo y sus intensidades pueden variarse más que con un del tipo formador de gota. Desde que las gotas abandonan los inyectores tienen una velocidad inicial mayor a cero debido a la presión que se ejerce fuera. Se requiere una distancia de caída más corta para alcanzar la velocidad terminal. Las intensidades del inyector varían con el diámetro



del orificio, la presión hidráulica sobre el inyector, el espacio del inyector y el movimiento del inyector. Los simuladores de inyector presurizado pueden producir intensidades variables. Un continuo rociado desde un inyector crea una intensidad no natural. Se necesita algún método para iniciar y detener el rociado. Las soluciones para ello han sido un disco rotatorio, un simulador solenoide controlado y un elaborado sistema rociador. A continuación se describe brevemente, las características de un simulador de disco rotatorio.

### Simulador de lluvia de disco rotatorio, tipo Morín.

Desarrollado por J. Morín *et al* (1967), este tipo de simulador consiste, principalmente, de un inyector presurizado orientado verticalmente hacia abajo que arroja agua constantemente sobre un disco de metal que gira en el plano horizontal (figura 1.2). El disco de metal gira con ayuda de un motor eléctrico y el agua de aspersion es bombeada desde una cisterna colocada por debajo del piso. Un armazón de metal sostiene los componentes principales del simulador a una altura tal que permite que las gotas de lluvia alcancen velocidades similares a las de una tormenta natural (Figura 1.1).

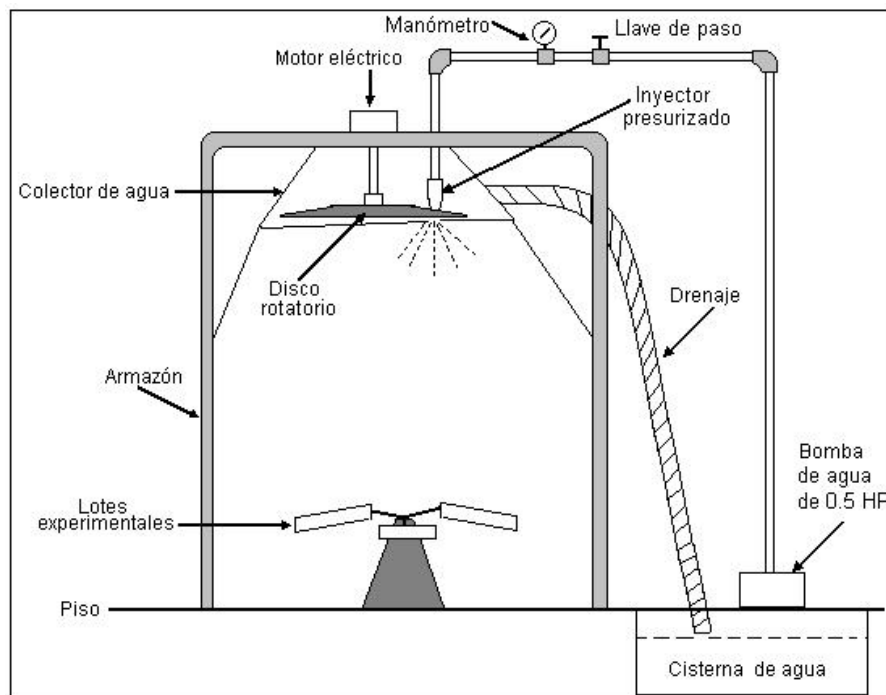


Figura 1.1 Componentes principales de un simulador de lluvia de disco rotatorio.

En el disco hay una ranura radial que permite que una porción de agua llegue a los lotes cada vez que ésta pasa bajo el inyector (figura 1.2). La porción de agua que no pasa hacia los lotes regresa a la cisterna a través del sistema colector y tubo de drenaje que se muestra en la figura 1.1 El ángulo de la ranura en el disco define la cantidad de agua que llega a los lotes.

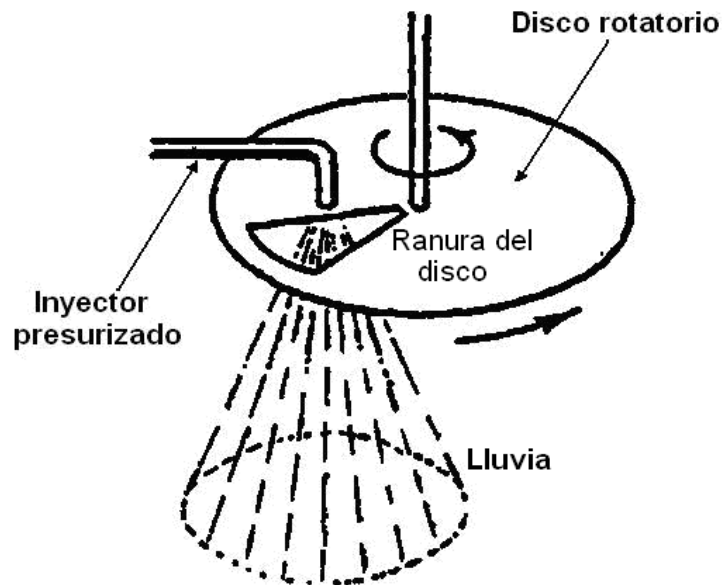


Figura 1.2 Funcionamiento del disco rotatorio.

### 1.3 Objetivos generales de la tesis

Presentar los desarrollos en cuanto al uso de la información espectral para modelar la relación precipitación-escurrimiento, en suelo desnudo y mezcla suelo-vegetación.

Modelar la relación humedad-reflectancia, con datos experimentales de lotes de escurrimiento de suelos desnudos, para la estimación temporal de los cambios en la humedad del suelo usando sensores remotos.

## 1.4 Referencias

Blanquies, J., M. Scharf, and B. Hallock. 2003. The design and construction of a rainfall simulator. IECA 34<sup>th</sup> Annual Conference and Expo. Las Vegas, Nevada.

Flanagan, D. C., J. C. Ascough, A. D. Nicks, M. A. Nearing, and J. M. Laflen. 1995. Overview of the WEPP Erosion Prediction Project. WEPP-Model documentation. Chapter 1. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory.

Flanagan, D. C., and M. A. Nearing. 1995. USDA-Water Erosion Prediction Project. Hillslope profile and watershed model documentation. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory. Report N° 10.

Morín, J., D. Goldberg, and I. Singer. 1967. Rainfall simulator with rotating disk. TRANS ASAE 10:74

Neitsch, S.L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry, J. R. Williams, and K. W. King. 2002. Soil and water assessment tool theoretical documentation, version 2000, TWRI Report TR-191. Texas Water Resources Institute, College Station. Texas, 498 p.

NRC. 1996. National soil survey handbook. Natural Resources Conservation Soil Survey Staff. Title 430-VI. U.S. Government Printing Office. Washington, D.C.

Sánchez C., I., J. Stone, y R. Jasso. 1999. Uso de lluvia artificial para parametrizar modelos de procesos hidrológicos. CENID-RASPA. México.

Sánchez C., I., y J. Asseline. 1999. Tipos de simuladores de lluvia. En: uso de lluvia artificial para parametrizar modelos de procesos hidrológicos. Sánchez *et al.* Eds. CENID-RASPA. México.

Sánchez C., I., y J. J. Stone. 1999. Generalidades sobre simulación de lluvia. En: uso de lluvia artificial para parametrizar modelos de procesos hidrológicos. Sánchez *et al.* Eds. CENID-RASPA. México.

Stone, J., G. Paige, y C. I. Sánchez. 1999. Planeación de investigación con simuladores de lluvia. En: uso de lluvia artificial para parametrizar modelos de procesos hidrológicos. Sánchez *et al.* Eds. CENID-RASPA. México.

Stone J. y G. Paige. Variable Rainfall Intensity Rainfall Simulator Experiments on Semi-arid Rangelands. USDA. Southwest Watershed Research Service.

USDA-NSERL. 1995. WEPP USER SUMMARY. Report N°11.

Williams, J. R. 1990. EPIC - Erosion Productivity Impact Calculator. Volume 1. Model Documentation. Volume 2. User Manual. Submitted as USDA-ARS Technical Bulletin.

Williams, J. R., P. T. Dyke and C.A. Jones. 1983. EPIC: a model for assessing the effects of erosion on soil productivity. In *Analysis of Ecological Systems: State-of-the-Art in Ecological Modeling*. Eds. W.K. Laurenroth *et al.* Elsevier, Amsterdam, pp 553-572.

## **CAPITULO 2. ELEMENTOS PARA EL DESARROLLO DE UNA HIDROLOGIA OPERACIONAL CON SENSORES REMOTOS: SUELO DESNUDO**

### **2.1 Introducción**

El uso de los sensores remotos en la solución de problemas aplicados ha generado grandes expectativas desde la década de los setentas cuando se lanzaron los primeros satélites comerciales de exploración de la superficie terrestre. No obstante esto, hasta hoy día los resultados obtenidos con el uso de la tecnología de los sensores remotos han sido menores a los esperados.

Uno de los problemas de la baja aplicabilidad práctica de los sensores remotos es el relacionado con su utilización en forma indirecta para estimar valores de parámetros biofísicos de las coberturas vegetales, por ejemplo. En ese formato, es común la utilización de aproximaciones empíricas o teóricas para estimar valores de los parámetros necesarios para la modelación de algún proceso físico o biológico. Así, los sensores remotos generan valores de parámetros, generalmente con alta incertidumbre, para hacer operacionales modelos específicos de los procesos, los cuales, en la mayoría de los casos, requieren de una gran cantidad de estos parámetros.

Una alternativa en la utilización de los sensores remotos es el desarrollo de modelos basados puramente en información espectral extraída de los satélites en plataformas espaciales. De esta manera, las ventajas de los sensores remotos, cubrimiento espacial exhaustivo y tiempos de visita cortos, pueden ser usadas en su máximo potencial.

En la hidrología superficial, concretamente en la relación precipitación-escorrentía, han existido diversos intentos de modelación del ciclo hidrológico en cada una de sus componentes, lo que requiere de datos que no están disponibles en forma

operacional y, generalmente, los existentes no están actualizados o no son confiables. Así, el problema de modelos complejos sin posibilidades de ser parametrizados es algo ya rutinario en las aplicaciones hidrológicas. Ejemplos de estos modelos son el EPIC (Sharpley y Williams, 1990) y el SWAT (Neitsh *et al.*, 2002).

Los modelos EPIC y SWAT utilizan el modelo del número de curva (NC) (SCS, 1972) para parametrizar la relación precipitación-escorrentía. El método del NC fue desarrollado para establecer una base consistente para estimar el escurrimiento ante cambios en el uso del suelo y el tipo de suelo (Rallison y Miller, 1981). Aunque simple, el método del NC puede ser usado como un paradigma para el desarrollo de una hidrología operacional usando sensores remotos.

En este trabajo se presentan las bases para establecer los valores de los parámetros asociados al tipo de suelo, en la relación precipitación-escorrentía. El caso de los valores de los parámetros asociados al uso del suelo son considerados en un trabajo complementario (Paz *et al.*, 2007).

## 2.2 Un paradigma para una hidrología operacional

El modelo del NC establece una relación empírica entre el escurrimiento  $Q$  (mm) y la precipitación  $P$  (mm), a escala diaria, como:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S)} \quad (1)$$

donde  $I_a$  es la abstracción inicial de la lluvia antes del escurrimiento (almacenamientos superficiales, intercepción por la vegetación e infiltración antes de la saturación del suelo) y  $S$  es un parámetro de retención máxima potencial del suelo, el cual varía espacialmente por cambios en el tipo y uso del suelo, estado actual de la vegetación y su manejo y pendiente; así como por cambios temporales

en la humedad del suelo. Paz (2007) ha cuestionado fuertemente la validez de la relación (1), concluyendo que no tiene bases hidrológicas. No obstante esto, el método del NC puede ser usado como un esquema o paradigma de desarrollo.

De acuerdo con SCS, el parámetro  $la$  es puesto generalmente en función de  $S$  ( $la=0.2S$ ), por lo que el único parámetro restante  $S$  es estimado de:

$$S = \frac{25400}{NC} - 254 \quad (2)$$

Así, el método del NC depende de un solo parámetro, de ahí su simplicidad y atractivo para ser usado como un método hidrológico operacional.

El número de curva (NC), parámetro integrado, depende de varios factores, donde los principales son:

- a. Del tipo de suelo, específicamente de su tasa de infiltración.
- b. Del uso del suelo, específicamente del tipo de vegetación y de su cobertura aérea.
- c. Del tipo de manejo (práctica) de la vegetación (temporalidad de la cobertura).
- d. Humedad antecedente (antes del evento de precipitación) del suelo.
- e. Pendiente del terreno.

Para la consideración de los factores mencionados que inciden en el NC, se han desarrollado cuadros que relacionan los tipos de suelo y el uso del suelo con el NC (NRCS, 2004), así como relaciones matemáticas que ajustan la humedad antecedente, la pendiente o  $S$  (Neitsch *et al.*, 2002).

En términos generales, el NC es un intento de parametrizar factores múltiples en uno solo, cambiando un problema complejo por, aparentemente, uno más simple. La hipótesis básica para su operación es que se debe contar con información del estado actual de una parcela o cuenca hidrológica para poder definir el NC. En la realidad

esto no sucede y es necesario hacer aproximaciones o utilizar algún tipo de información para poder establecer, en forma cruda, los factores que agrupo el NC.

Desde un punto de vista hidrológico, el planteamiento del modelo del NC requiere fundamentalmente de dos tipos de datos: la respuesta hidrológica del suelo y la respuesta hidrológica de la mezcla suelo-vegetación (dejando fija la geometría). En el caso de la respuesta hidrológica del suelo, es necesario contar con información, exhaustiva en términos espaciales y temporales, que permita modelar, o aproximar, la hidráulica del perfil del suelo. Para esto se pueden usar indicadores o índices como la textura, materia orgánica, etc. No obstante esto, la existencia de datos indirectos esta también sumamente restringida en las aplicaciones operacionales, independientemente de que su actualización (contenido de humedad) es prácticamente imposible a niveles diarios.

De la discusión anterior, los sensores remotos deben ser capaces de caracterizar la respuesta hidráulica del suelo, espacial y temporal, sin necesidad de calibrar las estimaciones realizadas, para poder ser considerados en aplicaciones operacionales. La estrategia para lograr este objetivo es utilizar la información espectral en una imagen satelital en términos relativos; es decir, por ejemplo, definiendo un valor de 1 para cuando la humedad volumétrica ( $\theta$ ) sea igual a la de capacidad de campo (CC) u otro valor superior y un valor de 0 cuando esta sea igual a la del punto de marchitamiento permanente (PMP) u otro valor inferior. Así, en una base de píxel por píxel, podemos darle un seguimiento temporal (y espacial) al suelo (desnudo, sin vegetación) en términos de un índice que varía de 0 a 1 y define en forma completa la respuesta hidrológica del suelo, usando un paradigma similar al del NC donde este modifica una relación funcional genérica entre la precipitación y el escurrimiento.

### **2.3 Reflectancia de los suelos y contenido de humedad**

Aunque los sensores remotos solo alcanzan a caracterizar una capa muy superficial del suelo (alrededor de 2-10 mm), es generalmente suficiente para definir el estado



energético o físico de la respuesta hidráulica del suelo. Conocida la humedad en la capa más superficial del suelo, podemos usar un modelo para describir la distribución de la humedad en el perfil del suelo. Por ejemplo, en el modelo SWAT (Neitsch *et al.*, 2002) se usa una función logística para esto, la cual es parametrizada de tal manera que el 50 % de la demanda evaporativa este en los primeros 10 mm y que el 95 % de la demanda se extraiga de los 100 mm mas superiores del suelo.

Partiendo de que tenemos píxeles de suelo desnudo, podemos analizar la relación entre la reflectancia y la humedad del suelo. Palacios *et al.* (2007) muestran como generar la clase suelo desnudo de los píxeles de imágenes satelitales tipo Landsat. Un aspecto que no será considerado en este trabajo es el procesamiento de la información espectral de los sensores remotos para quitar o reducir los efectos atmosféricos. Paz *et al.* (2005) muestran métodos operacionales para eliminar los efectos atmosféricos en imágenes satelitales.

Puesto que los sensores remotos observan los objetos terrestres en bandas espectrales, la discusión estará basada en las bandas espectrales del sensor TM5 del satélite LANDSAT definidas en el Cuadro 2.1

Cuadro 2.1 Bandas espectrales del sensor TM/ETM

<b>Banda</b>	<b>Nombre</b>	<b>Centro de banda (nm)</b>
A	Azul	486
V	Verde	572
R	Rojo	661
IRC	Infrarrojo Cercano	839
IRM1	Infrarrojo Medio 1	1,679
IRM2	Infrarrojo Medio 2	2,207

La reflectancia de los suelos depende de varios factores, entre los que destacan (Baumgardner *et al.*, 1985): la textura y mineralogía; la humedad del suelo; el contenido de materia orgánica (M.O.); el contenido de óxidos de fierro; el contenido de sales solubles y la rugosidad superficial del suelo. Así, para analizar la relación de

la reflectancia con la humedad del suelo es necesario dejar fijo el resto de los factores que inciden en ésta.

Usando datos espectrales de Beck *et al.* (1975), la figura 2.1 muestra las firmas espectrales en la bandas del sensor TM para diferentes contenidos de humedad de dos suelos (el resto de los factores esta fijo).

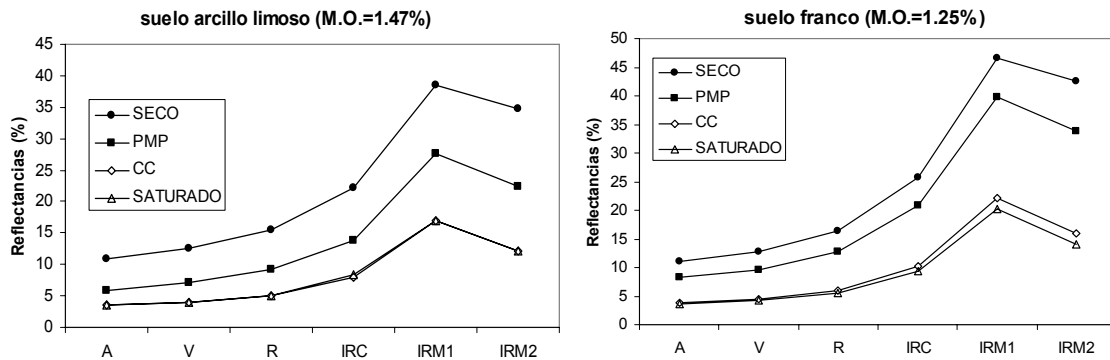


Figura 2.1 Firmas espectrales de dos suelos en función de su humedad.

En la figura 2.1 se observan las firmas espectrales típicas de los suelos, las cuales son modificadas en función del contenido de humedad. En el caso de las reflectancias para suelos saturados y a capacidad de campo (CC), los valores están muy próximos entre si, por lo que difícilmente pueden ser separables. En el otro extremo, las reflectancias entre un suelo a punto de marchitamiento permanente (PMP) y uno seco en un horno muestran diferencias apreciables.

En relación a cual es la banda espectral mejor para caracterizar un suelo (la que se satura menos; es decir cuando la reflectancia no cambia de valor al incrementarse la humedad), la respuesta es simple: la que tiene reflectancia mayor (IRM1) es lo que se satura más lentamente y la peor es la del azul (A). Esto es consecuencia de la teoría de la transferencia radiativa en medios turbios (homogéneos y con elementos ópticos infinitesimales) (Ross, 1981).

La relación funcional entre la reflectancia de los suelos y el contenido de humedad ha sido estudiada previamente y modelada en forma exponencial (Muller y Décamps, 2000; Weidong *et al.*, 2002; Lobell y Asner, 2002). Estos autores notaron que, generalmente, las reflectancias se saturan (no cambian de valor) para contenidos volumétricos que van de 0.3 a 0.4 en la bandas del infrarrojo y alrededor de 0.2 en las bandas del visible (A, V y R). Ahora bien, considerando el objetivo de construir un modelo de humedad del suelo basado en la reflectancias, para usos hidrológicos, podemos definir un límite de humedad como el de CC (si definimos a la saturación como límite de humedad, éste es indistinguible del de CC). Para texturas finas (las de mayor CC), la humedad volumétrica a capacidad de campo ( $\theta_{CC}$ ) esta entre 0.30 y 0.42 (Allen *et al.*, 1998), por lo que podemos usar a las reflectancias en forma confiable como estimadores de la CC de los suelos. El otro límite a usar seria el de PMP ( $\theta_{PMP}$ ); aunque para el estudio de la evaporación del suelo se puede usar el límite  $p\theta_{PMP}$ , con  $p=0.5$  (Allen *et al.*, 1998).

La figura 2.2 muestra los cambios en la reflectancia de la banda IRC con la humedad del suelo, para el caso de un suelo claro y uno oscuro, diferentes texturas, dentro de las instalaciones del Colegio de Postgraduados (COLPOS) en Montecillo, Estado de México.

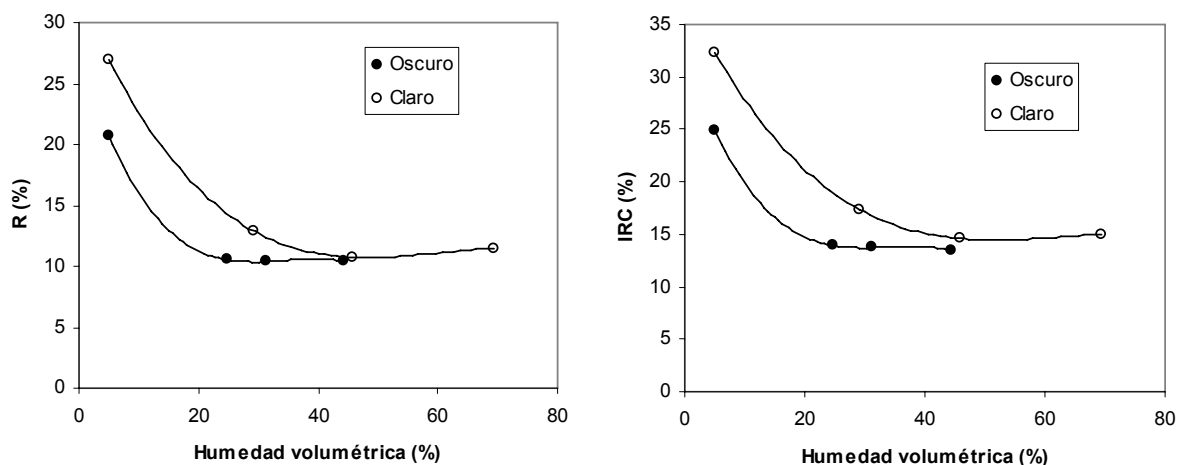


Figura 2.2 Cambio de la reflectancia del IRC con la humedad para dos suelos

Una forma adecuada para relacionar la reflectancia con la humedad del suelo es (Duke y Guérif, 1998; Lobell y Asner, 2002):

$$R = R_{SAT} + (R_{SECO} - R_{SAT}) \exp(-c\theta) \quad (3)$$

donde R significa reflectancia, cualquier banda, y  $R_{SAT}$  y  $R_{SECO}$  son las reflectancias para un suelo saturado y seco, respectivamente. La constante c es un coeficiente de atenuación.

Usando los límites de humedad definidos anteriormente, la ecuación (3) podemos invertirla para estimar la humedad volumétrica ( $R_{SECO} = kR_{PMP}$  y  $R_{SAT} = R_{CC}$ ):

$$\theta = -\frac{1}{c} \ln \left[ \frac{R - R_{CC}}{kR_{PMP} - R_{CC}} \right] \quad (4)$$

donde k es una constante empírica.

El problema de usar la relación (4) en términos operacionales con sensores remotos es que es necesario conocer las humedades en CC y PMP, así como el coeficiente de atenuación. Una forma alterna y simple, es generar una relación similar a la (4) entre  $\theta$  y R, y definir los límites  $\theta = 0$  cuando  $R = kR_{PMP}$  y  $\theta = 1$  cuando  $R = R_{CC}$ , generando una variable indirecta de la humedad del suelo usando sensores remotos ( $\theta_{sr}$ ) como:

$$\theta_{sr} = 1 - \left[ \frac{1}{\ln(2)} \right] \left[ 1 + \frac{R - R_{CC}}{kR_{PMP} - R_{CC}} \right] \quad (5)$$

La cual puede aproximarse bi-linealmente por:

$$\theta_{sr} = 1 - \left[ \frac{R - R_{CC}}{kR_{PMP} - R_{CC}} \right] \quad (6)$$

La ecuación (6) puede ser simplificada si definimos una relación entre  $R_{PMP}$  y  $R_{CC}$ , dejando fija a  $k$ . La aproximación de la ecuación (5) es mejor cuando la reflectancia tiende a la de un suelo a PMP, dado que  $\exp(X)=X$  cuando  $X$  es muy pequeño.

Para revisar la validez del modelo propuesto en la relación (5), se realizó un experimento en el COLPOS, suelo franco arcillo limoso, bajo dos condiciones de manejo: con labranza y sin labranza. El suelo fue saturado al inicio del experimento y se realizaron mediciones de humedades gravimétricas y reflectancias (bandas del sensor TM5) durante dos días, con diferentes periodicidades.

En la figura 2.3 solo se presentan los resultados de las mediciones temporales de humedad y reflectancias para la banda del IRC y para el caso del suelo sin labranza. Considerando que existieron diferencias en los tiempos de muestreo para la humedad y el IRC, se ajustaron polinomios de orden tres o cuatro a los datos de la figura 2.3 para estimar valores de ambas variables en tiempos similares. La figura 2.4 muestra la relación entre la humedad e IRC en el día 1 para el suelo sin labranza, donde se observa que el modelo bi-lineal se ajusta bien a los datos experimentales estimados, donde existe un valor del IRC que permanece constante (se satura) al incrementarse la humedad del suelo y esta banda no puede ser usada para estimar la humedad más allá de su saturación.

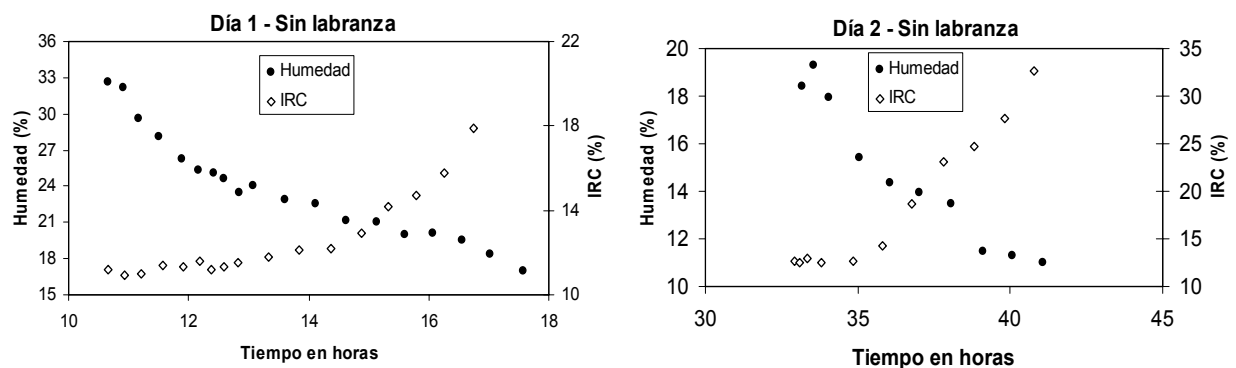


Figura 2.3 Evolución temporal de la humedad e IRC para el suelo sin labranza

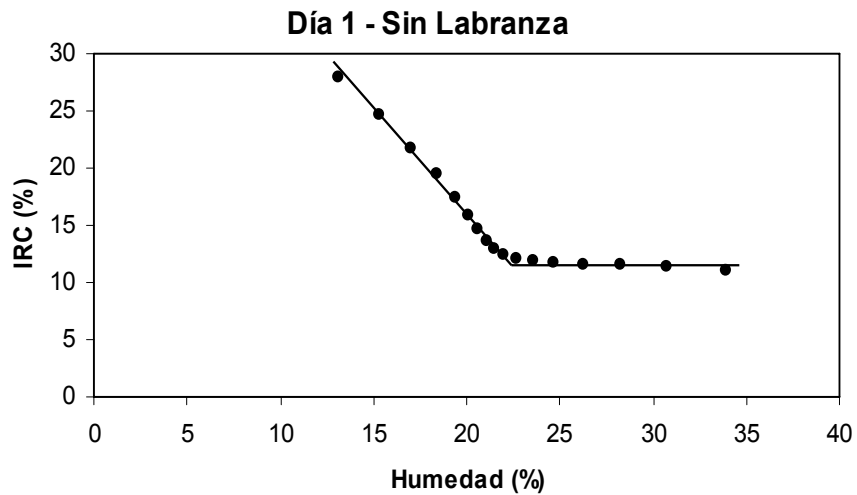


Figura 2.4 Relación entre la humedad e IRC en el día 1 del suelo sin labranza.

En la figura 2.5 se presenta la relación entre  $\theta_{sr}$  y la humedad para los dos días de medición del suelo sin labranza. Se observa de esta figura que el modelo de la relación (5) se ajusta bien a los datos experimentales estimados, donde los valores de  $kR_{PMP}$  y  $R_{CC}$  fueron estimados en forma iterativa. En las aplicaciones operacionales de los sensores remotos, estos dos valores pueden ser obtenidos fácilmente, ya que representan el valor máximo y mínimo, respectivamente, de las reflectancias de un píxel (estandarizando las condiciones atmosféricas y la geometría sol-sensor).

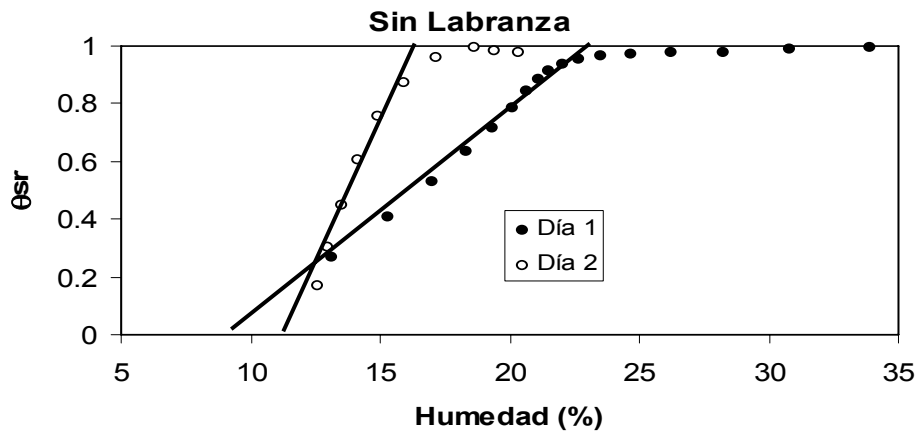


Figura 2.5 Relación entre  $\theta_{sr}$  y la humedad del suelo sin labranza

El modelo mostrado en la figura 2.5 presenta una situación de cambio en las propiedades del suelo, donde la relación entre  $\theta_{sr}$  y la humedad del suelo se modifica en función del contenido inicial de esta última.

### 2.3.1 Relación entre $R_{PMP}$ y $R_{CC}$

Para analizar la relación entre  $R_{PMP}$  y  $R_{CC}$ , se usó la base de datos de Beck *et al.* (1975) de datos de reflectancias de suelos en condiciones de laboratorio. La figura 2.6 muestra la relación entre las reflectancias para humedad del suelo a PMP y CC para las bandas del sensor TM5 referenciadas a las de suelo seco en horno para un suelo arcillo limoso ( $M.O.=1.47\%$ ).

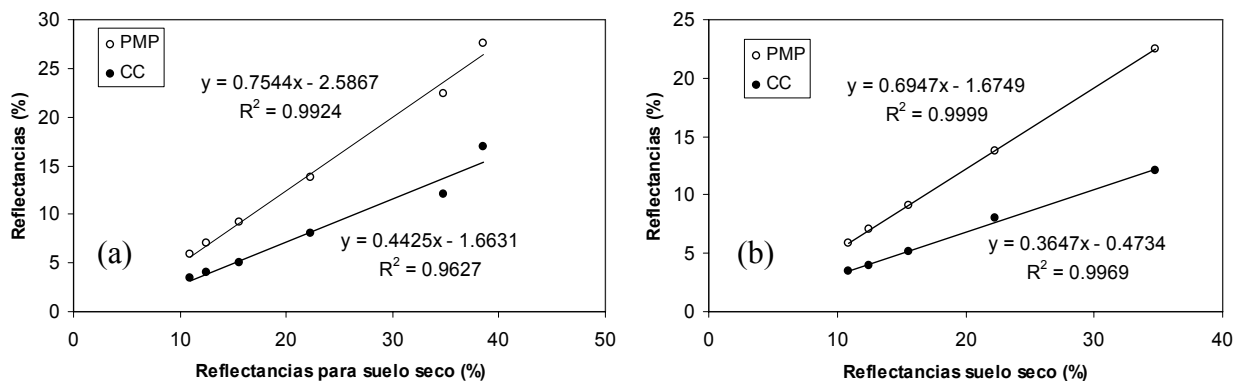


Figura 2.6 Relación entre las reflectancias de un suelo seco con las de CC y PMP

La figura 2.6a muestra patrones lineales entre las reflectancias referenciadas, donde la banda del IRM1 (valor más alto de la reflectancia) rompe el patrón mencionado. En la figura 2.6b se eliminaron las reflectancias de las bandas de IRM1, por lo que el patrón lineal resulta en mejores ajustes.

Considerando el interés en establecer una relación simple entre  $R_{PMP}$  y  $R_{CC}$ , la figura 2.7 muestra el patrón entre estas bandas para un suelo arcillo limoso y uno franco.

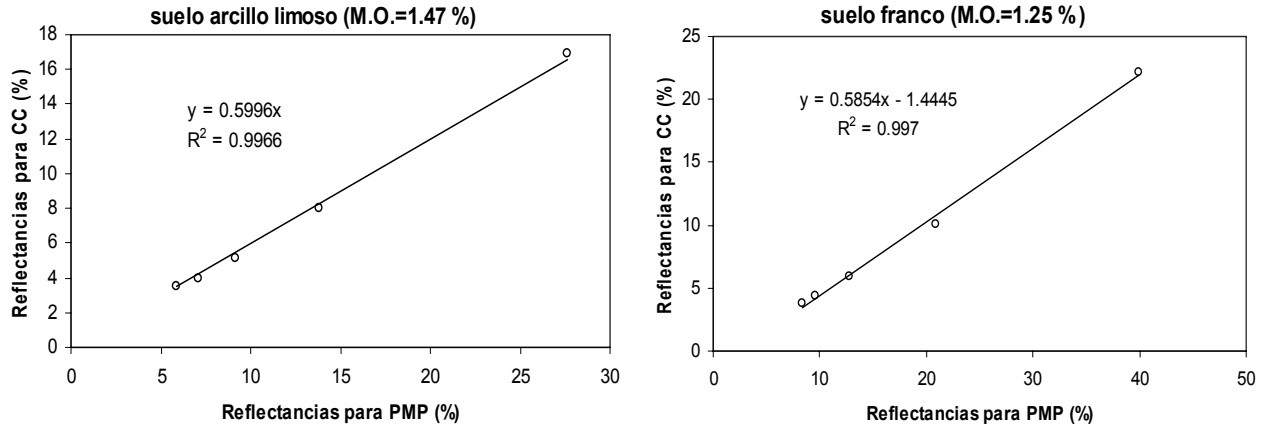


Figura 2.7 Relación entre  $R_{PMP}$  y  $R_{CC}$  para dos suelos

En el caso del suelo arcillo limoso de la figura 2.7, se ha forzado la relación a que pase por el origen, de tal manera que se pueda establecer la relación  $R_{CC}=mR_{PMP}$ , obteniéndose buenos resultados. Para el caso del suelo franco, el forzar la regresión lineal genera mayor error, figura 2.4.

El Cuadro 2.2 muestra el valor de  $m$  obtenido por regresiones lineales forzadas a pasar por el origen ( $R^2 > 0.96$  en todos los casos), usando diferentes combinaciones de bandas espectrales del sensor TM5 y todos los datos de Beck *et al.* (1975).

Del Cuadro 2.2 se observa que podemos usar un valor constante para  $m$ , como primera aproximación, el cual varía alrededor de 0.5. El valor más alto le corresponde a la banda IRM1 y el menor a la banda A, tal como es esperado. Para el IRC, se puede usar un valor de  $m$  de 0.5. En el caso de la banda del IRC, en el Cuadro 2.2 también se presenta entre paréntesis la constante  $n$  ( $R_{PMP}=nR_{SECO}$ ), que muestra mayor variación que el caso de  $m$ .



Cuadro 2.2 Estimación del parámetro m para combinaciones de bandas espectrales.

Suelo	M.O. (%)	A, V, R, IRC, IRM2	A, V, R, IRC	V, R, IRC, IRM2	R, IRC	IRC*	IRM1
arcillo limoso	1.47	0.5524	0.5738	0.5504	0.5724	0.5793 (0.6193)	0.6117
	1.84	0.4585	0.4562	0.4595	0.4602	0.4622 (0.7131)	0.5283
	3.33	0.5530	0.5619	0.5518	0.5594	0.5679 (0.6522)	0.6144
franco arcillo limoso	1.14	0.5179	0.5448	0.5172	0.5556	0.5695 (0.7904)	0.5728
	1.47	0.4863	0.4672	0.4880	0.4728	0.4812 (0.8168)	0.5776
	1.55	0.4858	0.4792	0.4855	0.4791	0.4881 (0.7965)	0.5642
	1.83	0.4350	0.4483	0.4352	0.4623	0.4779 (0.7100)	0.5009
	2.64	0.5313	0.5272	0.5308	0.5273	0.5333 (0.5969)	0.6029
	2.66	0.4220	0.4478	0.4215	0.4510	0.4553 (0.7257)	0.4937
franco limoso	0.6	0.4354	0.4541	0.4333	0.4596	0.4693 (0.9474)	0.4892
	0.63	0.4436	0.4348	0.4456	0.4446	0.4586 (0.8009)	0.5279
	0.66	0.4708	0.4729	0.4716	0.4780	0.4842 (0.8780)	0.5561
	0.86	0.4425	0.4540	0.4458	0.4719	0.4895 (0.8730)	0.5223
	1.32	0.4425	0.4540	0.4458	0.4719	0.4895 (0.8436)	0.5223
franco	1.25	0.4708	0.4729	0.4716	0.4780	0.4842 (0.8137)	0.5561
Promedio		0.477	0.483	0.477	0.490	0.499 (0.769)	0.549
Desviación estándar		0.044	0.045	0.043	0.042	0.042 (0.103)	0.041

\* Los valores entre paréntesis son de la constante n ( $R_{PMP}=nR_{SECO}$ )

En el caso de los píxeles de suelo desnudo en una imagen satelital, las reflectancias medidas por los sensores remotos representan un promedio de la humedad del suelo en cada píxel. Así, la heterogeneidad de la distribución espacial de la humedad es integrada a la escala del píxel y representada como una humedad equivalente (homogénea) en todo el píxel.

Para visualizar el efecto de la heterogeneidad de la humedad del suelo, la figura 2.8 muestra un experimento en el COLPOS donde se midieron las reflectancias de un suelo franco arcillo arenoso en condición seca y húmeda a diferentes alturas (relación altura del sensor a diámetro de medición de 2 a 1). Se observa de la figura 2.8 que el valor de m varia con la dimensión del píxel (entre mas grande, entonces es mayor la probabilidad de encontrar una distribución heterogénea de la humedad) y fluctúa alrededor de 0.5. Esto demuestra un efecto de escala relativo a las dimensiones de los píxeles en la distribución de la humedad.

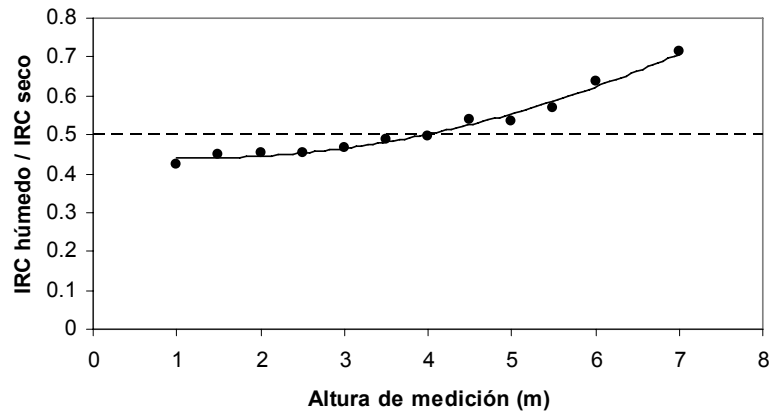


Figura 2.8 Efecto de escala en la distribución de la humedad del suelo en el IRC

## 2.4 Evolución temporal de la humedad y reflectancia de los suelos

Uno de los puntos críticos de los modelos de precipitación-escurrimiento es la determinación del estado de la humedad del suelo con respecto al tiempo, para poder analizar los cambios producto de la saturación del suelo.

La evaporación de la humedad del suelo manifiesta al menos dos estados diferentes (Gardner y Hillel, 1962): en el primero, la evaporación está limitada por la atmósfera (energía disponible) y en el segundo la evaporación está limitada por las propiedades hidráulicas de los suelos. Estos dos estados han sido caracterizados en condiciones de campo (Idso *et al.*, 1974; Brutsaert y Chen, 1995), con transiciones entre ellos. El primer estado está definido por la evaporación potencial, promedio temporal, del suelo y puede estimarse usando información disponible en estaciones meteorológicas modernas (Makkink, 1957; Priestley y Taylor, 1972).

El patrón temporal de la tasa de evaporación en el segundo estado sigue un comportamiento proporcional a  $t^{-1/2}$  (Ritchie, 1972). La caracterización del segundo estado requiere del conocimiento de algunas propiedades hidráulicas del suelo (básicamente la desortividad), por lo que puede ser aproximado usando modelos

hidráulicos simples (Brutsaert y Chen, 1995; Salvucci, 1997). Bajo condiciones límites, y usando hipótesis de similaridad, es posible definir el patrón temporal de la evaporación del suelo en el segundo estado y parametrizarlo solo en función del tiempo de duración del primer estado ( $t_d$ , tiempo al inicio del secado) (Salvucci, 1997; Amano y Salvucci, 1999). No obstante estas simplificaciones, el modelar la evolución temporal de la evaporación del suelo requiere de su medición (al menos conocer  $t_d$ ).

Una alternativa de medición de la evaporación del suelo ha sido el uso del albedo (reflectancia) (Idso *et al.*, 1974 y 1975; Jackson *et al.*, 1976; Salvucci, 1997; Amano y Salvucci, 1999). Idso *et al.* (1975) presenta un modelo de variación del albedo del suelo con la humedad, en el perfil del suelo, por lo que puede usarse para expandir las mediciones superficiales en todo el perfil del suelo. La evidencia experimental muestra que la variación temporal del albedo se puede aproximar en forma lineal (Idso *et al.*, 1974; Salvucci, 1997; Amano y Salvucci, 1999); aunque otras relaciones funcionales se ajustan bien ( $\ln$  y  $t^{1/2}$ ).

De acuerdo a la discusión anterior, la figura 2.9 muestra el modelo propuesto de la evolución temporal de la reflectancia asociada a los cambios de humedad de los suelos. En la figura 2.9,  $t_r$  es el tiempo de recuperación (secado) y describe una fase lineal de la reflectancia. Considerando intervalos temporales de un día o algo menores, en la figura 2.9 se ha supuesto un cambio brusco (dentro de un día) de la reflectancia de la condición de suelo seco a húmedo (evento de precipitación o riego). Esta situación corresponde al caso donde  $P > I_a$  en el método del NC.

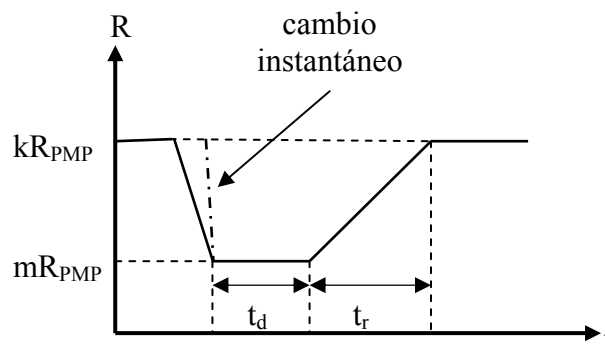


Figura 2.9 Modelo de la evolución temporal de la reflectancia-humedad del suelo

Ahora bien, si suponemos que los cambios en la humedad del suelo ( $\theta$ ) siguen un patrón aproximadamente logarítmico en el tiempo (segundo estado), entonces la aproximación de la ecuación (5) puede ser usada en forma sólida.

El modelo de la figura 2.9 puede ser usado para estimar el coeficiente de reducción de la evaporación, usando la ecuación (5), para evaluar el efecto del cambio en la humedad del suelo en los coeficientes del cultivo usados en la estimación de la evapotranspiración (Allen *et al.*, 1998).

Si en la figura 2.9 se supone un patrón de cambio de la reflectancia proporcional a  $t$  (la reflectancia representa una propiedad acumulativa), entonces la única incógnita es  $t_d$  o, suponiendo valores para  $k$  y  $m$ , con un dos puntos en la etapa de secado se puede caracterizar el modelo propuesto.

Para revisar la validez del modelo propuesto en la figura 2.9 se analizó el experimento en el COLPOS de las dos condiciones de manejo del suelo: sin y con labranza. La figura 2.10 muestra la evolución temporal de IRC para los dos días de medición aproximadamente de 10:00 AM a 6:00 PM).

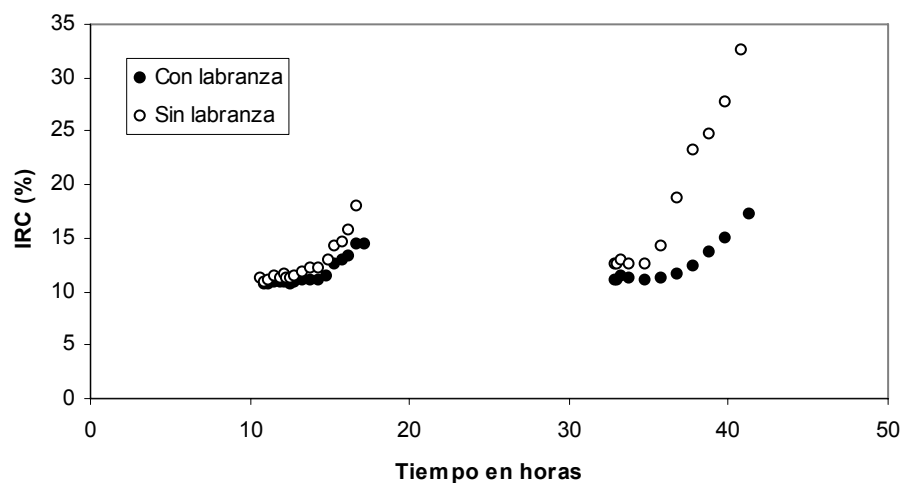


Figura 2.10 Evolución temporal del IRC asociado a la humedad del suelo

En la figura 2.10 se observa que el modelo propuesto es seguido en forma adecuada por los datos experimentales. En el segundo día, el suelo sufrió cambios de humedad ligados a neblina. En la figura 2.11 se muestra el modelo ajustado al segundo estado (secado) durante el segundo día del experimento.

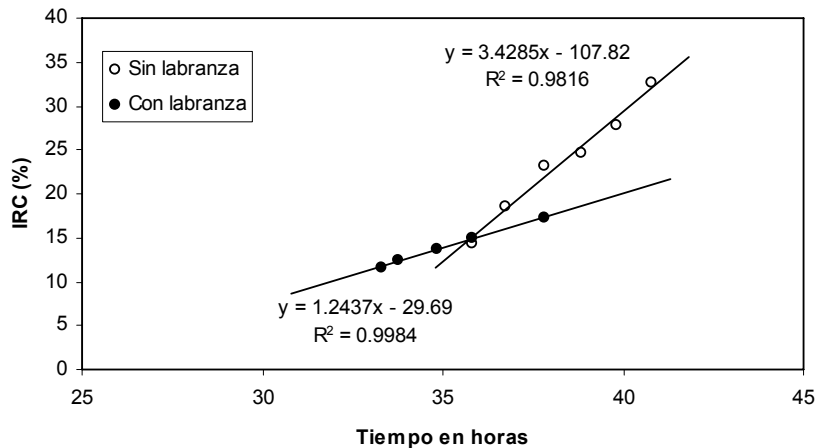


Figura 2.11 Modelo ajustado al segundo estado de la evaporación del suelo

En los análisis anteriores se enfatizó el uso de la banda del IRC por razones asociadas a la simetría (línea del suelo) de las reflectancias entre esta banda y la del R, tal como se discute en Paz *et al.* (2007). No obstante lo anterior, el uso de la banda del IRC presenta problemas de saturación mayores que el uso de la banda del IRM1, figura 2.12. El uso de la banda del IRM1 es analizado en el formato de la mezcla suelo-vegetación por Paz *et al.* (2007), por lo que el uso de esta banda para el caso del suelo desnudo tiene las mismas bases que las presentadas para el IRC.

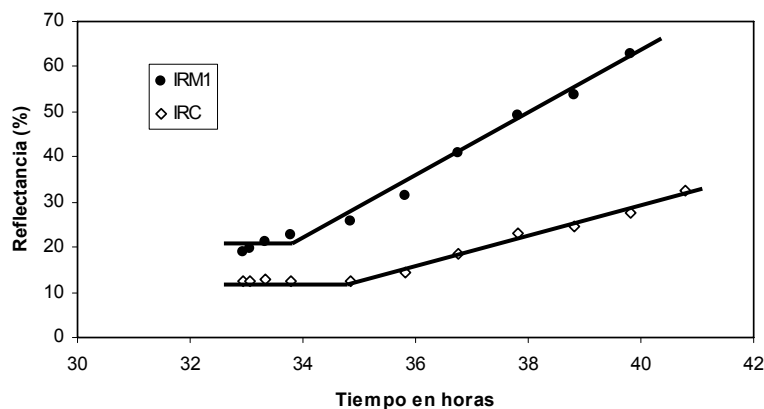


Figura 2.12 Modelos temporales de las reflectancias para las bandas del IRC e IRM1 para el segundo día del suelo sin labranza.

## 2.5 Conclusiones

La caracterización operacional de la condición de humedad del suelo, para fines de modelación de la relación precipitación-escorrimento, ha sido revisada bajo la consideración de solo usar información espectral de sensores remotos. Así, en términos relativos, los cambios de humedad del suelo pueden ser caracterizados por medio de la reflectancia de la capa más superficial del suelo.

Los análisis realizados muestran que es posible construir un modelo simple, operacional, de la evaporación del suelo si consideramos como constantes la relación entre las humedades a capacidad de campo y punto de marchitamiento permanente. La humedad obtenida por los sensores remotos se refleja en una humedad que varía de 0 ( $kR_{PMP}$ ) a 1 ( $mR_{PMP}$ ), donde  $m$  puede suponerse iguales a 0.5 (banda del infrarrojo cercano) y  $k = 1$ .

La evidencia experimental de la evolución temporal del secado del suelo (segundo estado de la evaporación), muestra resultados compatibles con modelos acumulativos de la evaporación, suponiendo una relación lineal de la reflectancia proporcional al tiempo. Así, la única variable requerida para modelar la evaporación, relativa, del suelo es el tiempo hasta el inicio del secado ( $t_d$ ) o contar con dos mediciones de la reflectancia en la etapa de recuperación ( $t_r$ ).

## 2.6 Referencias

Allen, R.G., L. S. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO. Rome. pp. 300

Amano, E. and G. D. Salvucci. 1999. Detection and use of three signatures of soil-limited evaporation. Remote Sensing of Environment. 67. pp: 108-122

Baumgardner, M. F., I. F. Silva, I. I. Biehl and E.R. Stoner. 1985. Reflectance properties of soils. Advances in Agronomy. 38. pp: 1-44

Beck, R. H., B. F. Robinson, W. W. McFee and J.B. Peterson. 1975. Spectral characteristics of soil moisture, organic carbon and clay content. LARS Technical Note 081176. University of Purdue, Indiana. pp. 91

Brutsaert, W. and D. Chen. 1995. Desorption of the two stages of drying of natural tallgrass prairie. *Water Resources Research*. 31. pp:1305-1313

Duke, C. and M. Guérif. 1998. Crop reflectance estimate errors from the SAIL model due to spatial and temporal variability of canopy and soil characteristics. *Remote Sensing of Environment*. 66. pp:286-297

Gardner, W. R. and D. I. Hillel. 1962. The relation of external evaporative conditions to the drying of soils. *Journal of Geophysical Research*. 67 pp: 4319-4325

Idso, S. B., R. D. Jackson, R. J. Reginato, B. A. Kimball and F. S. Nakayama. 1975. The dependence of bare soil albedo on soil water content. *Journal of Applied Meteorology*. 14. pp: 109-113

Idso, S.B., R. J. Reginato, R. D. Jackson, B. A. Kimball and F. S. Nakayama, F.S. 1974. The three stages of drying of a field soil. *Soil Science Society of America Proceedings*. 3. pp: 831-837.

Jackson, R. D., S. B. Idso and R. J. Reginato. 1976. Calculation of evaporation rates during the transition from energy-limiting to soil-limiting phases using albedo data. *Water Resources Research*. 12. pp: 23-36

Lobell, D.B. and G. P. Asner. 2002. Moisture effects on soil reflectance. *Soil Science Society of America Journal*. 66. pp: 722-727

Makkink, G. F. 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters. *Journal of the Institute of Water Engineering*. 11. pp: 277-288

Muller, E. and H. Décamps. 2000. Modeling soil moisture-reflectance. *Remote Sensing of Environment*. 76. pp:173-180

NRCS. 2004. Part 630 Hydrology. *National Engineering Handbook*. Chapter 10 Estimation of direct runoff from storm rainfall. Natural Resources Conservation Service. United States Department of Agriculture. (210-VI-NEH, July 2004).

Neitsch, S.L., j.g. Arnold, j.r. Kiniry, J.R. Williams and k.w. King. 2002. Soil and water assessment tool theoretical documentation. Version 2000. TWRI Report TR-191. Texas Water Resources Institute. College Station, Texas. pp 498

Palacios, L .A., F. Paz, J. L. Oropeza, B. Figueroa, M. Martínez, C. A. Ortiz y E. García. 2007. Clasificador genérico de objetos en imágenes ETM+. *Agrociencia*. 40. pp:613-626

Paz, P. F. 2007. Mitos y falacias del método hidrológico del numero de curva del SCS / NRCS. Enviado a *Agrociencia*.

Paz, P. F., E. Palacios, L. A. Palacios, L. Tijerina. y E. Mejía. 2005. Correcciones atmosféricas usando patrones invariantes en el espacio del rojo e infrarrojo cercano. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*. 1. pp:51-64.

Priestley, C. H. and R. J. Taylor. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*. 100. pp:81-92

Rallison, R. E. and N. Miller. 1981. Past, present and future of SCS runoff procedure. In: V.P. Singh (Ed.), *Rainfall Runoff Relationship*. Water Resources Publications. Littleton, Co. pp. 353-364

Ritchie, J. T. 1972. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research*. 8. pp: 1204-1213

Ross, J. 1981. *The radiation regime and architecture of plant stands*. W. Junk. Norwell, MA. pp 391

Salvucci, G. D. 1997. Soil and moisture independent estimation of stage-two evaporation from potential evaporation and albedo or surface temperature. *Water Resources Research*. 33. pp: 111-122

Sharpley, A. N. and J. R. Williams (Eds.). 1990. EPIC – Erosion/Productivity Impact Calculator. 1. Model documentation. USDA Technical Bulletin No. 1768

SCS. 1972. Section 4: Hidrology. *National Engineering Handbook*. Soil Conservation Service. USDA.

Weidong, L., F. Baret, G. Xingfa, T. Qingxi, Z. Lanfen and Z. Bing. 2002. Relating soil surface moisture to reflectance. *Remote Sensing of Environment*. 81. pp: 238-246



## **CAPITULO 3. ELEMENTOS PARA EL DESARROLLO DE UNA HIDROLOGIA OPERACIONAL CON SENSORES REMOTOS: MEZCLA SUELO-VEGETACION**

### **3.1 Introducción**

La respuesta hidrológica de una cuenca o parcela es dependiente de un gran número de factores que interactúan entre sí y dificultan su modelación en forma relativamente simple. Aunque fuera posible esto, los requerimientos de datos, espacial y temporalmente distribuidos, hace poco práctico este enfoque en grandes áreas, particularmente en regiones donde no se cuenta con información suficiente o confiable.

Los sensores remotos son una tecnología que ha generado grandes expectativas desde su introducción en la época de los setentas. La ventaja de muestreos espacialmente exhaustivos y tiempos de visita cortos al mismo punto hacen único este medio de monitoreo de la superficie terrestre. No obstante esto, los desarrollos operacionales de esta tecnología han sido magros y fuertemente empíricos, requiriendo la calibración continua de las relaciones entre la información espectral y las variables biofísicas o hidrológicas. Parte de este problema consiste en usar la información espectral en forma indirecta, estimación de variables que inciden en un proceso, y no bajo un formato directo de uso.

En la mezcla suelo-vegetación, los sensores remotos utilizan el alto contraste entre la banda espectral del rojo (R) y del infrarrojo cercano (IRC) (Tucker, 1979) para formular índices espectrales de la vegetación (IV) que puedan ser relacionados con variables como el índice de área foliar (IAF), cobertura de la vegetación ( $f_v$ ), biomasa (B), humedad del suelo ( $\theta$ ), etc. La gran mayoría de los IV actuales tienen bases empíricas y no modelan en forma adecuada la dinámica del crecimiento de la vegetación (Paz *et al.*, 2007a).

En este trabajo, se revisa el uso de la información espectral (sensores remotos pasivos) para modelar la respuesta hidrológica, relación precipitación-escorrentía, de la mezcla suelo-vegetación. En un primer trabajo (Paz *et al.*, 2007b) se analizó el caso del suelo desnudo y se propusieron varios modelos para el uso operacional de las reflectancias de imágenes satelitales. El paradigma introducido para el desarrollo de las propuestas fue el método del número de curva (NC) (SCS, 1972).

### 3.2 Uso clásico de los sensores remotos pasivos en hidrología

El uso de los sensores remotos en aplicaciones hidrológicas ha estado centrado en la estimación de las componentes del balance de energía. Así, de la ecuación del balance de energía dada por:

$$R_n = ET + G + H \quad (1)$$

donde  $R_n$  es la radiación neta,  $ET$  es el flujo de calor latente (evapotranspiración),  $G$  es el flujo de calor en el fondo/suelo de los cultivos y  $H$  es el calor sensible. Las componentes de la ecuación (1) serán supuestas en mm en lo siguiente, por lo que la evapotranspiración debe ser multiplicada por el calor latente de evaporación.

En el caso de los sensores remotos, es posible realizar una estimación del flujo de calor sensible usando el infrarrojo térmico (IRT) que es una medición de la temperatura radiativa de la superficie ( $T_{rs}$ ). El flujo de calor sensible puede calcularse de:

$$H = \frac{\rho c_p (T_{as} - T_a)}{r_a} \quad (2)$$

donde  $\rho c_p$  es la capacidad calorífica volumétrica,  $r_a$  es la resistencia aerodinámica,  $T_a$  es la temperatura del aire y  $T_{as}$  es la temperatura aerodinámica de la superficie.

Los sensores remotos miden la temperatura radiativa y no la aerodinámica, por lo que es necesario parametrizar a esta última en función de variables biofísicas como IAF y  $f_v$  (Chehbouni *et al.*, 1997). En forma similar, la resistencia aerodinámica  $r_a$  es generalmente parametrizada en función del IAF,  $f_v$  y la altura  $H$  del cultivo (Shuttleworth y Wallace, 1985; Choudhury y Monteith, 1998). En lo siguiente, el IAF considerado es global; es decir el IAF local de sólo la vegetación es multiplicado por  $f_v$  para considerar el caso de una mezcla suelo-vegetación (medio heterogéneo).

La evapotranspiración actual  $ET$  es generalmente estimada usando coeficientes de cultivos ( $K_c$ ) que multiplican a la evapotranspiración de referencia (Allen *et al.*, 1998). La  $ET$  de referencia puede ser estimada usando información meteorológica mínima (Makkink, 1957; Priestley y Taylor, 1972). Ritchie (1972) propuso una relación entre el IAF y  $K_c$ , por lo que dado que existe una relación entre el IAF y los IV (Baret y Guyot, 1991), entonces es posible relacionar  $K_c$  con los IV. Así, los coeficientes del cultivo son estimados usando IV (Heilman *et al.*, 1982; Bausch y Neale, 1987; Bausch, 1993). El problema de este enfoque, además de los requerimientos de información, de su representatividad espacial y de validez de los IV, es que es necesario realizar ajustes adicionales, nuevos factores multiplicativos, para tomar en cuenta condiciones no idealizadas en el crecimiento de los cultivos.

Una alternativa mas compleja de estimación de  $ET$  es el uso de métodos residuales del balance de energía. Estos métodos están basados en la estimación de  $R_n$ ,  $G$  y  $H$  usando relaciones empíricas o semi-empíricas entre estas componentes y la información espectral de los sensores remotos. La estimación de  $ET$  es realizada como un residual de la ecuación (1). Entre los usados esta el modelo SEBAL (Bastiaansen *et al.*, 1998), el modelo METRIC (Allen *et al.*, 2005), el modelo SEBI (Menenti y Choudhury, 1993), el cual fue mejorado para generar el modelo SEBS (Su, 2002) y el modelo S-SEBI (Roerink *et al.*, 2000), que es una versión simplificada del SEBI. La estimación de cada una de las componentes y subcomponentes de la ecuación del balance de energía es formulada en términos de relaciones empíricas con diferentes IV (Chemin, 2004; Allen *et al.*, 2005). Ahora bien, considerando que

las variables biofísicas IAF,  $f_v$  y H están correlacionadas entre si, el uso de IV introduce multicolinealidad en las formulaciones que generan problemas de sub y sobre estimación, que algunas veces se compensan entre si.

Otro enfoque utilizado es el de los métodos indirectos. Estos están basados en una parametrización de modelos de las componentes del balance de energía, acoplados a formulaciones semi-empíricas con parámetros accesibles por los sensores remotos. Los modelos de dos o mas fuentes (Shuttlewoth y Wallace, 1985; Kustas y Norman, 1997) del balance de energía, son acoplados a modelos biofísicos del crecimiento de los cultivos, de tal forma que las estimaciones de los sensores remotos son asimiladas a las predicciones de estos modelos y usadas para actualizarlos (Oliosio *et al.*, 1999). Este tipo de métodos requiere un número intensivo de variables que deben parametrizarse en función de relaciones empíricas o semi-empíricas usando sensores remotos u otros datos.

Las estimaciones de las componentes del balance de energía usando sensores remotos son de tipo instantáneo, por lo que es necesario relacionarlas con tiempos mayores (diarios). Para esto se utiliza comúnmente la fracción evaporativa  $\Lambda$ :

$$\Lambda = \frac{\lambda ET}{Rn - G} \quad (3)$$

la cual es relativamente constante durante el transcurso del día (Crago, 2000).

Estimada ET, el siguiente paso es establecer la relación entre la precipitación (P) y el escurrimiento directo (Q) usando el balance de agua (unidades en mm):

$$P = ET + Q + I + \Delta\theta \quad (4)$$

donde I es la infiltración en el suelo (que considera los almacenamientos iniciales en el suelo y la vegetación) y  $\Delta\theta$  es el cambio en el almacenamiento del perfil del suelo. Considerando que la estimación de estas dos ultimas variables requiere de

establecer relaciones empíricas con la información satelital, podemos dejar en claro que el enfoque actual del uso de los sensores remotos en la relación precipitación-escorrimento directo requiere de un gran número de relaciones empíricas, auto correlacionadas entre sí, que deben calibrarse con información de campo. Este camino largo de modelación es muy inestable en las predicciones y sujeto a errores que se propagan en las cadenas de modelación; además de poco práctico.

### 3.3 Un enfoque alternativo del uso de los sensores remotos

En Paz *et al.* (2007b) se utilizó el método del NC como un paradigma para el desarrollo de una hidrología operacional usando sensores remotos, para el caso del suelo desnudo. El método del NC establece una relación empírica entre el escurrimiento  $Q$  (mm) y la precipitación  $P$  (mm), a escala diaria, como:

$$Q = \frac{(P - Ia)^2}{(P - Ia + S)} \quad (5)$$

donde  $Ia$  es la abstracción inicial antes del escurrimiento (evapotranspiración, almacenamientos superficiales, intercepción por la vegetación e infiltración antes de la saturación del suelo) y  $S$  es un parámetro de retención, el cual varía espacialmente por cambios en el tipo y uso del suelo, manejo y pendiente; así como por cambios temporales en la humedad del suelo. Paz (2007) ha cuestionado la validez de la relación (5) en términos hidrológicos y matemáticos.

El parámetro  $Ia$  es puesto generalmente en función de  $S$  ( $Ia = 0.2S$ ), por lo que el único parámetro restante  $S$  es estimado de:

$$S = \frac{25400}{NC} - 254 \quad (6)$$

Así, el método del NC depende de un solo parámetro, de allí su simplicidad y atractivo para ser usado como un método hidrológico operacional.

El número de curva (NC), parámetro integrado, depende de varios factores, donde los principales son: tipo de suelo, específicamente de su tasa de infiltración; uso del suelo, específicamente del tipo de vegetación y de su cobertura aérea; tipo de manejo (práctica) de la vegetación (temporalidad de la cobertura); humedad antecedente (antes del evento de precipitación) del suelo; y, pendiente del terreno.

En términos generales, el NC es un intento de parametrizar factores múltiples en uno solo, cambiando un problema complejo por, aparentemente, uno mas simple. La hipótesis básica para su operación es que se debe contar con información del estado actual de una parcela o cuenca hidrológica para poder definir el NC. En la realidad esto no sucede y es necesario hacer aproximaciones o utilizar algún tipo de información para poder establecer, en forma cruda, los factores que agrupo el NC.

### **3.3.1 Atrayentes espectrales de la dinámica del crecimiento de la vegetación**

En lo siguiente la discusión espectral estará basada en las bandas del sensor ETM+ del satélite LANDSAT 7 (azul o A, centrada en 480nm; verde o V, centrada en 570nm; R centrada en 660nm; IRC centrada en 840nm; infrarrojo medio 1 o IRM1 centrada en 1650nm; infrarrojo medio 2 o IRM2 centrada en 2200nm).

Los patrones espectrales de las reflectancias típicas de hojas de cultivos agrícolas esta mostrada en la figura 3.1 (Gausman *et al.*, 1973).

La saturación (cuando las reflectancias no cambian de valor al incrementarse el IAF) de las bandas espectrales de la mezcla suelo-vegetación es función de las reflectancias de las hojas. Así, la banda espectral con reflectancia foliar mayor (IRC)

es la que se satura mas lentamente y la de menor reflectancia (A y R) se saturan mas rápidamente. Esto es consecuencia de la teoría de la transferencia radiativa en la vegetación (Ross, 1981).

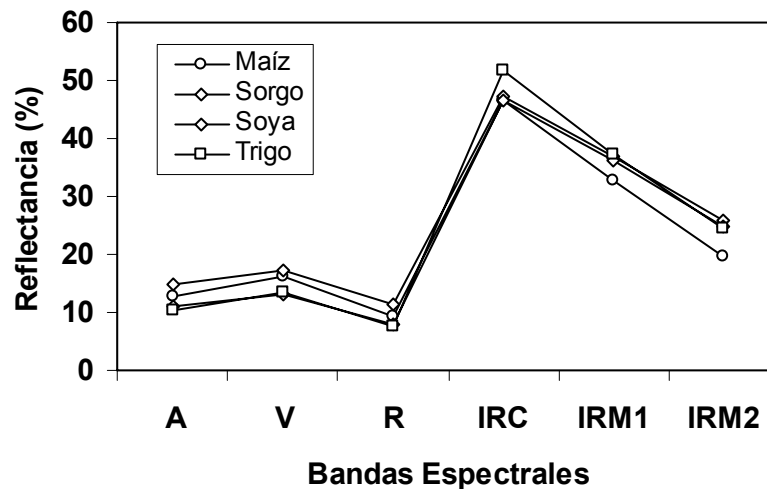


Figura 3.1 Firmas espectrales típicas de hojas de cultivos agrícolas (adaptada de Gausman *et al.*, 1973)

En el caso de los suelos desnudos, en las bandas del IRC y del R, las reflectancias forman una línea del suelo (Baret *et al.*, 1983) definida por:

$$IRC = a_s + b_s R \quad (7)$$

donde  $a_s$  y  $b_s$  son constantes empíricas.

La figura 3.2 muestra la línea del suelo para las bandas espectrales del R-IRC e IRM1-IRC para el caso de un suelo franco arcillo limos con diferentes condiciones de humedad y de contenido de materia orgánica (Beck *et al.*, 1975). En el espacio del R-IRC, la línea del suelo se comporta muy estable, con poca variación; pero para el espacio del IRM1-IRC la variación alrededor de la línea es mayor, aunque conserva el patrón lineal.

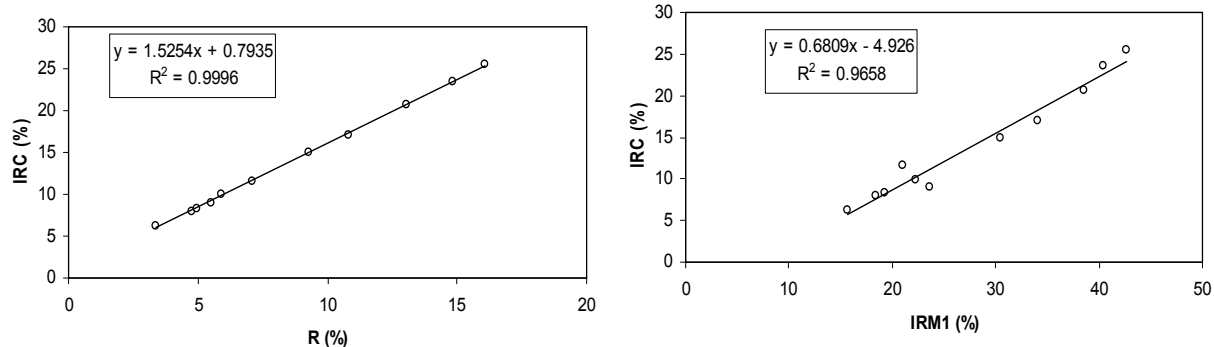


Figura 3.2 Relaciones entre bandas espectrales para un suelo desnudo franco arcillo limoso (adaptado de Beck *et al.*, 1975).

En la figura 3.3 se muestra el espacio de la banda espectral del rojo e infrarrojo cercano asociado a la dinámica del crecimiento de la vegetación, representada por el índice de área foliar; la cual fue generada usando simulaciones radiativas discutidas en Paz *et al.* (2005), donde se utilizaron seis suelos diferentes (S2 al S12, del más oscuro al más claro).

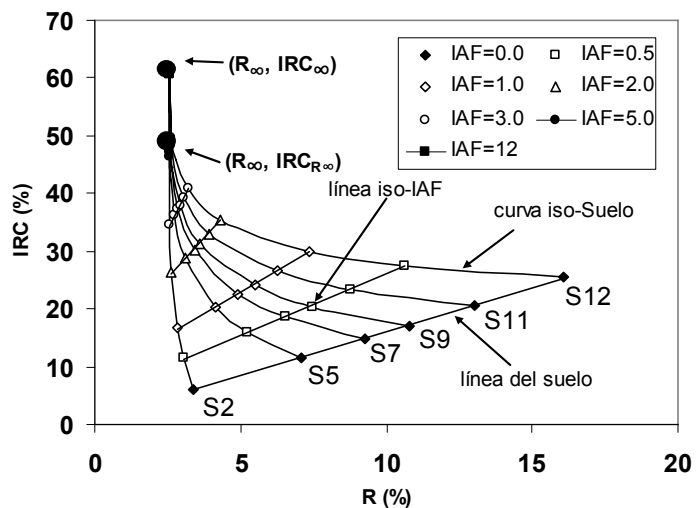


Figura 3.3 Dinámica del crecimiento de la vegetación en el espacio espectral R-IRC

En la figura 3.3 se usó un mismo cultivo variando su IAF y diferentes tipos de suelos como fondo. Las líneas iso-IAF representan la misma cantidad de vegetación, pero con suelos diferentes; donde el caso de  $IAF = 0$  representa la línea del suelo



desnudo. Si el suelo permanece constante (sus propiedades ópticas), entonces el crecimiento de la vegetación sigue una curva iso-suelo. El atrayente de la dinámica del crecimiento de la vegetación para la banda del R es el punto de convergencia de todas las curvas iso-suelo. En este punto, la banda del R se satura y representa a un medio ópticamente denso o infinito (Ross, 1981), por lo que se le denomina como  $R^\infty$ . El valor del IRC asociado al R de saturación es  $IRC_{R^\infty}$ . La banda del IRC sigue creciendo hasta alcanzar su propio punto de saturación definido por  $IRC^\infty$ .

Para poder usar las reflectancias en forma útil para las aplicaciones hidrológicas, es necesario conocer el contenido de humedad relativo de los suelos debajo de la vegetación. Para lograr este objetivo, es necesario hacer lineales las curvas iso-suelo usando el espacio transformado dIRC-IRC (Paz *et al.*, 2006) y el IVPP-R (Paz, 2006), donde  $dIRC = IRC - (a_S + b_S R)$ ,  $IVPP = dIRC/IRC$  (Paz *et al.*, 2003).

En la figura 3.4, se muestran los espacios transformados IVPP-R y dIRC-IRC para algunos datos mostrados en la figura 3.3.

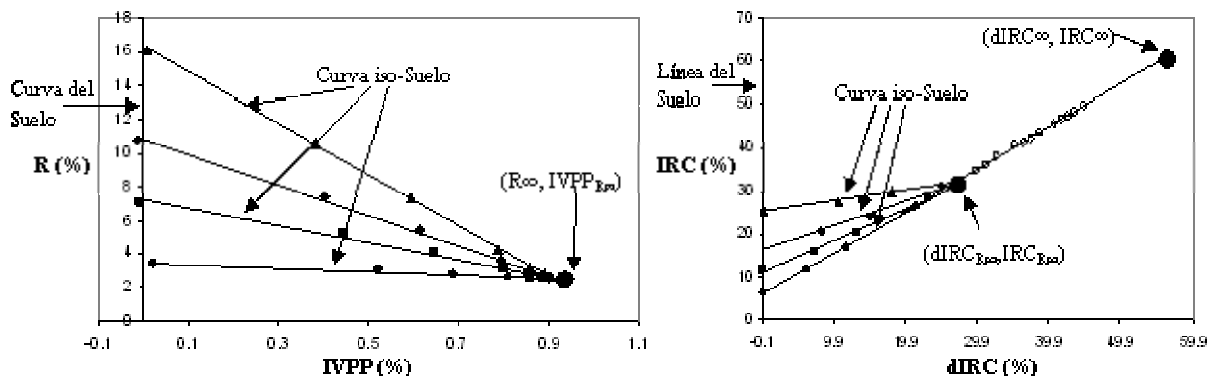


Figura 3.4 Espacios transformados IVPP-R y dIRC-R de los datos de la figura 3.3

En el espacio transformado IVPP-R, las curvas iso-suelo, transformadas a líneas rectas, convergen el punto  $\{R^\infty, IVPP_{R^\infty} = [IRC_{R^\infty} - (a_S + b_S R^\infty)]/IRC_{R^\infty}\}$ . Por otro lado, en el espacio dIRC-IRC, las curvas iso-suelo, transformadas a líneas rectas, convergen en el punto  $(dIRC_{R^\infty}, IRC_{R^\infty})$ , que representa los puntos debajo de  $(R^\infty,$

IRC<sub>R∞</sub>) en la figura 3.3. Para valores de IRC y dIRC mas grandes, los puntos caen sobre una línea recta de pendiente unitaria hasta llegar al punto de saturación de la banda del IRC (Paz *et al.*, 2006).

En la figura 3.5 se muestran los resultados de mediciones de las reflectancias de un experimento de maíz donde se usaron charolas deslizables de suelos debajo del cultivo (Bausch, 1993). En esta ilustración el efecto del color del suelo (textura, materia orgánica, óxidos de hierro, rugosidad; principalmente) en los cambios en la humedad del suelo muestra que para suelos claros el contraste es mayor que para el caso de suelos oscuros.

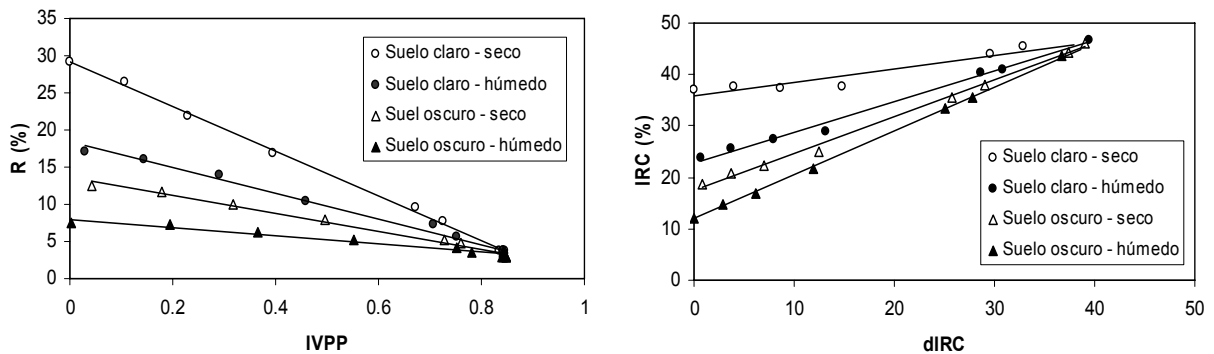


Figura 3.5 Espacios transformados IVPP-R y dIRC-R para un experimento de maíz (adaptado de Bausch, 1993)

De acuerdo a los patrones observados en la figura 3.5, la figura 3.6 muestra en forma esquemática un modelo general para la estimación de un índice de la humedad del suelo y de la cobertura y IAF de la vegetación, para cualquier banda espectral. Paz *et al.* (2007b) propusieron una humedad del suelo usando reflectancias ( $\theta_{sr}$ ), la cual puede suponerse como  $\theta_{sr} = 0$  para la reflectancia en el punto de marchitamiento permanente (PMP) y  $\theta_{sr} = 1$  a capacidad de campo (Figura 3.6).

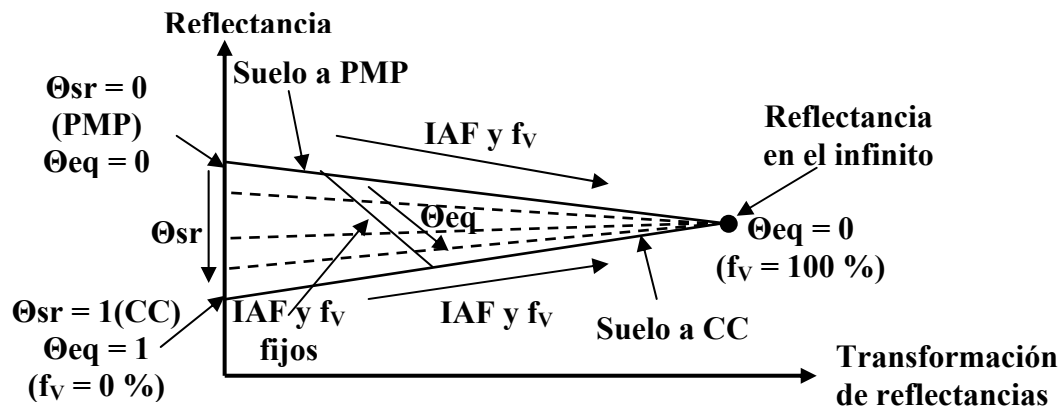


Figura 3.6 Modelo esquemático general para la estimación de un índice global equivalente de la humedad del suelo-vegetación.

En el caso de una mezcla suelo-vegetación, lo que mide un sensor remoto a la escala de un píxel individual en una imagen satelital es un medio radiativamente equivalente (Pinty *et al.*, 2004); es decir, para una cobertura menor del 100 % y un IAF global dado, existe un mismo IAF local asociado a la vegetación, pero con una cobertura total del suelo (que es equivalente a incrementar el número de plantas hasta cubrir al suelo, reduciendo el IAF por planta). Así, podemos establecer una humedad suelo-vegetación equivalente,  $\theta_{eq}$ , de tal forma que esta humedad pueda ser relacionada con  $\theta_{sr}$  del caso de solo suelo desnudo, simplificando todos los desarrollos. En el caso de la respuesta hidrológica de la mezcla suelo-vegetación, el concepto de medio equivalente puede ser usado de tal forma que la relación precipitación-escorrentía pueda ser definida bajo dos condiciones límite: suelo desnudo, donde después de su saturación lo que precipita es igual a lo que escurre y solo vegetación muy densa donde todo lo que precipita no escurre o lo hace muy poco (se intercepta y almacena en el follaje). En la figura 3.6, la reflectancia en el infinito o de medio ópticamente denso puede ser igualada a una condición de medio hidráulicamente denso (nada escurre, todo se absorbe), si elegimos una banda espectral que se sature para valores altos de la densidad del follaje de la vegetación. Esto permite una estrategia de modelación global, sin considerar los detalles de la composición de la mezcla suelo-vegetación y la distribución espacial de la humedad y vegetación dentro de un píxel. De acuerdo al esquema de la Figura 3.6, para una

banda espectral adecuada, cuando los valores de la reflectancia están sobre el eje vertical (reflectancia de interés), la situación corresponde a solo suelo desnudo y los desarrollos de Paz *et al.* (2007b) son aplicables. En el otro extremo, cuando las reflectancias están saturadas (reflectancias en el infinito), el suelo esta totalmente cubierto por la vegetación, de tal forma que la respuesta hidrológica corresponde solo a la vegetación (absorción por el follaje).

Con fines de visualización, la figura 3.7 muestra el caso de un cultivo sembrado en surcos, donde al principio de la etapa de crecimiento se observa un patrón de plantas individuales, donde las plantas no se tocan entre si. Al avanzar el crecimiento, las plantas en un mismo surco se tocan entre si y forman un cultivo en hileras o surcos. Cuando las plantas de diferentes surcos se tocan, tenemos la situación de cobertura total del suelo. Así la dinámica del crecimiento de un cultivo va desde un suelo desnudo, siguiendo una mezcla suelo vegetación con plantas individuales hasta que las plantas dentro de un mismo surco se tocan entre si, llegando hasta la cobertura total del suelo cuando las plantas de diferentes surcos se tocan.

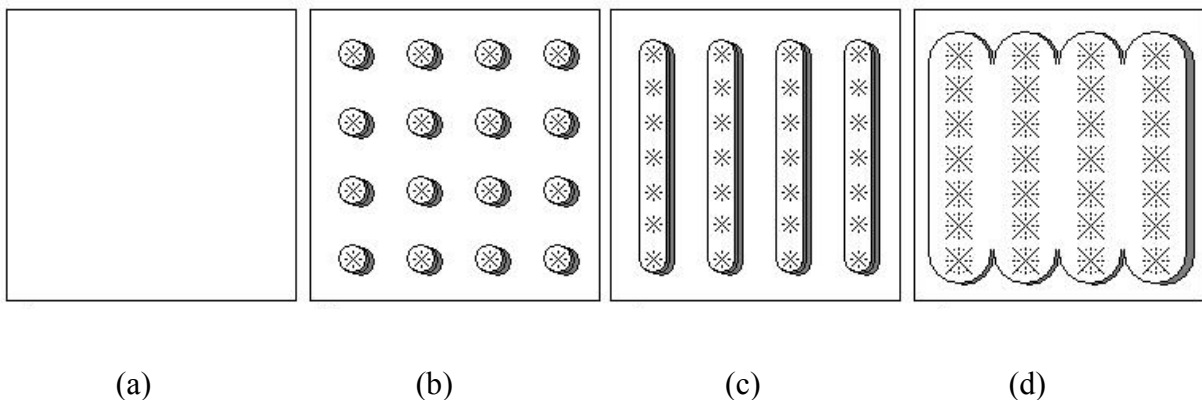


Figura 3.7. Geometría de un cultivo sembrado en surcos. (a) suelo desnudo; (b) plantas individuales sin traslape; (c) plantas traslapadas en surcos; y, (d) vegetación densa traslapada.

Usando el concepto de medio equivalente, para un píxel como el mostrado en la Ilustración 7, podemos establecer:

$$\theta_{eq} = (1 - f_v)\theta_{sr} + f_v\theta_{vr} \quad (8)$$

donde  $f_v + f_s = 1$ , con  $f_s$  es la fracción de suelo, y  $\theta_{vr}$  es una “humedad” de la vegetación usando reflectancias.

La relación (8) muestra que  $\theta_{eq}$  (medio heterogéneo) es función de la cobertura de la vegetación y las propiedades hidráulicas del suelo y la vegetación. En el caso de  $f_v$ , la vegetación en esta fracción tiene huecos (ley de Beer-Lambert) por lo que  $\theta_{vr}$  (medio homogéneo) varía con el crecimiento de la vegetación (IAF local), hasta llegar a la situación de un medio hidráulicamente denso ( $f_v = 1$ ) donde  $\theta_{vr} = 0$ , por lo que  $\theta_{eq} = 0$  (situación que aunque la precipitación es grande, el follaje absorbe esta durante el día, pudiendo presentarse el escurrimiento al día siguiente).

En el caso del suelo desnudo, la banda del IRM1 fue la más lenta en su saturación (Paz *et al.*, 2007b), por lo que es importante analizar su comportamiento en el caso de la mezcla suelo-vegetación. En la figura 3.2 la línea del suelo entre la banda del IRC-IRM1 mostró mayor variabilidad que para el R-IRC. Los efectos de esta divergencia de la linealidad se observan en la figura 3.8, mismos datos que los usados en la 3.3, para el caso del espacio R-IRM1 e IRM1-IRC, donde las curvas iso-IAF, ver figura 3.3, tienen la misma estructura matemática que las curvas del suelo. Esto es consecuencia de la linealidad de la ecuación de transferencia radiativa (Ross, 1981; Myneni *et al.*, 1989), donde si la curva del suelo es un polinomio de  $n$  grado, entonces las líneas del suelo serán polinomios del mismo grado (un polinomio de  $n$  grado al sufrir una transformación lineal conserva sus propiedades).

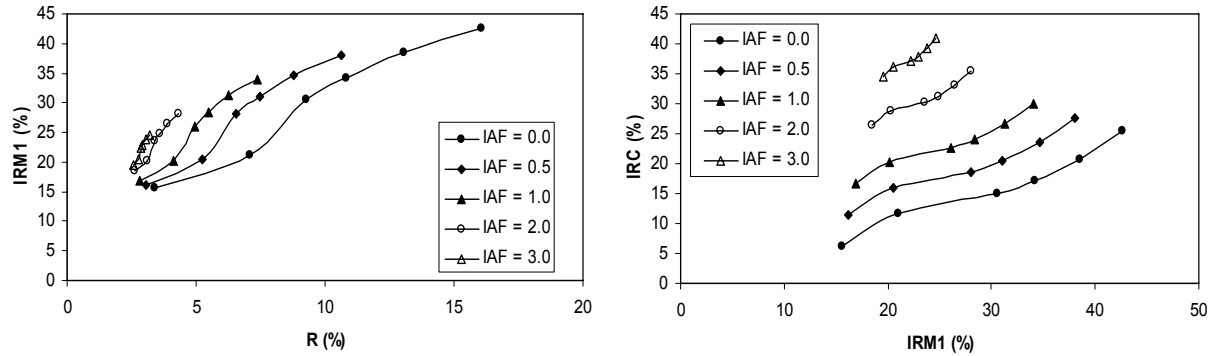


Figura 3.8 Patrones espectrales de la dinámica del crecimiento de la vegetación asociados a los espacios del R-IRM1 e IRM1-IRC.

Los desarrollos mostrados en la figura 3.4 son aplicables a cualquier combinación de bandas del infrarrojo y del infrarrojo con las bandas del visible (en el caso de solo bandas del visibles, las líneas iso-suelo son lineales; Paz *et al.*, 2005a). Así, si definimos a  $dB4B5$  ( $= IRC - a_{45} - b_{45}IRM1$ ; donde  $a_{45}$  y  $b_{45}$  son las constantes de la línea del suelo entre las bandas 4 o IRC y 5 o IRM1 del sensor ETM+), entonces podemos analizar espacios transformados similares a los mostrados en la figura 3.3. La figura 3.9 muestra este tipo de espacios para el caso de las bandas del IRM1 e IRC, para el caso de la estimación de las constantes de la línea del suelo correspondiente.

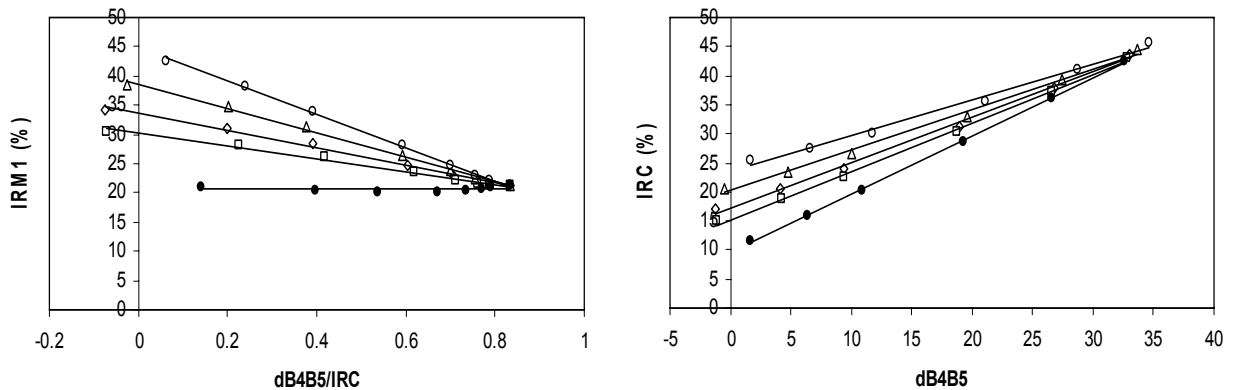


Figura 3.9 Espacios transformados para las bandas del IRM1 (B5) e IRC (B4), para el caso de una línea del suelo con constantes  $a_{45} = -3.566$  y  $b_{45} = 0.642$

Se observa de la figura 3.9, que la dispersión en la línea del suelo se refleja en los puntos de suelo desnudo que varían en relación al eje vertical teórico, ver figura 3.4.

Los espacios transformados de las figuras 3.4 y 3.8, 3.9, generalizados a cualquier espacio, mantienen sus propiedades para cualquier línea del suelo virtual, ver figura 3.10, por lo que no es necesario conocer los valores de estas líneas para estimar las reflectancias en el infinito. Desde el punto de vista de corregir efectos atmosféricos, el estimar los parámetros de las líneas del suelo permite eliminar estas distorsiones (Paz *et al.*, 2005b), por lo que es necesario utilizar un algoritmo de reconocimiento de patrones para definir la clase de suelo desnudo (Palacios *et al.*, 2007)

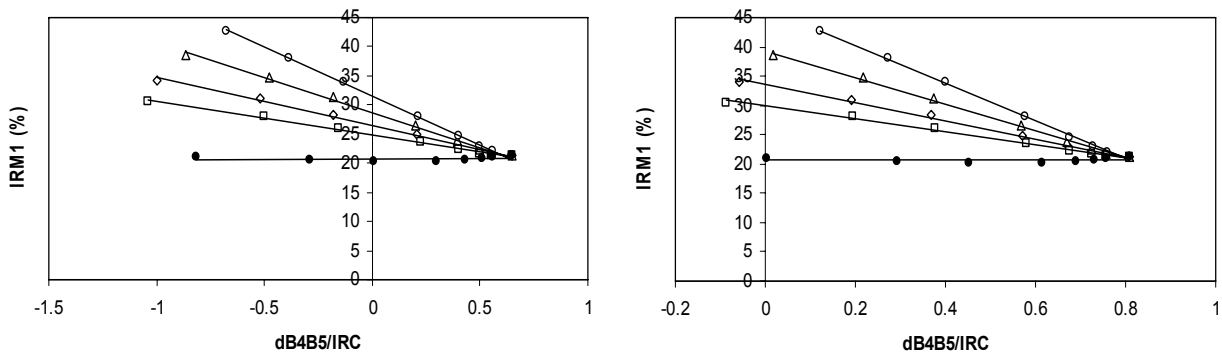


Figura 3.10 Espacios transformados para las bandas del IRM1 (B5) e IRC (B4), para el caso de una línea del suelo con constantes: (a)  $a_{45} = 0$  y  $b_{45} = 1$ ; y, (b)  $a_{45} = 0.1$  y  $b_{45} = 0.5$ .

### 3.4 Bases teóricas para el uso de sensores remotos en la relación Precipitación-Escurrimiento.

Para establecer las bases teóricas para el uso de los sensores remotos para modelar la relación precipitación-escurrimiento, podemos despejar ET de la ecuación (1) del balance de energía y ET de la ecuación (4) del balance de agua. Igualando ambas ecuaciones y dividiéndolas entre P obtenemos:

$$\frac{(Rn - G)}{P} = \left\{ 1 + \frac{H}{P} \right\} - \left\{ \frac{Q - (I + \Delta\theta)}{P} \right\} \quad (9)$$

Sin pérdida de generalidad, para el caso de datos diarios, podemos despreciar G y  $\Delta\theta$  (o incorporarlos implícitamente en Rn e I, respectivamente), por lo que la ecuación (9) puede ser simplificada a:

$$\frac{Rn}{P} = \left\{ 1 + \frac{H}{P} \right\} - \left\{ \frac{Q - I}{P} \right\} \quad (10)$$

### 3.4.1 Límites del balance de energía y agua

Usando un medio homogéneo (“big leaf” en balances de energía o medio turbio en transferencia radiativa), representado por una vegetación cubriendo uniformemente al suelo (hay huecos de suelo desnudo en la vegetación, los cuales varían en función del IAF), podemos usar la ecuación de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) para estimar ET:

$$\lambda ET = \frac{\Delta Rn + (\rho c_p DPV) / r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_v / r_a)} \quad (11)$$

donde  $\Delta$  es la pendiente de la curva de presión de vapor a saturación ( $\text{kPaK}^{-1}$ ),  $\rho$  es la densidad del aire ( $\text{kgm}^{-3}$ ),  $c_p$  es el calor específico del aire húmedo ( $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ), DPV es el déficit de presión de vapor (mb),  $\gamma$  la constante psicométrica ( $\text{mbK}^{-1}$ ),  $r_v$  es la resistencia del follaje de la vegetación ( $\text{sm}^{-1}$ ),  $r_a$  es la resistencia aerodinámica ( $\text{sm}^{-1}$ ),  $\lambda ET$  es el calor latente ( $\text{Wm}^{-2}$ ) y Rn y G están en  $\text{Wm}^{-2}$ .

La ecuación de Penman-Monteith para  $\lambda ET$  es función de dos componentes: una radiativa (Rn) y otra aerodinámica (DPV). Esto resulta más claro si utilizamos la formulación de Jarvis-McNaughton (1986) (despreciando G):



$$ET = \Omega ET_1 + (1 - \Omega) ET_2$$

$$\Omega = \frac{\Delta + \gamma}{\Delta + \gamma(1 + r_v / r_a)}$$
(12)

que puede ser comprendida analizando sus límites:

$$r_a \rightarrow \infty, \Omega \rightarrow 1 \Rightarrow \lambda ET = \lambda ET_1 = \left( \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) Rn$$

$$r_a \rightarrow 0, \Omega \rightarrow 0 \Rightarrow \lambda ET = \lambda ET_2 = \left( \frac{\rho c_p}{r_v \gamma} \right) DPV$$
(13)

El factor de desacoplamiento  $\Omega$ , donde un valor de 0 indica que la vegetación esta completamente acoplada a la atmósfera, por lo que  $\lambda ET$  es dependiente del DPV. En el caso de un valor de 1, la situación se revierte y  $\lambda ET$  es función de solo la Rn.

Una forma alternativa de la relación (12) es usar la relación entre H y la diferencia de temperaturas ( $Tas - Ta$ ), para plantearla como:

$$(Tas - Ta) = \left[ \frac{\gamma(r_a + r_v)}{\rho c_p (\Delta + \gamma)} \right] Rn \Omega - \left[ \frac{r_a}{r_v \gamma} \right] DPV (1 - \Omega)$$
(14)

La ecuación (14) puede ser puesta en función de  $Tr_s$  (la temperatura medida con sensores remotos) usando un parámetro correctivo, dependiente de IAF y  $f_v$ , aplicado a  $Tas$  (Chehbouni *et al.*, 1997).

Al igual que para la formulación (12), podemos analizar los límites de la relación (14):

$$r_a \rightarrow \infty, \Omega \rightarrow 1 \Rightarrow (Tas - Ta) \rightarrow \infty, H \rightarrow \infty$$

$$r_a \rightarrow 0, \Omega \rightarrow 0 \Rightarrow (Tas - Ta) \rightarrow 0, H \rightarrow 0$$
(15)

A partir de los desarrollos previos podemos analizar dos límites de situaciones equivalentes en la respuesta hidrológica de una mezcla suelo-vegetación:

- a. Una mezcla suelo-vegetación en un clima muy seco (tipo desierto o semidesierto) que define una condición de limitación del crecimiento por agua o una mezcla suelo-vegetación cualquiera en la condición de poca o nula precipitación o una mezcla suelo-vegetación en crecimiento donde la cobertura del suelo es pequeña (desacoplada atmosféricamente) . En esta situación las relaciones límites entre las componentes del balance de energía y agua estarán dados por:

$$\frac{(Q-I)}{P} \rightarrow 0, \frac{ET}{P} \rightarrow 1, \frac{H}{P} \rightarrow \infty \Rightarrow \frac{Rn}{P} \rightarrow \infty \quad (16)$$

- b. Una mezcla suelo-vegetación en un clima muy húmedo (tipo selva o bosque) que define una condición de limitación del crecimiento por energía o una mezcla suelo-vegetación cualquiera en la condición de alta precipitación o una mezcla suelo-vegetación en crecimiento donde la cobertura del suelo es grande (acoplada atmosféricamente). En esta situación las relaciones límites entre las componentes del balance de energía y agua estarán dados por:

$$\frac{(Q-I)}{P} \rightarrow 1, \frac{ET}{P} \rightarrow 0, \frac{H}{P} \rightarrow 0 \Rightarrow \frac{Rn}{P} \rightarrow 0 \quad (17)$$

De acuerdo a la relación (10) y de los límites discutidos, existe una gran variedad de formas funcionales que cumplen las condiciones impuestas. Por ejemplo podemos utilizar la función exponencial, con pendiente k:

$$\frac{(Q-I)}{P} = \exp\left(-k \frac{Rn}{P}\right) \quad (18)$$

La figura 3.11 muestra un ejemplo de la relación (18) para diferentes valores de  $k$ . El valor de  $k$  puede ser puesto en función de un índice como el NC. La  $R_n$  puede ser estimada de información espectral (Chemin, 2004; Allen *et al.*, 2005).

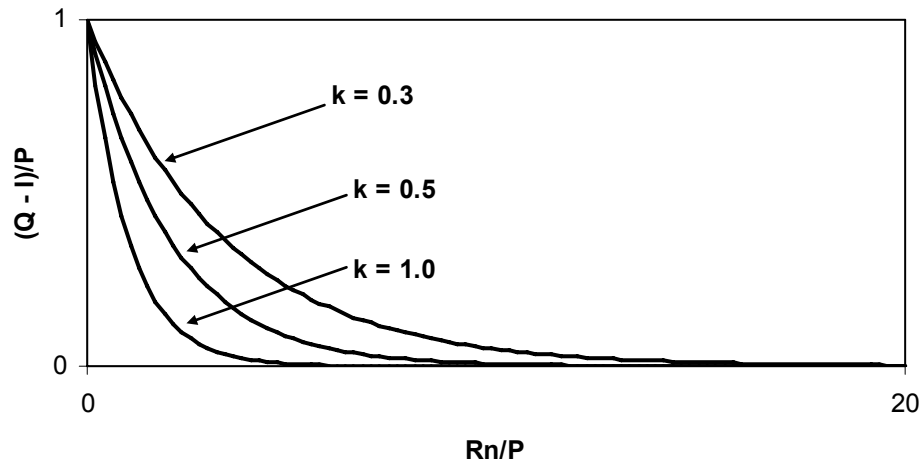


Figura 3.11 Ejemplo de relación exponencial entre  $R_n/P$  y  $(Q-I)/P$

### 3.5 Conclusiones

En este trabajo se analizó el caso de la mezcla suelo-vegetación, tanto en su respuesta espectral como hidrológica, presentándose un esquema general para la modelación de la humedad del sistema.

En el caso de las reflectancias obtenidas por sensores remotos, el uso de espacios del infrarrojo o del infrarrojo y el visible nos permite obtener, después de algunas transformaciones, los atrayentes de la dinámica del crecimiento de la vegetación que representan a un medio ópticamente denso. Así, seleccionando una banda espectral con baja saturación (infrarrojo cercano), podemos igualar el medio óptico con uno hidráulico, de tal forma que el uso de las reflectancias sea equivalente a evaluar las propiedades hidráulicas del sistema suelo-vegetación.

Usando balances de energía y agua se establecieron las bases teóricas para el uso de los sensores remotos en la relación precipitación-escorrentía para el caso general de mezclas de suelo y vegetación.

Los elementos presentados para el desarrollo de una hidrología operacional con sensores remotos fundamentan este objetivo. Los pasos siguientes consisten en el desarrollo y validación de un esquema integrado para la modelación de la precipitación-escorrentía usando solo sensores remotos.

### **3.6 Referencias**

Allen, R.G., L. S. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO. Rome. pp. 300

Allen, R.G., M. Tasumi and R. Trezza. 2005. METRIC: mapping evapotranspiration at high resolution – Applications manual for LANDSAT satellite imagey. University of Idaho. pp. 130

Baret, F. and G. Guyot. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. Remote Sensing of Environment. 35. pp: 161-173.

Bastiaanssen W. G. M., M. Menenti, R. A. Feddes and A. A. Holtslag. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). I: Formulation, Journal of Hydrology. 212-213. pp: 198–212

Baret, F., S. Jacquemoud and J. F. Hanocq. 1983. The soil line concept in remote sensing. Remote Sensing Reviews. 7. pp: 65-82.

Bausch, W. C. 1993. Soil background effects on reflectance-based crop coefficients for corn. Remote Sensing of Environment. 46. pp: 213-222.

Bausch, W. C. and C. M. U. Neale. 1987. Crop coefficients derived from reflected Canopy radiation: a concept. Transaction of the ASAE. 30. pp: 703-709

Beck, R. H., B. F. Robinson, W. W. McFee and J. B. Peterson. 1975. Spectral characteristics of soil moisture, organic carbon and clay content. LARS Technical Note 081176. University of Purdue, Indiana. pp. 91

Chehbouni A., D. Lo, E. Njoku, J. P. Lhomme, B. Monteny and y.H. Kerr. 1997. Estimation of sensible heat flux over sparsely vegetated surfaces, *Journal of Hydrology* 188-189. pp: 855-868

Chemin, Y. 2004. The application of the surface energy balance algorithm for land (SEBAL) for estimating daily evaporation. A Handbook of published methodologies. Version 0..6.7. Space technology Applications and Research. Asian Institute of Technology. pp. 151

Choudhury B. J. and J. L. Monteith. 1988. A four-layer model for the heat budget of homogeneous land surfaces, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 114. pp: 373-398

Crago R. D. 2000. Conservation and variability of the evaporative fraction during the daytime. *Journal of Hydrology*. 180. pp: 173-194

Gausman, H. W., W. A. Allen, C. L. Wiegand, D. E. Escobar, R. R Rodriguez and A. J. Richardson. 1973. The leaf mesophylls of twenty crops, their light spectra, and optical and geometrical parameters. USDA Technical Bulletin 1465. pp 59.

Heilman, J. L., W. E. Heilman and D.G. Moore. 1982. Evaluating the crop coefficient using spectral reflectance. *Agronomy Journal*. 74. pp: 265-279.

Huete, A. R., R. D. Jackson, and D. F. Post. 1985. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote Sensing of Environment*. 17. pp: 35-53.

Jarvis, P. G. AND K. G. McNaughton. 1986. Stomatal control of transpiration: scaling up from leaf to region. *Advances in Ecological Research*. 15. pp: 1-47

Kustas W. P. and J. M. Norman. 1997. A two-source approach for estimating turbulent fluxes using multiple angle thermal infrared observations. *Water Resources Research*. 33. pp: 1495-1508

Makkink, G. F. 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters. *Journal of the Institute of Water Engineering*. 11. pp: 277-288

Menenti M. and Choudhury B. J. 1993. Parametrization of land surface evapotranspiration using a location dependent potential evapotranspiration and surface temperature range, *In*: H. J. Bolle *et al*, (Eds.), Exchange Processes a the Land Surface for a Range of Space and time Scales, IAHS Publication 212, pp. 561-568

Myneni, R. B., J. Ross and G. Asrar. 1989. A review of photon transport in leaf canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*. 45. pp: 1-153.

Olioso A., H. Chauki, D. Courault and J. P. Wigneron. 1999. Estimation of evapotranspiration and photosynthesis by assimilation of remote sensing data into SVAT models. *Remote Sensing of Environment*. 68. pp: 341-356

Palacios, L. A., f. Paz, J. L. Oropeza, B. Figueroa, M. Martínez, C. A.. Ortiz y E. García. 2007. Clasificador genérico de objetos en imágenes ETM+. *Agrociencia*. 40. pp:613-626

Paz, P. F. 2006. Modelos simples de reflectancia. Reporte Julio para AGROASEMEX. pp. 65.

Paz, P. F. 2007. Mitos y falacias del método hidrológico del número de curva del SCS / NRCS. Enviado a Agrociencia.

Paz, P. F., L. A. Palacios, E. Palacios, M. Martínez, y E. Mejía. 2003. Un índice de vegetación sin efecto atmosférico: IVPP, *In*: de Alba A., L. Reyes y M. Tiscareño (editores). Memoria del Simposio Binacional de Modelaje y Sensores Remotos en Agricultura México-USA. INIFAP-SAGARPA, Aguascalientes, México. pp: 46-51.

Paz, P. F., E. Palacios, E. Mejía, M. Martínez Y L. A. Palacios. 2005a. Análisis de los espacios espectrales de la reflectividad del follaje de los cultivos. *Agrociencia*. 39. pp: 293-301.

Paz, P. F., E. Palacios, L. A. Palacios, L. Tijerina. y E. Mejía. 2005b. Correcciones atmosféricas usando patrones invariantes en el espacio del rojo e infrarrojo cercano. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*. 1. pp: 51-64.

Paz, P. F., E. Palacios, E. Mejía, M. Martínez, y L. A. Palacios. 2006. Determinación del estado de crecimiento de cultivos usando la transformada de Hough de las reflectividades del follaje. *Agrociencia*. 40. pp: 99-108.

Paz, P. F., E. Palacios, M. Bolaños, L. A. Palacios, M. Martínez, E. Mejía, y A. Huete. 2007a. Diseño de un índice espectral de la vegetación: NDVIcp. *Agrociencia*. 41. pp:539-554.

Paz, P. F., M. I. Marín, E. lopez, A. Zarco, M. A. bolaños, J.L. OROPEZA, M. Martinez, E. Palacios y E. rubiños. 2007. Elementos para el desarrollo de una hidrología operacional con sensores remotos: suelo desnudo. Enviado a *Ingeniería Hidráulica en México*.

Pinty, B., N. Gobron, J. L. Widlowski, T. Lavergne and M. M. Verstraete. 2004. Synergy between 1-D and 3-D radiation transfer models to retrieve vegetation canopy properties from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research*. 109. pp: D21205, doi:10.1029/2004JD005214.

Priestley, C. H. and R. J. Taylor. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*. 100. pp:81-92

Ritchie, J. T. 1972. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research*. 8. pp: 1204-1213

Roerink G. J., B. Su, and M. Menenti. 2000. S-SEBI a simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. *Phys. Chem. Earth (B)*. 25. pp: 147-157

Ross, J. 1981. *The radiation regime and architecture of plant stands*. W. Junk. Norwell, MA. pp 391

Shuttleworth W. J. and J. S. Wallace. 1985. Evaporation from sparse crops – an energy combination theory, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 111. pp. 839-855

Su, Z. 2002. The surface energy balance system (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences*. 6. pp. 85-99

SCS. 1972. Section 4: Hidrology. *National Engineering Handbook*. Soil Conservation Service. USDA.

Tucker, C. J. 1979. Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*. 8. pp: 127-150.

## **CAPITULO 4. MODELACIÓN TEMPORAL DE LOS CAMBIOS EN LA HUMEDAD DEL SUELO USANDO SENSORES REMOTOS**

La estimación de la humedad del suelo en una parcela o cuenca hidrológica es una tarea muy compleja, especialmente en términos espacialmente exhaustivos y con alta resolución temporal. La respuesta hidrológica de un medio es dependiendo del estado hídrico de los suelos y de su capacidad de infiltración. Así, la relación precipitación – escurrimiento es fuertemente dependiente de las condiciones hidráulicas de los suelos, particularmente bajo condiciones de suelo desnudo sin vegetación.

La modelación de la relación precipitación – escurrimiento ha sido intentada con diferentes niveles de aproximación, donde sobresale el método del numero de curva o NC (SCS, 1972) por su simplicidad. Este método es la base de modelos hidrológicos semi-empíricos con mayor complejidad (Sharpley y Williams, 1990; Neitsh *et al*, 2002); aunque su validez ha sido cuestionada por Paz (2007).

El método del NC requiere del conocimiento de la humedad antecedente de los suelos antes de un evento de precipitación, la cual es parametrizada en función de grupos hidrológicos del suelo (NRCS, 2004) caracterizados por su tasa de infiltración y restricciones físicas/químicas de esta.

En este trabajo se analiza y discute un modelo de estimación de la humedad de los suelos usando sensores remotos propuesto por Paz *et al*. (2007), en su componente temporal, y se revisa usando datos de lotes de escurrimiento de suelos desnudos en un simulador de lluvia.

En lo siguiente la discusión de sensores remotos (reflectancias) estará en función de las bandas del sensor TM5 del satélite LANDSAT, como referencia: banda azul o A centrada en 486 nm; banda verde o V centrada en 572 nm; banda R centrada en 661



nm; banda IRC centrada en 839 nm; banda infrarrojo medio 1 o IRM1 centrada en 1679 nm; banda infrarrojo medio 2 o IRM2 centrada en 2207 nm.

#### **4.1 Modelo temporal de la humedad de los suelos con reflectancias**

La reflectancia de los suelos depende de varios factores, entre los que destacan (Baumgardner *et al.*, 1985): la textura y mineralogía; la humedad del suelo; el contenido de materia orgánica (M.O.); el contenido de óxidos de hierro; el contenido de sales solubles y la rugosidad superficial del suelo. Así, para analizar la relación de la reflectancia con la humedad del suelo es necesario dejar fijo el resto de los factores que inciden en ésta.

##### **4.1.1 Relación entre la reflectancia y el contenido de humedad en suelos**

La relación funcional entre la reflectancia de los suelos y el contenido de humedad ha sido estudiada previamente y modelada en forma exponencial (Muller y Décamps, 2000; Weidong *et al.*, 2002; Lobell y Asner, 2002). Estos autores notaron que, generalmente, las reflectancias se saturan (no cambian de valor) para contenidos volumétricos que van de 0.3 a 0.4 en las bandas del infrarrojo y alrededor de 0.2 en las bandas del visible (A, V y R). Si definimos un límite de humedad superior como el de la capacidad d campo o CC (si definimos a la saturación como límite de humedad, éste es indistinguible del de CC) y uno inferior como el del punto de marchitamiento permanente o PMP (que también puede ser el de suelo seco en horno o valor similar).

Paz *et al.* (2007) propusieron una forma alterna y simple al modelo exponencial para definir una relación entre la humedad del suelo ( $\theta$ ) y las reflectancias (R, donde puede ser cualquier banda espectral), definiendo los límites  $\theta = 0$  cuando  $R = kR_{PMP}$  (suelo seco, donde k es una constante empírica) y  $\theta = 1$  cuando  $R = R_{CC}$ , generando una variable indirecta de la humedad del suelo usando reflectancias ( $\theta_{sr}$ ) como:

$$\theta_{sr} = 1 - \left[ \frac{R - R_{CC}}{kR_{PMP} - R_{CC}} \right] \quad (1)$$

La ecuación (1) puede ser simplificada si definimos una relación entre  $R_{PMP}$  y  $R_{CC}$ , dejando fija a  $k$  (Paz *et al.*, 2007). La aproximación de la ecuación (1) es mejor cuando la reflectancia tiende a la de un suelo a PMP, dado que  $\exp(X)=X$  cuando  $X$  es muy pequeño.

La Figura 4.1 muestra el ajuste del modelo (1) a datos de un experimento en el Colegio de Postgraduados (COLPOS) en el Campus Montecillo, estado de México, México. En este experimento se dio seguimiento temporal a la reflectancia y humedad del suelo para un suelo con y sin labranza.

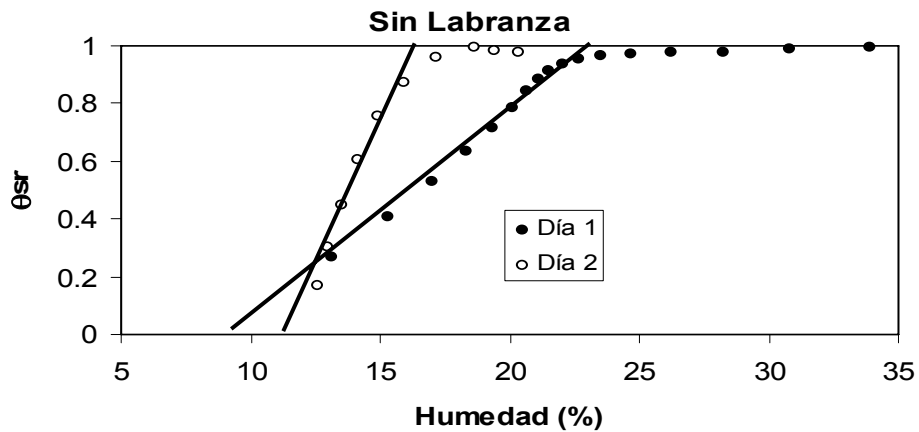


Figura 4.1. Relación entre  $\theta_{sr}$  y la humedad de un suelo sin labranza (Paz *et al.*, 2007)

El modelo mostrado en la Figura 4.1 presenta una situación de cambio en las propiedades del suelo, donde la relación entre  $\theta_{sr}$  y la humedad del suelo se modifica en función del contenido inicial de esta última.

#### 4.1.2 Modelación temporal de la humedad y reflectancia de los suelos

Desde la perspectiva de la modelación de la relación precipitación.- escurrimiento, la caracterización temporal de la humedad de los suelos usando sensores remotos es una tarea crítica.

La evaporación de la humedad del suelo manifiesta al menos dos estados diferentes (Gardner y Hillel, 1962): en el primero, la evaporación está limitada por la atmósfera (energía disponible) y en el segundo la evaporación está limitada por las propiedades hidráulicas de los suelos. Estos dos estados han sido caracterizados en condiciones de campo (Idso *et al.*, 1974; Brutsaert y Chen, 1995), con transiciones entre ellos. El primer estado está definido por la evaporación potencial, promedio temporal, del suelo y puede estimarse usando información disponible en estaciones meteorológicas modernas (Makkink, 1957; Priestley y Taylor, 1972).

Una alternativa de medición de la evaporación del suelo ha sido el uso del albedo (reflectancia) (Idso *et al.*, 1974 y 1975; Jackson *et al.*, 1976; Salvucci, 1997; Amano y Salvucci, 1999). La evidencia experimental muestra que la variación temporal del albedo se puede aproximar en forma lineal (Idso *et al.*, 1974; Salvucci, 1997; Amano y Salvucci, 1999); aunque otras relaciones funcionales se ajustan bien ( $\ln$  y  $t^{1/2}$ ).

En la Figura 4.2 se muestra el modelo propuesto por Paz *et al.* (2007) para la evolución temporal de la reflectancia asociada a los cambios de humedad de los suelos. En esta  $t_r$  es el tiempo de recuperación (secado) y describe una fase lineal de la reflectancia. Considerando intervalos temporales de un día o menores, en la Figura 4.2 se ha supuesto un cambio brusco (dentro de un día) de la reflectancia de la condición de suelo seco a húmedo (evento de precipitación o riego).

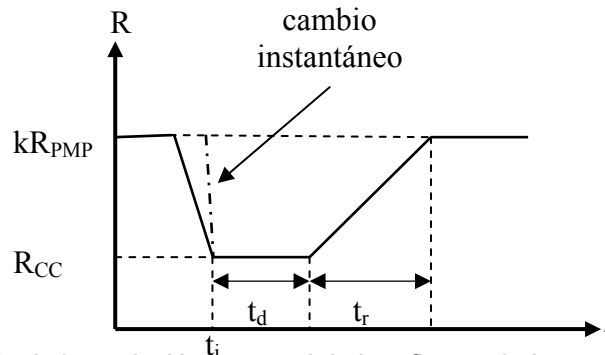


Figura 4.2 Modelo de la evolución temporal de la reflectancia-humedad del suelo.

Si en la Figura 4.2 se supone un patrón de cambio de la reflectancia proporcional a  $t$  (la reflectancia representa una propiedad acumulativa), entonces la única incógnita es  $t_d$  o, suponiendo un valor para  $k$ , con dos puntos en la etapa de secado se puede caracterizar el modelo propuesto.

En la etapa de secado la relación temporal para las reflectancias, puede ser representada por el modelo lineal (Figura 4.2):

$$\begin{aligned}
 R &= p - qt \\
 p &= R_{CC} - q(t_i + t_d)
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

En la Figura 4.3 se presenta los resultados experimentales del experimento del COLPOS para un suelo con y sin labranza (Paz *et al.*, 2007), donde se observa que el modelo es seguido en forma adecuada por los datos experimentales. En el segundo día, el suelo sufrió cambios de humedad ligados a neblina.

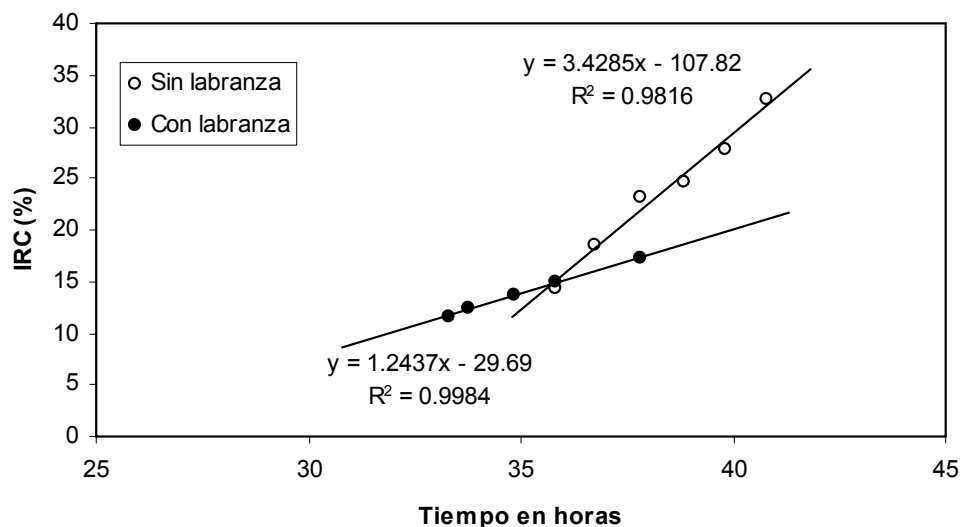


Figura 4.3. Modelación del segundo estado de la evaporación del suelo (Paz *et al.*, 2007)

De la relación (4.2), para modelar la respuesta temporal de la humedad del suelo usando reflectancias, ecuación (1), es necesario conocer  $t_d$  y  $q$ . Los valores de  $k$  ( $k = 1$ ),  $R_{PMP}$  y  $R_{CC}$  pueden obtenerse de las reflectancias mas altas y bajas, respectivamente, de un píxel en una imagen satelital. En la sección siguiente se discute como estos parámetros dependen del tipo hidrológico de suelos.

#### 4.2 Experimento de humedad del suelo en un simulador de lluvia.

Con el objetivo de analizar y modelar la variación temporal de las reflectancias de los suelos desnudos después de un evento de precipitación, se diseño un experimento de lotes de escurrimiento en un simulador de lluvia tipo rotatorio (Morin *et al.*, 1967). La Figura 4.4 muestra el arreglo del experimento.

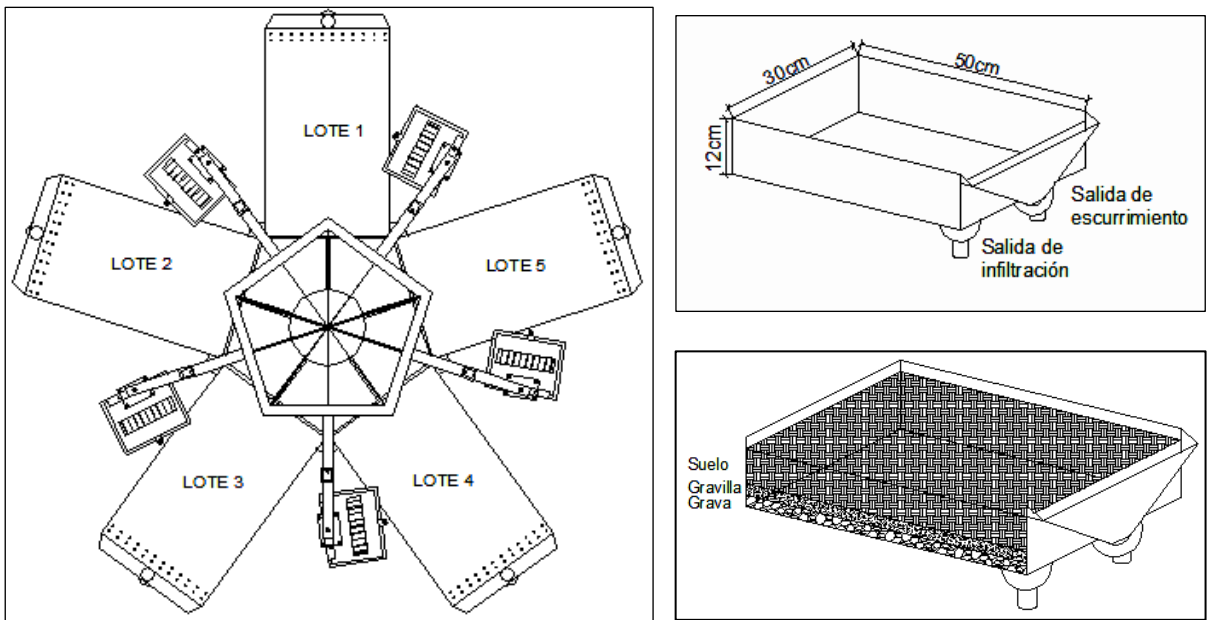
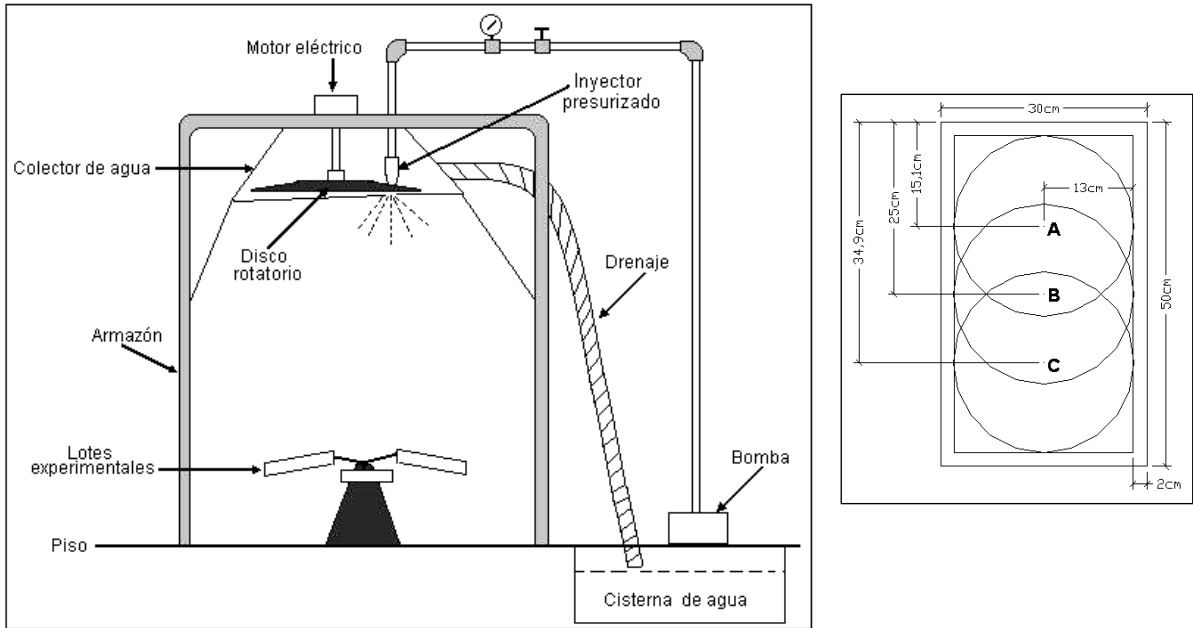


Figura 4.4 Arreglo experimental para el análisis de la respuesta temporal de suelos desnudos bajo iluminación artificial en un simulador de lluvia tipo rotatorio.

El procedimiento experimental consistió en la selección de cinco suelos con propiedades hidráulicas contrastantes, los cuales fueron colocados en lotes de escurrimiento de dimensiones 50 x 30 x 12 cm (Figura 4.4), colocando en el fondo una capa de grava y gravilla antes del suelo (Figura 4.4), separadas las capas por

una tela permeable, la cual fue compactada para mantener una superficie homogénea en todos los lotes de escurrimiento.

Los cinco lotes de escurrimiento fueron montados en una base giratoria dentro de un simulador de lluvias rotatorio (Figura 4.4), para ser sujetos a un evento de lluvia de 100 mm durante una hora. El estado inicial (suelo seco) corresponde a suelos secados al aire y el final, después del evento de lluvia, a un suelo saturado. Antes de la aplicación del evento de lluvia los suelos fueron llevados a la condición de humedad de capacidad de campo (infiltración por gravedad).

Después de aplicado el evento de precipitación o lluvia, los suelos fueron iluminados (única fuente de energía, además de la residual que ocurrió en el cuarto cerrado y rodeado de cortinas para mantener condiciones de oscuridad) con cinco lámparas de halógeno de cuarzo de 500 watts, dispuestas en el arreglo mostrado en la Figura 4.4. Durante el seguimiento de los cambios en la humedad de los suelos por un radiómetro hiperespectral, FieldSpec@Pro modelo FR (Analytical Spectral Devices, Inc) con rango de medición de 350 a 2500 nm y resolución de proceso de 1 nm, las lámparas se mantuvieron encendidas solo durante las horas de toma de datos y fueron apagadas posteriormente y el cuarto del simulador sin luces y cerrado. Los horarios de medición (energía aplicada al secado del suelo) fueron: día 1 de 13:00 a 21:00; día 2 de 10:00 a 22:00; día 3 de 11:00 a 17:00; y día 5 de 10:00 a 17:00. Las tomas de datos fueron hechas cada hora; con excepción de los días donde no se observaban variaciones importantes en las reflectancias de los suelos. Todas las mediciones fueron hechas con cuatro repeticiones en las posiciones A, B y C de los lotes de escurrimiento (Figura 4.4) y los resultados de las posiciones promediados en cada tiempo de toma. Las reflectancias hiperespectrales fueron integradas a las bandas del sensor TM5 usando las funciones de respuesta correspondientes, después de eliminar valores con problemas de estabilidad (banda ultravioleta y la parte final cercana a 2500 nm).

Después de aplicado el evento de precipitación en los lotes de escurrimiento, en cada uno de ellos se midió el escurrimiento (y sedimentos) y la infiltración (Figura 4.4) cada cinco minutos hasta completar una hora.

#### 4.2.1 Características de los suelos en los lotes de escurrimiento

Con el objetivo de tener suelos con propiedades hidráulicas contrastantes, particularmente la tasa de infiltración, se colectaron suelos usados en diversos experimentos en el COLPOS. El Cuadro 4.1 muestra las características físicas y químicas básicas de los cinco suelos usados en el experimento.

Cuadro 4.1. Propiedades físicas y químicas de los suelos usados en el experimento.

Suelo	pH (1:2)	C.E. (1:2) (dS m <sup>-1</sup> )	Densidad aparente (gr cm <sup>-3</sup> )	M.O. (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Classification de textura
1	7.5	0.65	1.31	1.78	64	19	17	Franco Arenoso
2	6.6	0.20	1.18	1.54	44	19	37	Franco arcilloso
3	7.7	0.36	1.53	2.55	30	25	45	Arcilloso Franco arcillo
4	7.2	0.79	1.29	1.72	54	23	23	arenoso
5	7.6	0.43	1.87	2.62	40	41	19	Franco

El Cuadro 4.2 muestra los puntos de las curves de retención de humedad (gravimétrica) de los suelos (alterados) y la Figura 5 presenta sus patrones ajustados con un modelo potencial.



Cuadro 4.2. Datos de las curvas de retención de humedad

Presión (atm)	Húmedad gravimétrica del suelo (%)				
	1	2	3	4	5
0.3	19.2	31.9	37.7	24.4	35.7
1	16.0	25.4	31.1	19.5	30.2
5	12.6	20.4	25.9	16.3	25.4
10	11.8	19.2	24.6	15.9	23.9
15	11.2	18.4	23.2	15.1	23.1

En la Figura 4.5 se observa que los suelos 3 y 5 tienen propiedades hidráulicas similares, por lo que no resultan útiles en términos de contraste.

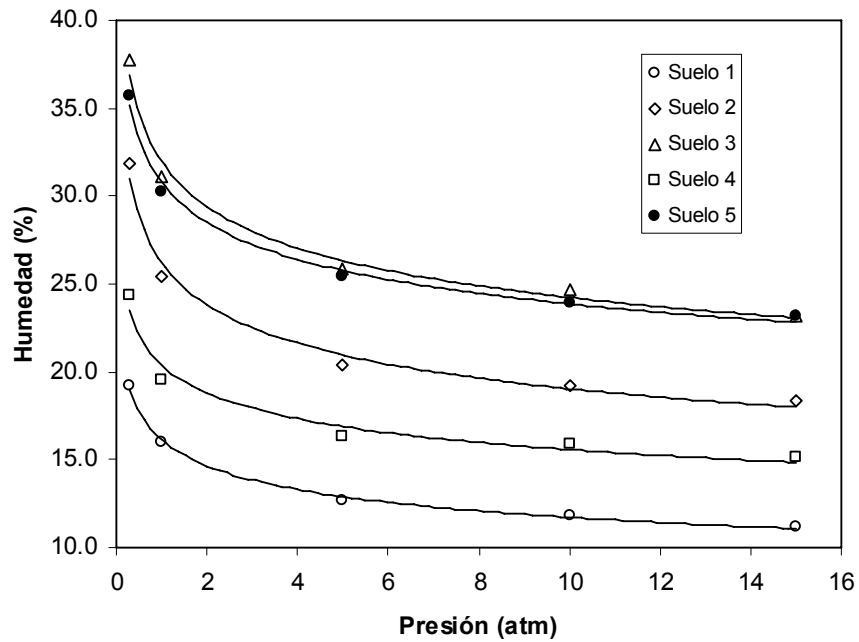


Figura 4.5 Curvas de retención de humedad de los suelos del experimento.

#### 4.2.2 Resultados hidráulicos de los lotes de escurrimiento

La Figura 4.6 muestra la infiltración acumulada de los cinco suelos usados en el experimento, donde sus patrones son congruentes con los de la Figura 4.5; con excepción del suelo 1. Este caso de infiltración baja es debido muy probablemente a un problema en la estructura de infiltración (taponamiento) del lote de escurrimiento usado. La baja infiltración, para un suelo con una textura que implica uno mayor, del lote mostró los escurrimientos superficiales máximos, implicando una restricción en las infiltraciones. No obstante este problema experimental, el suelo 1 tiene un patrón de infiltración asociado a un suelo de textura muy fina, por lo que es útil en los análisis posteriores.

Aunque se buscaron suelos representativos de los grupos hidrológicos del método del número de curva de la relación precipitación-escurrimiento (NRCS, 2004), los resultados no fueron completamente satisfactorios. El suelo 1 corresponde al grupo A, el suelo 2 al grupo B, el suelo 3 al grupo C; y los dos suelos restantes fueron seleccionados como intermedios a estos grupos.

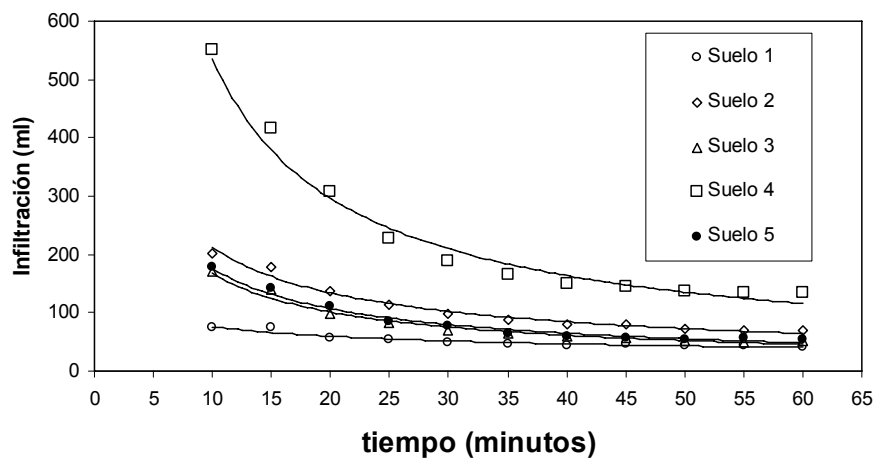


Figura 4.6. Infiltración de los cinco suelos del experimento en lotes de escurrimientos.

### 4.2.3 Resultados de reflectancia de los lotes de escurrimiento

En Paz *et al.* (2007) se definió una relación  $R_{CC}=mR_{PMP}$  con  $m$  alrededor de 0.5. En nuestro caso, usando  $R_{PMP}$  igual a  $R$  secado al aire y  $R_{CC}$  igual a la reflectancia después de la saturación del suelo por el evento de lluvia, la Figura 4.7 muestra la relación definida para el caso del mejor y peor ajuste. A diferencia de Paz *et al.* (2007), la reflectancia IRM1 fue utilizado y la del IRM2 no. De acuerdo a los resultados de la Figura 4.7, el valor de  $m$  fluctúa alrededor de 0.3, como producto del espectro electromagnético de radianza de la lámpara usada en el experimento. No obstante esto, razonablemente se puede esperar que exista una relación relativamente constante entre las reflectancias a PMP y las a CC, simplificando la parametrización del modelo mostrado en la Figura 4.2.

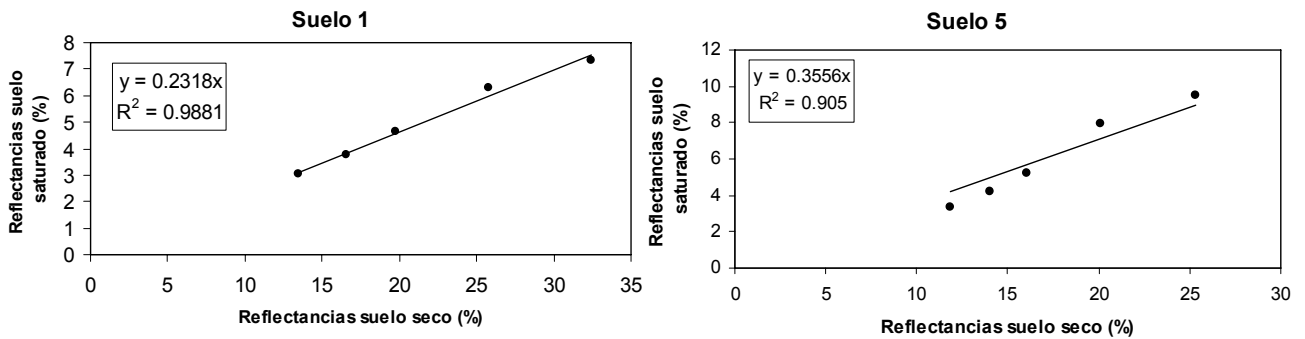


Figura 4.7. Relación mejor y peor entre  $R_{CC}$  y  $R_{PMP}$  para los suelos del experimento.

En relación al modelo de la Figura 4.2, en la Figura 4.8 se muestra los resultados del ajuste a los datos experimentales. Considerando que se realizaron mediciones temporales discretas de las reflectancias en el tiempo, estas fueron fusionadas como si la fuente de energía para el secado de los suelos hubiera estado continuamente. Aunque los resultados no pueden considerarse en términos absolutos, los patrones obtenidos son similares al caso de mediciones y fuente de energía continua (misma geometría iluminación-sensor).

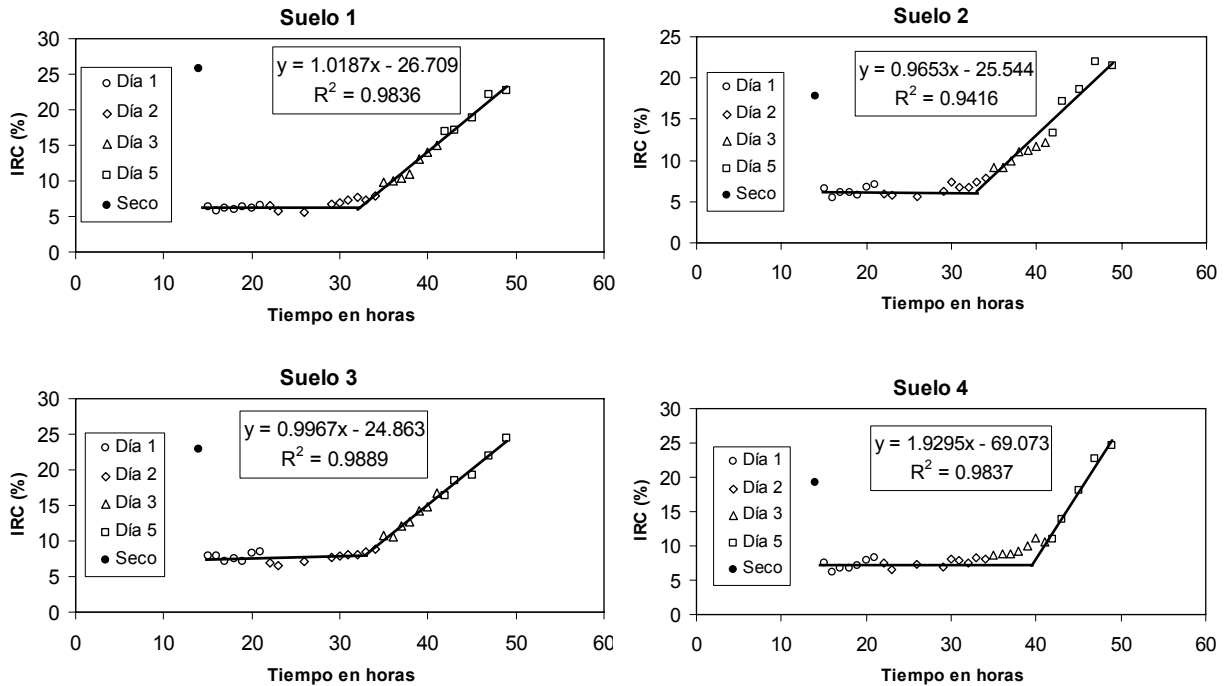


Figura 4.8. Ajuste del modelo de la Figura 2 a los suelos del experimento.

En el Cuadro 4.3 se muestran los parámetros  $q$  y  $t_d$ , para las bandas del IRC e IRM1, que caracterizan en forma completa el modelo temporal de variación de las reflectancias con la humedad de los suelos (conocidas  $R_{PMP}$  y  $R_{CC}$ ; o  $R_{PMP}$  y  $m$ )

Cuadro 4.3. Parámetros del modelo temporal de humedad de los suelos.

Suelo	IRC		IRM1	
	$t_d$ (hr)	$q$	$t_d$ (hr)	$q$
1	17	1.0187	16	1.1361
2	18	0.9653	17	1.3522
3	18	0.9967	15	1.1537
4	24	1.9295	23	2.3527
5	21	1.2467	19	1.3784

Aunque Paz *et al.* (2007) proponen que el uso de la banda del IRM1 tiene valores de saturación menores que la del IRC, los resultados del Cuadro 3 muestran que esto tiene un impacto pequeño en la caracterización del modelo temporal de la relación reflectancia-humedad del suelo.

La Figura 4.9 muestra la relación entre el parámetro  $q$  para la banda espectral IRM1 y la infiltración en una hora tienen una relación lineal y congruente con las propiedades hidráulicas observadas en la Figura 4.6. El caso del suelo 1, sin importar el problema de taponamiento del lote de escurrimiento, tiene un patrón hidráulico-reflectivo asociado a un suelo de textura muy fina, resultante de su situación de infiltración-escurrimiento.

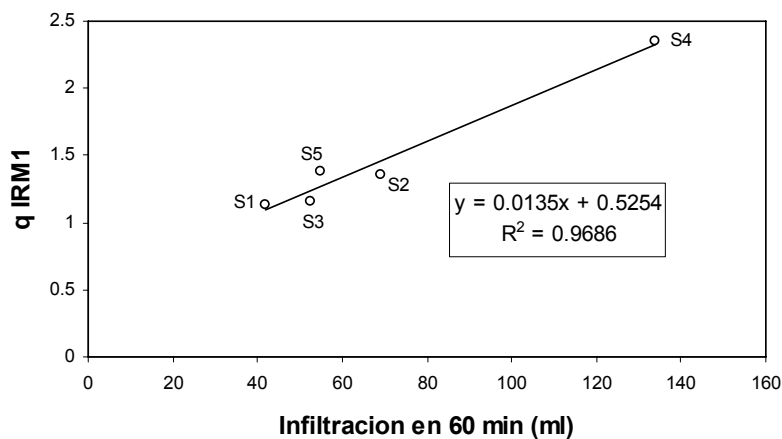


Figura 4.9. Relación entre el parámetro  $q$  estimado de la banda IRM1 y la infiltración en una hora de los lotes de escurrimiento para los suelos del experimento.

Asimismo, la Figura 4.10 muestra la relación entre  $q$  de la banda IRM1 y  $t_d$  para los experimentos realizados en los cinco suelos.

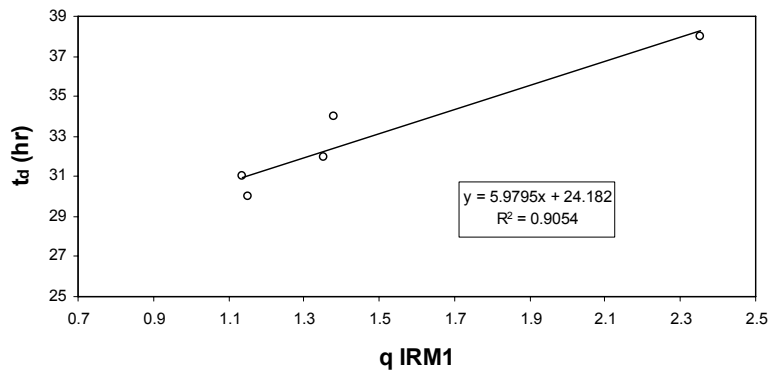


Figura 4.10 Relación entre  $q$  de la banda IRM1 y  $t_d$ .

### **4.3 Comentarios finales**

Los resultados experimentales mostrados para el caso de lotes de escurrimiento sujetos a un evento estandarizado de precipitación y una fuente de iluminación constante muestra que el modelo temporal de la relación reflectancia-humedad del suelo de Paz *et al.* (2007) se comporta bien.

Considerando que las reflectancias a capacidad de campo y del punto de marchitamiento permanente de la humedad en los suelos están relacionadas en forma razonablemente estable, además de que se pueden estimar fácilmente, el modelo temporal de las reflectancias asociadas a cambios en la humedad de los suelos requiere de los parámetros del tiempo hasta el inicio del secado y de la pendiente de la tasa de secado en términos reflectivos. Ahora bien, la tasa de secado y el tiempo de inicio al secado muestran una correlación significativa que puede usarse para construir un modelo que solo utilice un parámetro, haciendo atractivo en términos operacionales, similar al paradigma del número de curva.

Aunque interesantes y promisorios los resultados obtenidos en el experimento realizado, es necesario su generalización y validación bajo condiciones de ambientes no controlados, particularmente los asociados a la variación de la geometría sol-sensor durante el curso del día. Esto está planeado para experimentos futuros de validación del grupo de trabajo.

### **REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

Amano, E. and G. D. Salvucci. 1999. Detection and use of three signatures of soil-limited evaporation. *Remote Sensing of Environment*. 67. pp: 108-122

Baumgardner, M. F., I. F. Silva, I. I. Biehl and E.R. Stoner. 1985. Reflectance properties of soils. *Advances in Agronomy*. 38. pp: 1-44

Brutsaert, W. and D. Chen. 1995. Desorption of the two stages of drying of natural tallgrass prairie. *Water Resources Research*. 31. pp:1305-1313

Gardner, W. R. and D. I. Hillel. 1962. The relation of external evaporative conditions to the drying of soils. *Journal of Geophysical Research*. 67 pp: 4319-4325

Idso, S. B., R. D. Jackson, R. J. Reginato, B. A. Kimball and F. S. Nakayama. 1975. The dependence of bare soil albedo on soil water content. *Journal of Applied Meteorology*. 14. pp: 109-113

Idso, S.B., R. J. Reginato, R. D. Jackson, B. A. Kimball and F. S. Nakayama, F.S. 1974. The three stages of drying of a field soil. *Soil Science Society of America Proceedings*. 3. pp: 831-837.

Jackson, R. D., S. B. Idso and R. J. Reginato. 1976. Calculation of evaporation rates during the transition from energy-limiting to soil-limiting phases using albedo data. *Water Resources Research*. 12. pp: 23-36

Lobell, D.B. and G. P. Asner. 2002. Moisture effects on soil reflectance. *Soil Science Society of America Journal*. 66. pp: 722-727

Makkink, G. F. 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters. *Journal of the Institute of Water Engineering*. 11. pp: 277-288

Morin, J., D. Goldberg and I. Seginer. 1967. A rainfall simulator with a rotating disk. *Transactions of the ASAE*. 10: 74-80

Muller, E. and H. Décamps. 2000. Modeling soil moisture-reflectance. *Remote Sensing of Environment*. 76. pp:173-180

NRCS. 2004. Part 630 Hydrology. National Engineering Handbook. Natural Resources Conservation Service. United States Department of Agriculture. (210-VI-NEH, July 2004).

Neitsch, S.L., j.g. Arnold, j.r. Kiniry, J.R. Williams and k.w. King. 2002. Soil and water assessment tool theoretical documentation. Version 2000. TWRI Report TR-191. Texas Water Resources Institute. College Station, Texas. pp 498

Paz, P. F. 2007. Mitos y falacias del método hidrológico del numero de curva del SCS / NRCS. Enviado a Agrocienza

Paz, F., M. I. Marín, E. López, A. Zarco, M.A. Bolaños, J.L. Oropeza, M. Martínez, E. Palacios y E. Rubiños. 2007. Elementos para el desarrollo de una hidrología operacional con sensores remotos: suelo desnudo. Enviado a Ingeniería Hidráulica en México.

Priestley, C. H. and R. J. Taylor. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. Monthly Weather Review. 100. pp:81-92

Salvucci, G. D. 1997. Soil and moisture independent estimation of stage-two evaporation from potential evaporation and albedo or surface temperature. Water Resources Research. 33. pp: 111-122

Sharpley, A. N. and J. R. Williams (Eds.). 1990. EPIC – Erosion/Productivity Impact Calculator. 1. Model documentation. USDA Technical Bulletin No. 1768

SCS. 1972. Section 4: Hidrology. National Engineering Handbook. Soil Conservation Service. USDA.

Weidong, L., F. Baret, G. Xingfa, T. Qingxi, Z. Lanfen and Z. Bing. 2002. Relating soil surface moisture to reflectance. Remote Sensing of Environment. 81. pp: 238-246



## **CAPITULO 5. CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES**

La modelación de la relación precipitación-escorrentía en términos operacionales requiere del desarrollo de estrategias alternativas para conocer el estado del suelo y la vegetación en una parcela o cuenca hidrológica. Los métodos hidrológicos actuales, desde los más complejos a los más simples, se fundamentan en aproximaciones mecanicistas o empíricas que necesitan de datos o parámetros generalmente no disponibles en las aplicaciones.

Los sensores remotos, por sus rasgos de muestreos espacialmente exhaustivos y tiempos de revisita cortos, son una tecnología que potencialmente puede usarse en la modelación de la relación precipitación-escorrentía. No obstante esto, los intentos de aplicación ha sido del tipo indirectos, estimación de los valores de variables de modelos, y con bajo éxito.

La investigación realizada en este trabajo fue orientado a la generación de un marco teórico-empírico simplificado basado en el paradigma del método del número de curva, bajo dos consideraciones: suelo desnudo y mezcla suelo-vegetación. El último caso será tratado en otra tesis, por lo que no se reviso.

Para construir un marco teórico operacional del uso de los sensores remotos en las aplicaciones hidrológicas, se desarrollo un modelo entre la humedad del suelo y las reflectancias. El modelo desarrollado sirvió de base para su generalización al espacio del tiempo. Ambos modelos son del tipo lineal y pueden ser parametrizados fácilmente en términos operacionales.

Bajo ciertas consideraciones, el modelo temporal de los cambios en la reflectancia de los suelos debido a cambios en su humedad puede ser simplificado al uso de un solo parámetro, facilitando las aplicaciones.

Los modelos propuestos fueron validados en dos experimentos, uno bajo condiciones de iluminación solar y otra con iluminación artificial. En ambos casos los resultados muestran que la bondad de ajuste del modelo a los datos experimentales es bueno y puede usarse en forma confiable.

De la experiencia obtenida en esta primera aproximación al uso de los sensores remotos en la modelación de la relación precipitación-escorrentía, es recomendable la realización de las siguientes acciones, como complemento de los esfuerzos hechos:

- Repetir el experimento en el área del simulador de lluvia, pero con mediciones de reflectancias en forma continua por varios días, sin interrupciones ni apagado de las lámparas de iluminación.
- En condiciones de iluminación artificial y natural, realizar experimentos con suelos de propiedades hidráulicas diferentes, pero con factores como:
  - Color de los suelos (contenido de M.O., óxidos de fierro, sales solubles)
  - Rugosidad de la superficie
  - Niveles de saturación inicial

Es importante el desarrollo de un esquema teórico que considere en forma explícita el efecto de la geometría sol-sensor en los patrones temporales de la humedad de los suelos.

Asimismo, se recomienda el desarrollo de una estrategia de modelación considerando a los sensores remotos; es decir, un modelo continuo de la evolución de las reflectancias-humedad de los suelos, pero con muestreos discretos.

## **ANEXO A. DESCRIPCION DEL EXPERIMENTO REALIZADO PARA LA MODELACION TEMPORAL DE LOS CAMBIOS EN LA HUMEDAD DEL SUELO**

El experimento se realizó con la finalidad de obtener información de la respuesta hidrológica y el estado energético en “suelo desnudo”, usando sensores remotos, para la modelación de la relación precipitación-escurrimiento y los cambios temporales en la humedad del suelo.

El trabajo se desarrolló en dos partes. En la primera se realizó la medición de la respuesta espectral y térmica a diferente grado de humedad (seco, capacidad de campo y saturado) en el suelo y la medición de la respuesta hidrológica (infiltración y escurrimiento) ante un evento de lluvia controlado. En la segunda parte se monitoreo de forma temporal la respuesta espectral y térmica del suelo durante el proceso de secado, bajo condiciones de iluminación artificial.

Los pasos involucrados en el experimento se describen a continuación.

### **1. Preparación del área experimental**

El experimento se llevó a cabo en el laboratorio de simulación de lluvia del colegio de postgraduados.

Debido a que las mediciones de reflectancia requerían de un control de las condiciones de iluminación, fue necesario acondicionar este espacio como un cuarto oscuro. Para ello se sellaron ventanas y orificios de entrada de luz.

Al interior del laboratorio, se recubrió con tela negra el área del simulador de lluvia (Figura A.1), de tal modo que las mediciones de reflectancia en los lotes no fueran afectadas por la entrada de luz del exterior.



Figura A.1 Acondicionamiento del área del simulador de lluvia

Fue necesario, entonces, acondicionar el área del simulador con luz artificial. Para este efecto se utilizaron 5 lámparas de halógeno de cuarzo de 500 watts, dispuestas en el arreglo que se muestra en la figura A.2

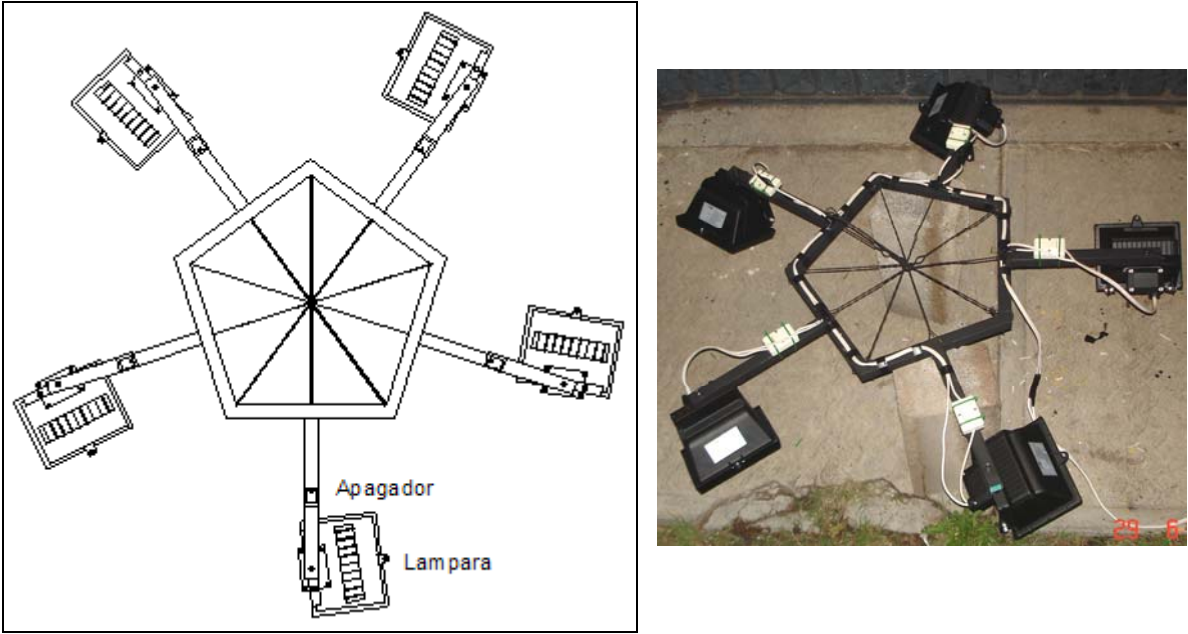


Figura A.2 Distribución de lámparas para iluminación artificial

La base pentagonal que sostiene a las lámparas se construyó en material PTR de 1 pulgada, con las dimensiones que se muestran en la figura A.3

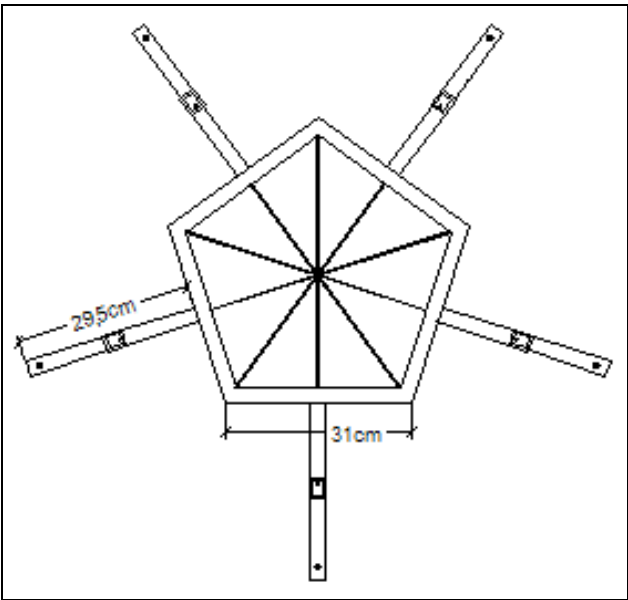


Figura A.3 Dimensiones de la base pentagonal de las lámparas.

Las lámparas se montaron de tal forma que quedaran, con respecto de los lotes, en la posición que se muestra en la figura A.4. Esto para propiciar que la iluminación fuera homogénea y evitar el problema de sombreado al momento de realizar la medición.

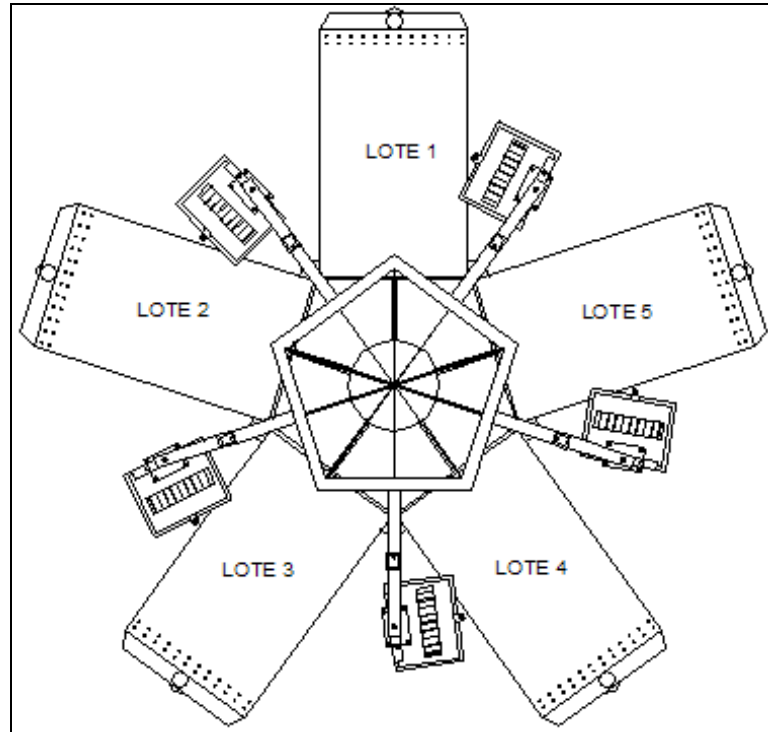


Figura A.4 Distribución de lámparas en los lotes.

## 2. Preparación del suelo

Se utilizaron 5 suelos de diferente textura, tres de ellos representativos de los grupos hidrológicos B, C y D que maneja el método del Número de Curva y dos de textura intermedia que para mayor facilidad se identificaron con las letras E y F.



Figura A.5 Secado de suelos.

Estos suelos se utilizaron en condición seca, así que se colocaron previamente al sol para retirar el exceso de humedad de los mismos (Figura A.5).

### 3. Armado de lotes

Se utilizaron lotes de escurrimiento de 30x50x12 cm (Figura A.6) colocados dentro del área del simulador de lluvias en la disposición que se muestra en la figura A.7

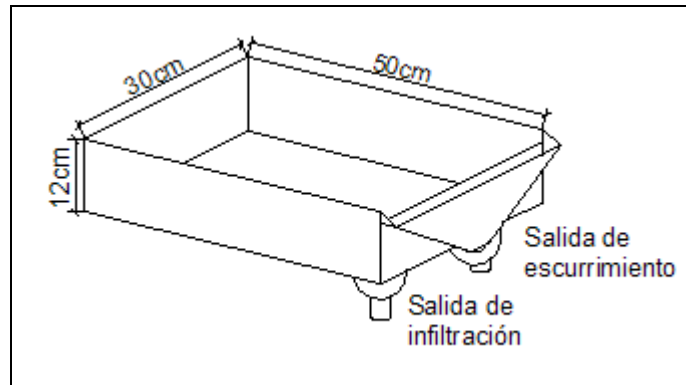


Figura A.6 componentes y dimensiones de un lote de escurrimiento

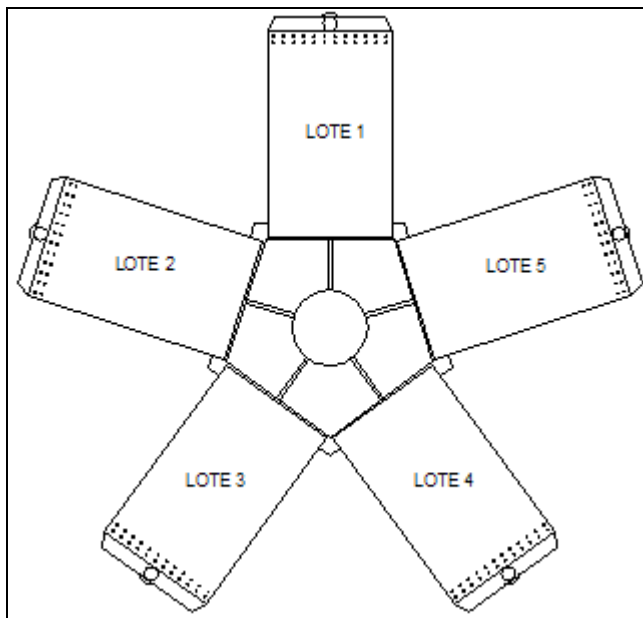


Figura A.7 Disposición de lotes dentro del área del simulador.

En estos lotes se montaron los suelos, de acuerdo al orden que se muestra en el cuadro A.1.

Cuadro A.1 Orden de colocación de suelos en los lotes de escurrimiento del simulador.

SISTEMA	SUELO	LOTE	TEXTURA DEL SUELO
Suelo desnudo	B	1	Franco arenoso
	C	2	Franco arcilloso
	D	3	Arcilla
	E	4	Franco arcillo-arenoso
	F	5	Franco

Los pasos para el armado de los lotes, se detallan a continuación:

- a. Se colocó una malla de fierro en los orificios de salida de infiltración de cada lote y sobre ésta una capa de grava de 2 cm de espesor.



Figura A.8 Colocación de malla de fierro y grava en lote de escurrimiento.

- b. Sobre la grava se extendió una tela permeable y encima de esta se colocó una capa de gravilla de 2 cm de espesor.



Figura A.9 Colocación de gravilla en lote de escurrimiento.

- c. Se colocó otra tela permeable sobre la gravilla y enseguida el suelo correspondiente, de acuerdo al orden que se muestra en el cuadro A.1



Figura A.10 Colocación de suelo en lote de escurrimiento.

d. Finalmente, se compactó el suelo con la ayuda de una madera de misma área superficial del lote (30x50cm) y golpeando suavemente con un mazo de plástico, hasta dejar el suelo al mismo nivel con la salida del escurrimiento (Figura A.11). Los suelos quedaban acomodados como se muestra en el perfil de la figura A.12



Figura A.11 Compactación de suelo de lotes experimentales

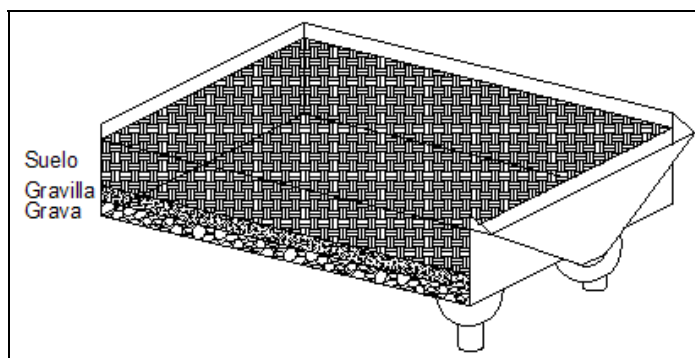


Figura A.12 Perfil de del suelo montado en lote experimental



#### 4. Preparación de equipo de medición.

Para la medición de la respuesta espectral y térmica del suelo, se utilizó un radiómetro multiespectral **FieldSpec®Pro**, modelo **FR**, de la compañía **ASD** (Analytical Spectral Devices, Inc.) y un termómetro marca **apogee**.

Antes de iniciar las mediciones este equipo debía estar armado, correctamente conectado y con batería cargada (Figura A.13), en el caso del radiómetro, éste debía encenderse 15 minutos antes de ser utilizado. El sensor del radiómetro y el del termómetro se montaron en la misma base (Figura A.14) para hacer más eficientes las mediciones.



Figura A.13 Equipo de medición



Figura A.14 Sensores para temperatura y reflectancia.

#### 5. Medición de reflectancia y temperatura del suelo

La reflectancia y temperatura del suelo se midió en tres condiciones de humedad: *Seco*, *Capacidad de Campo* y *Saturado*. Para cada condición se tomaron tres lecturas por lote, en las posiciones que se observan en la figura A.15

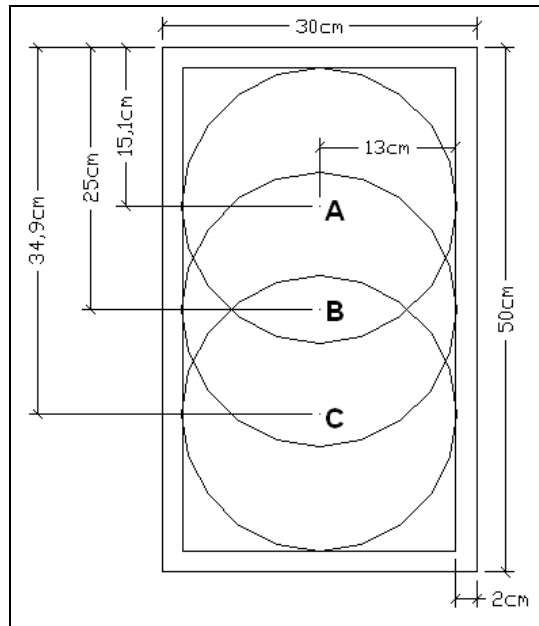


Figura A.15 Posiciones del sensor en el lote, para las mediciones de temperatura y reflectancia.

Las mediciones para suelo *seco* se realizaron inmediatamente después de armar los lotes, enseguida se humedeció el suelo a *Capacidad de campo* y se repitió la medición en los 5 lotes. La medición de reflectancias para la condición *Saturada* se realizó después de la simulación de lluvia, que es cuando el suelo del sistema se encontraba saturado de agua.

En cualquier caso, antes de realizar la medición, se colocaron los lotes a una pendiente del 3% (1.5 cm de desnivel) y el sensor a 52 cm de la superficie de los lotes. En la figura A.16 se muestra la forma en la que se tomó la lectura de reflectancias y temperatura.



Figura A.16 Forma de medición de temperatura y reflectancia.

Después de la medición para la condición saturada se continuó el monitoreo temporal durante el proceso de secado del suelo, que tuvo una duración de aproximadamente 30 horas. Esto requirió mantener las lámparas encendidas de forma permanente como se observa en la figura A.1.

## 6. Humedecimiento del sistema a CC.

Un paso previo a la simulación de lluvia fue el humedecimiento del suelo de los lotes a Capacidad de Campo. Esto se realizó por dos razones: la primera, para conocer la respuesta espectral y térmica del sistema bajo esa condición de humedad, y la segunda, porque fue necesario que la condición inicial de humedad fuera homogénea en los cinco lotes antes de iniciar la simulación de lluvia.

Antes de iniciar el humedecimiento, se colocaron los lotes a 0% de pendiente. Y enseguida se colocaron recipientes con agua, más o menos a la altura de los lotes, procurando que el espejo de agua estuviera siempre al mismo nivel entre la gravilla y el suelo de los lotes (Figura A.17).



Figura A.17 Colocación de recipientes para humedecimiento del sistema

Con ayuda de mangueras se aplicó agua al sistema, a través del orificio de salida que hay en la parte inferior de los lotes (orificio de salida de infiltración). Ver figura A.18.



Figura A.18 Procedimiento para el humedecimiento del sistema

Con esto se buscó que el humedecimiento del suelo fuera gradual, homogéneo y por capilaridad, por ello fue importante conservar el agua de los recipientes al nivel que se indicó anteriormente hasta terminar el humedecimiento.

### 7. Simulación de lluvia y medición de infiltración y escurrimiento

La simulación de lluvia fue el paso más importante para conocer la respuesta hidrológica de los diferentes suelos utilizados. Se utilizó un simulador de lluvias de disco rotatorio tipo Morín, con el cual se aplicó una lluvia de 100 mm durante 1 hora y se midió a cada lote el escurrimiento y la infiltración cada 5 minutos. El agua de infiltración se pesó y se desechó al instante, mientras que el agua de escurrimiento se reservó en botes blancos de 1 litro (Figura A.20), para separar posteriormente el peso del agua del peso del sedimento arrastrado.



Figura A.19 Agua de escurrimiento.

El procedimiento detallado para obtener la información del escurrimiento se describe a continuación:

- a. Una vez que terminó la simulación de lluvia, se pesaron los botes con el agua de escurrimiento.
- b. Posteriormente se agregó en cada bote 10 ml de solución de alumbre al 10% para propiciar la sedimentación de las partículas de suelo, dejándolo reposar aproximadamente 12 horas.
- c. Por decantación se separó el agua y el sedimento quedó en los botes. Posteriormente se metieron los botes a la estufa a una temperatura de 50°C y se dejaron alrededor de 24 horas, para retirar el exceso de agua.
- d. Se pesaron nuevamente los botes con el sedimento seco. De este modo, al peso inicial del agua se restó el peso del sedimento y el peso del alumbre, para conocer el peso real del agua escurrida durante la simulación de lluvia.
- e. El peso del agua se relacionó directamente con el volumen de la misma, considerando una densidad de 1gr/cm<sup>3</sup>.