

# TESIS

Presentada para obtener

**EL TITULO DE DOCTOR DE L'INSTITUT NATIONAL  
POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE**

por:

*Marcel ACHKAR*

**“Evaluación de la Distribución de la Materia Orgánica del Horizonte  
Superficial del Suelo mediante el uso de Imágenes Satelitales.**

**Aplicación de metodología SIG”**

Caso: Cuenca del Arroyo Sánchez - Uruguay

Defendida el 15 de febrero de 2005 ante el tribunal compuesto por:

**Dra. M.J. LEFEVRE**  
**Dr. M. KAEMMERER**  
**Prof. Tit. D. PANARIO**  
**Dr. R. LAVADO**  
**Dr. J. PARUELO**  
**Dr. J.C. REVEL**

**Orientadora**  
**Orientador**  
**Orientador**  
**Evaluador**  
**Evaluador**  
**Presidente de Tribunal**

CNES Francia  
ENSAT – INPT Francia  
UNCIEP UdelaR Uruguay  
UBA Argentina  
UBA Argentina  
ENSAT INPT Francia

## RESUME

# **Evaluation de la distribution de la Matière Organique dans l'horizon superficiel des sols par utilisation des images satellites.**

**Application de méthodologie SIG.**  
Bassin versant du ruisseau Sánchez - Uruguay

## INTRODUCTION

L'analyse de la distribution spatiale des sols, de quelques facteurs qui en font partie ou de quelques propriétés, est un moyen puissant pour la planification des activités anthropiques. La dégradation rapide des terres comme conséquence de son usage agricole, a ravivé dans ces dernières années une préoccupation qui augmente de jour en jour, à cause de la perte de la qualité des sols et par la nécessité de gérer des systèmes de production durable (Mielniczuk, 1999). La connaissance exacte de la distribution spatiale de la matière organique du sol fournit l'information nécessaire sur les attributs des sols et de l'environnement. Information qui permet la préparation des changements dans les systèmes de conduite employés par les producteurs agricoles pour éviter la dégradation du système (Druck Funks, 1998; Mielniczuk, 1999).

Le contenu de matière organique est l'indicateur principale qui reflète largement la qualité du sol, cela indique que le pourcentage de matière organique est un élément très sensible par rapport aux techniques de conduite (Mielniczuk, 1999). De même, la plus part des propriétés du sol et de l'agrosystème sont très liées à la matière organique : on note ainsi l'importance de la formation des agrégats qui implique la structure, la régulation du régime hydrique, thermique et de l'aération.

Le contenu de matière organique dans les sols est une propriété très liée à la qualité du sol et du paysage, considéré comme un indicateur de l'érosion ou dégradation des terres. Mais il est aussi considéré comme un facteur régulateur des processus de mise à disposition des nutriments, de la capacité de rétention de l'eau, de la perméabilité, de l'aération, liée à la structure, et comme élément régulateur de la compaction mécanique constitue ainsi un élément fondamental de la capacité productive du sol (Bayer et Mielniczuk, 1999; Arvidsson, 1998). La stabilité de la structure du sol, et plus particulièrement des macro-agrégats, est directement liée au contenu de matière

organique et est dépendante des conditions climatiques, mais aussi du travail du sol, qui peut être considéré comme le facteur principal des changements de la structure du sol (Boix Fayos *et al.*, 2001).

Le contenu de matière organique dans les sols est relativement inconstante et réagit très rapidement aux changements extérieurs. La production des résidus organiques et la décomposition de la matière organique fraîche montrent un changement spatial très grand en fonction du paysage qui est fortement corrélé avec la topographie du terrain. Les études agronomiques représentent un atout important pour augmenter la production (Krauchenco et Bullocka, 2000). L'incorporation du carbone organique dans les horizons superficiels du sol est dépendante de la production de la biomasse, de la température et des précipitations (Alvarez et Lavado, 1997). La distribution spatiale variable de ces facteurs dans le paysage conditionne ou est conditionnée (fertilité, température ou humidité du sol) à la distribution de la matière organique.

Sur les sols avec un couvert végétal naturel, les modifications ou les altérations de la quantité totale de matière organique sont toujours compris dans un intervalle de faible amplitude. Mais l'usage agricole de ces sols produit des différents niveaux d'altération de cet intervalle concernant le contenu total de MO du sol, qui se note en général par une diminution ou une réduction accélérée de celui-ci. Le taux de diminution du contenu total de MO dépend de l'usage et du mode agricole de production appliqués en un site précis, mais en établissant un processus plus ou moins accéléré de dégradation des conditions physiques, chimiques et biologiques du sol. La lente instrumentation des systèmes de mesures à échelles régionales et nationales constituent une importante limitation dans l'interprétation spatiale de la genèse du sol et dans l'évolution de la cartographie des sols (Legros, 1996).

La distribution de la matière organique du sol étant un des facteurs les plus importants du potentiel de production des sols (dans le large sens du mot) et un de ceux qui présentent une plus grande variation (spatiale et temporelle) dépendant de l'emploi historique du territoire, la cartographie des sols n'est pas une activité simple ni une construction mécanique de transposition de l'information du terrain à la carte ; elle a ses fondements dans la connaissance théorique de l'objet, ses cycles et sa genèse (Gaddas, 2001). Dans la pratique, la cartographie traditionnelle des sols s'organise en campagnes de terrain systématiques et analyses complémentaires du laboratoire, il s'agit d'une activité de longue durée et coûteuse (Bardint *et al.*, 1984).

Les techniques de télédétection, qui décrivent les observations d'un objet réalisées sans avoir un contact physique avec lui (Pinilla, 1995), fournissent beaucoup d'informations pour la résolution du problème de la distribution des sols dans une unité du paysage. La télédétection peut être définie comme l'ensemble des techniques et des connaissances employées pour déterminer les caractéristiques physiques et biologiques des objets par des mesures faites à distance (Girard, 1985). Au cours de ces dernières années, ces techniques ont présenté des nouveautés et des progrès importants : Depuis 1960, plusieurs capteurs multispectraux ont été employés pour la discrimination de différents aspects liés aux sols. En permettant de cartographier de façon continue (limitée par la résolution spatiale de l'image satellite) les variations de quelques caractéristiques du système : contenu de l'humidité du sol, strates de végétation et contenu de matière organique de l'horizon superficiel des sols.

Le travail avec des images satellite comme techniques pour obtenir l'information et les SIG comme technique d'organisation et de conduite d'information spatiale, permettent d'élaborer un modèle de distribution des facteurs et des propriétés du sol qui va permettre de mettre en évidence une distribution continue, mais aussi identifier les discontinuités dans l'organisation spatiale du sol (Bradant, 1994). Les techniques de télédétection et l'intégration de SIG, permettent de mieux comprendre l'organisation spatiale du sol, en constituant un important potentiel instrumental pour améliorer la démarche de la ressource.

## **OBJECTIFS :**

### **Objectif général :**

Evaluer la dynamique de la distribution de la matière organique de l'horizon superficiel du sol dans un bassin hydrographique, dans une zone de climat tempéré, humide, avec l'utilisation de techniques de télédétection

### **Objectifs spécifiques :**

- Déterminer les facteurs environnementaux qui interviennent dans la distribution spatiale de la matière organique dans une unité du paysage et conditionnent sa réponse spectrale.
- Evaluer la réponse spectrale du sol nu à partir de l'information d'images Landsat et définir les corrélations avec les facteurs environnementaux qui sont liés.
- Créer un modèle de distribution spatiale de la matière organique du sol d'après l'information des images Landsat et la distribution des facteurs environnementaux connus (pentes et position dans le paysage, humidité, matière minérale).
- Créer un SIG opérationnel pour le bassin étudié avec un niveau de résolution au 1/50.000 qui permette le suivi en continu des qualités du sol et devienne un outil pratique dans la gestion territoriale du bassin et dans l'emploi agronomique des sols.

### **Spécifiquement, ce travail se propose répondre aux questions suivantes:**

- Est-il possible de faire un suivi informatisé de la distribution de la MO totale de l'horizon superficiel du sol avec l'utilisation des techniques de télédétection ?
- L'intégration de techniques de télédétection de haute et basse résolution permettent-elles de suivre le comportement spatial des unités sol-végétation ?
- Les techniques employées permettent-elles de créer un modèle pour étudier la conduite des unités sol-végétation dans le temps ?

## **I. MATERIEL ET METHODE**

### **1.1 Plan du document**

Le travail comprend quatre grandes parties:

- a) La première partie du travail concerne l'importance du système sol, l'état des lieux de la gestion des sols dans la zone littorale de l'Uruguay et les processus de dégradation. Il est présenté une caractérisation sommaire du bassin hydrographique du ruisseau Sanchez et sa définition comme lieu d'étude et zone d'essais pour le développement du travail.
- b) Dans la deuxième partie sont présentées les unités sol-végétation utilisées pour l'analyse globale du bassin, ainsi que leurs principales caractéristiques les définissant. De même sont présentés les aspects techniques de l'intégration d'informations fournies à partir de la télédétection haute résolution - basse résolution, en proposant une méthodologie du travail avec appui du système SIG, ainsi que les éléments les plus remarquables de l'intégration SIG – Télédétection pour la génération et l'organisation de l'information nécessaire pour la démarche environnementale du territoire.
- c) Dans la troisième partie, se basant sur l'analyse du comportement spectral des sols, on propose une méthodologie d'évaluation spatiale de la matière organique avec l'emploi des images Landsat.
- d) Dans la quatrième partie, on s'intéresse plus précisément au comportement et au fonctionnement du bassin comme système avec les approches d'un modèle d'écoulement superficiel. Cette approche permet de présenter l'importance de ces paramètres dans la mobilité de la matière organique et qui servira de discussion générale de l'ensemble des informations obtenues dans le développement de ce travail.

## **1.2 Le bassin du ruisseau Sanchez**

Le bassin du ruisseau Sanchez (60000 ha) constitue une zone de polycultures céréalières-élevage. La consolidation des producteurs mixtes dans cette zone est représentative de la gestion agricole du littoral. La dynamique, dans les changements dans l'utilisation du sol, durant la période du travail (1998-2003) est caractérisée par l'accroissement progressif des cultures forestières des espèces de rapide croissance (début de la récolte du bois), l'expansion de la culture du soja à partir de l'année 2001 et la diminution du cheptel ovin.

Les changements importants dans l'usage du sol durant ces années transforment la zone en une aire intéressante comme aire pilote, puisque la propre dynamique des transformations de la physionomie du territoire permet d'évaluer la potentialité des travaux développés

Mais le changement annuel de la situation de l'usage des sols et le fait de vouloir profiter des écosystèmes présents dans le bassin présentent des difficultés et font que le développement du travail est encore plus compliqué. Cependant, cette série de changements dynamiques dans le bassin se réalise sans transformations importantes au niveau de la parcelle (subdivision de la terre en unités productives), ce qui facilite le développement tout de même le développement de la méthodologie que l'on propose .

Enfin, le choix de cette zone permet de rassembler les caractéristiques nécessaires concernant la biodiversité environnementale et les usages productifs et leur dynamique.

En conclusion, il est possible d'affirmer que le bassin du ruisseau Sanchez réunit les conditions pour être considéré comme une aire pilote qui permettra d'avancer dans la méthodologie d'évaluation et créer un modèle pour le développement des activités agricoles productives de la société uruguayenne.

### 1.3 Evaluation des unités sol-végétation

Les unités proposées sont définies en accord avec l'information disponible sur la diversité du paysage de la zone littorale du Rio Uruguay, avec un usage agricole qui réunit la production céréalière avec l'élevage ovin et bovin. Les usages du sol plus actuels, dans cette zone, concernent les cultures forestières avec des espèces à croissance rapide et, depuis les dernières trois années, la culture de soja qui occupe des surfaces de plus en plus importantes.

#### Six unités :

- a) **Forestière** : sylviculture, exclusivement des cultures d'eucalyptus dans le bassin du ruisseau Sanchez.
- b) **Pâturage agricole hivernal** : ce sont des espaces fondamentalement dédiés à l'élevage. Ce sont principalement les prairies naturelles avec prépondérance de graminée du cycle hivernal ; prairies artificielles hivernales et cultures du fourrage à espèces hivernales et en moins grandes quantités les cultures agricoles extensives hivernales.
- c) **Pâturage agricole estival** : ce sont des espaces dédiés à l'élevage extensif. Ce sont principalement les prairies naturelles avec abondance de graminée du cycle estival. Dans les endroits bas du paysage, ces prairies naturelles sont réduites ou elles sont associées à la forêt-galerie le long des cours d'eau. On trouve aussi dans cette unité des espaces avec des prairies artificielles et des cultures fourragères ; on y trouve surtout les espaces du cycle estival associés avec les surfaces de cultures agricoles extensives estivales.
- d) **Agricole pâturage estivale** : la composition de cette unité est semblable à celle du pâturage agricole estival, en ce qui concerne les classes d'usage des sols, ce qui change c'est la classe des cultures agricoles estivales qui occupent la plus grande superficie de cette unité.
- e) **Agricole pâturage hivernal** : la composition de cette unité est semblable à celle du pâturage agricole hivernal, en ce qui concerne les classes d'usage des sols, ce qui change c'est la classe des cultures agricoles hivernales qui occupent la superficie la plus grande de cette unité.
- f) **Agricole** : cette unité est formée par les surfaces du bassin qui sont dédiées presque exclusivement à des activités agricoles, avec intégration de cultures agricoles et implantation de prairies artificielles. C'est l'unité qui présente l'usage du sol plus intensif.

Pour analyser la conduite spatiale et temporelle des unités sol-végétation, on emploie une série d'images NDVI de l'instrument végétation de SPOT 4 qui couvre la période du 1/4/1998 au 21/12/2003, avec un pas de 10 jours, ce qui se traduit par un total de 207 images.

Étant donné la grande quantité d'images employées, il a fallu construire une conduite de travail qui permette de systématiser l'intégration et l'analyse des images NDVI dans le SIG. En produisant une matrice de renseignements avec toute l'information 787 sommiers et 207 variables. A partir de la matrice de renseignements on fait l'analyse des composantes principales (ACP). Les résultats de l'ACP sont intégrés au SIG pour analyser sa distribution spatiale.

Avec les résultats tirés de l'ACP, il est possible de différencier spatialement les six unités sol-végétation. On peut obtenir aussi la séparation par classe des différents pixels dans la matrice de renseignements et à partir de ces renseignements ainsi rangés évaluer la conduite annuelle et saisonnière des différentes unités sol-végétation.

## **II. RESULTATS**

### **2.1 Analyse de l'information produite**

On a construit les figures et les graphiques qui représentent la conduite annuelle du NDVI selon l'unité sol- végétation, contenant en plus un graphique qui représente la variation dans les 68 mois qui comprend l'étude réalisée.

En général, les six unités identifiées présentent quelques aspects généraux de conduite semblables :

- Les six unités de la période du 4/1998 au 12/2003 présentent une tendance croissante dans le NDVI avec des valeurs faibles de croissance. La pente de la tendance linéale présente des valeurs entre 1,1 et 0,5%, très inférieures à la tendance des précipitations qui présentent une pente de 3%.
- La sécheresse de la fin de 1999 et du début de 2000 a affecté toutes les unités avec des intensités différentes, mais elles représentent toutes une diminution dans le NDVI très inférieure aux minimums des cycles annuels. Pour l'unité forestière c'est une diminution de 18% par rapport au minimum hivernal annuel, tandis que pour l'unité agricole c'est 40%.
- Toutes les unités présentent un minimum principal dans la distribution du NDVI vers le mois de juillet, ce qui correspond au mois des températures minimales ; dans ce cas et pour toutes les années relevées, il y a de l'eau disponible pour la demande de la végétation dans toutes les unités et dans tous les types de sols.

- Toutes les classes présentent deux maximums relatifs qui se placent, en termes généraux, à la fin de l'été et à la fin du printemps ; la prépondérance des espèces du cycle hivernal ou estivale conditionne le maximum relatif le plus important.
- Pour faciliter la visualisation des tendances, on a ajouté dans tous les cas une courbe polynomiale de sixième degré. Dans tous les cas annuels, le modèle est validé avec un intervalle de confiance de 95% et  $R^2$  varie entre 0,6 et 0,9. Ce genre de courbe ne présente pas la même facilité pour l'ajuster que quand on travaille avec une période totale.

Bien que les six unités présentent des points communs pendant les six années étudiées, chaque courbe présente ses particularités qui indiquent la conduite différenciatrice entre chacune de ces unités identifiées :

- L'unité forestière est celle qui présente la plus grande tendance de croissance avec la ligne associée (pente=1,1%). Cette situation est logique, car c'est durant cette période que l'on a commencé à planter et à développer les cultures forestières dans le bassin.
- Pratiquement, l'unité forestière ne présente pas de variations dans la distribution du NDVI ; pendant la sécheresse elle a été l'unité la moins bouleversée et les maximums d'été et du printemps forment un continu. Cela prouve que pour le développement d'eucalyptus, la température est plus importante que la situation de stress hydrique permanent au mois d'été.
- La comparaison entre les unités avec prépondérance des espèces hivernales ou estivales indique la position du plus grand maximum corrélé avec le plus grand minimum du printemps ou à la fin de l'été respectivement.
- On note la prépondérance des prairies naturelles en relation avec les cultures agricoles aussi bien dans les unités estivales ou hivernales. Les prairies naturelles donnent une plus grande stabilité à la distribution annuelle du NDVI pour équilibrer peu à peu les différences entre les maximums et les minimums absolus ou relatifs.
- L'unité avec prépondérance d'usage agricole est celle qui présente les plus grands niveaux de contraste entre les maximums et les minimums et elle est aussi l'unité qui présente le plus grand abaissement des valeurs du NDVI pendant la sécheresse de 1999-2000.

En conclusion, la conduite des courbes du NDVI pendant les années considérées correspond à ce que l'on attendait d'après la définition et l'intégration de chaque unité sol-végétation permettant l'analyse de la distribution spatiale.

## **2.2 Evaluation de la réflectance des sols**

On a travaillé dans la détermination de la variabilité de la réflectance d'après les constituants du sol et les fonctionnements du système pour obtenir ainsi sa signature spectrale. Pour la détermination de la signature spectrale des sols, ce travail a été fait en

partenariat avec l'Observatoire Midi-Pyrénées (OMP). La méthodologie du travail est de mesurer dans les laboratoires de l'OMP la réflectance des différents échantillons réunis en deux groupes:

- a) Echantillons des mélanges de matériaux simples constituants de sol (argiles, sable, MO)
- b) Echantillons de sols prélevés dans le bassin.

Les échantillons (30 à 40 grammes) sont placés dans une cuve (5cm de diamètre) et rangés sur des plateaux carrés contenant 9 cuves reposant sur un fond de matériels connus. La réflectance est mesurée à des longueurs d'onde comprises entre 0.4020 et 1.0500nm distribuées en 19 bandes (lumière solaire) ; puis à des longueurs d'onde entre 0.501 et 1.018nm distribuées en 15 bandes (lumière artificielle). Le radiomètre de l'OMP permet de garder l'information sous forme d'image. Le produit peut être travaillé avec les mêmes critères et les mêmes méthodologies qu'une image satellite.

Les études spectrales ont été faites à partir de l'image en analysant un polygone à l'intérieur de chaque cuve pour éviter les effets de bord ; chaque polygone a été défini de façon à contenir 30000 pixels. On a produit des images pour un total de 50 échantillons :

- 21 correspondent à des échantillons du sol ; on connaît les différents pourcentages des composants du sol dans 17 d'entre elles ; 5 correspondent au même sol mais avec un changement de diamètre du tamisage ; 3 dont on ne connaît que le pourcentage de MO.
- 5 sont des composts tamisés à 2mm
- 24 sont des mélanges non structurés de différents matériaux constituant des sols ; la Mo ajoutée dans ces mélanges est du compost tamisé à 2mm.

L'analyse des images produites a permis d'évaluer la signature spectrale de différents matériaux et types de sols ; c'est sur la base de ces résultats que l'on a formulé une série d'hypothèses par rapport à la signature spectrale du système de sol. La variabilité des 50 échantillons analysés permet de réaffirmer quelques hypothèses mais aussi de détecter quelques incohérences.

En conclusion, on remarque l'importance de la matière organique dans la signature spectrale des sols, la structure des sols comme élément à considérer, une articulation entre la matière organique et la matière minérale du sol. C'est important de remarquer aussi que la signature spectrale des mélanges des éléments constituants du sol est bien différente à celle produite par un système du sol réel.

Les résultats permettent de proposer de nouvelles hypothèses pour analyser la réponse spectrale des sols *in situ* à partir des images Landsat. Mais il ne faut pas prétendre pouvoir faire une extrapolation des résultats obtenus en laboratoire vers les conditions réels au champ.

### 2.3 Evaluation de l'information Landsat

Pour l'évaluation des signatures spectrales de sols découverts à partir des images Landsat, on a sélectionné 69 points d'échantillons dans 16 parcelles pilotes. La sélection des parcelles pilotes a été faite selon quatre critères :

- 1) La distribution spatiale des parcelles pilotes devaient comprendre la diversité des agro-écosystèmes du bassin, en particulier la diversité des sols reconnus dans la cartographie existante.
- 2) Les diverses gestions des sols développées dans le bassin devaient y être représentées.
- 3) Les parcelles à échantillonner devaient être accessibles.
- 4) Pour le mois de novembre 1998, elles devaient être avec un sol nu.

Pour interpréter l'information de l'image Landsat, on part des principes suivants :

- 1) L'augmentation de la proportion de matière organique du sol diminue la réflectance dans toutes les longueurs d'onde.
- 2) La diminution du spectre est différentielle : chaque fois que la proportion de matière organique est plus grande la pente de la courbe de représentation de la signature spectrale augmente.
- 3) Les différences dans la pente de la courbe des signatures spectrales sont plus remarquables dans le secteur compris entre le rouge et le proche infrarouge.
- 4) L'importance de la MO dans la réflectance et la signature spectrale du sol est liée à la forme et à la position de la courbe plus qu'aux valeurs absolues que l'on enregistre à chaque longueur d'onde.

Avec ces principes et en travaillant avec les 6 bandes de Landsat qui correspondent à la région du spectre du visible et du proche et moyen infrarouge, on construit la combinaison suivante de bandes (Z) pour analyser la conduite en relation avec le contenu de MO des sols.

$$Z = \{(R_5 * R_7) / (R_1 * R_2)\} + (R_4 / R_5)$$

Etant  $R_n$  = réflectance dans la bande n

La valeur de l'indice Z signale une importance spéciale aux différences entre les extrêmes de la signature spectrale. On intègre aussi dans la construction de Z la conduite des courbes entre les bandes 3 et 4, où l'on trouve un accroissement important dans la pente chaque fois qu'augmente le contenu de matière organique. C'est pourquoi la corrélation entre cet indice et le contenu de matière organique du sol doit être négative.

Le modèle de régression linéaire, entre le pourcentage de MO et les valeurs de l'indice Z correspondant à chaque échantillon, s'est construit à partir des données de l'image de 1998. Le modèle est valide avec un intervalle de confiance du 99%. C'est

pourquoi on peut assurer que la variation de la matière organique explique le 41% de la variabilité de l'indice Z.

Le modèle proposé agit d'après les hypothèses établies dans la construction. Cependant, la matière organique des sols est l'un des facteurs entre plusieurs qui conditionne la signature spectrale des sols.

#### **2.4 Position dans le paysage**

Un autre élément important à considérer c'est la position du pixel dans le paysage, c'est à dire la pente du terrain et l'orientation de la pente par rapport à la source d'énergie (la place du soleil). Dans ce sens on a assigné à chaque pixel une valeur qui correspond à la résultante de la pente par son orientation ( $P_o$ ).

$$P_o = P * O$$

P=pente (mesuré en pourcentage)

O=orientation de la pente (tab. 1)

Le critère est de considérer que plus grande est la pente plus petite est la réflectance et cela est plus important selon son orientation. Puisque l'image sur laquelle on travaille est du mois de novembre et l'heure de passage du satellite est 9:00 AM., l'orientation du versant diminue son pixel d'est à ouest. Avec ce critère on a assigné un facteur de correction aux valeurs de la pente d'après l'orientation du pixel au cadran. Les valeurs pour la réalisation de cette correction ont été produites en employant le MNT du bassin construit à partir d'une grille obtenue avec l'image Landsat et les courbes de niveau des cartes topographiques.

D'après les critères de construction de la valeur assignée et d'après la position dans le paysage du pixel ( $P_o$ ), on attend que chaque fois que la valeur de la position du paysage augmente l'indice Z tende à diminuer.

On a construit un modèle de régression linéaire entre les valeurs de l'indice Z et les valeurs du  $P_o$ , valide avec un intervalle de confiance du 99%. Alors il est possible d'affirmer que la position du paysage du pixel explique une préposition de la variabilité de l'indice Z de l'ordre du 21%. La pente insuffisante de l'aire du travail ainsi que la hauteur du soleil pour cette époque de l'année dans le passage du satellite (fin du printemps), on peut expliquer la basse importance de ce facteur dans la réflectance totale de chaque pixel.

#### **2.5 Intégration matière organique-position dans le paysage**

A partir des résultats obtenus, on analyse les apport conjoints pour chaque pixel du contenu de la matière organique du sol et la position qu'il occupe dans le paysage. Comme l'apport de la matière organique est très significatif, on donne plus d'importance à ce facteur qu'à la valeur de la position dans le paysage. C'est ainsi que l'on construit un modèle de corrélation linéaire entre l'indice Z proposé et un indice composé entre la proportion de matière organique du sol intégrée avec la position dans le paysage qu'occupe le pixel ( $W_o$ )

Etant  $W_o$  :

$$W_o = 2 * (\text{pourcentage de matière organique}) + P_o$$

De cette façon  $W_o$  intègre le contenu de la matière organique du sol, la pente et l'orientation du terrain.

Le résultat d'un modèle de corrélation avec un intervalle de confiance du 99% indique qu'il est possible d'affirmer que le contenu de matière organique du sol ajusté par la position du le paysage du pixel explique pratiquement le 55% de la variabilité de l'indice Z.

On présente des exemples de la distribution spatiale des résultats obtenus par les parcelles avec sol nu, pour les années 1998 et 2001. On analyse les exemples qui montrent la distribution spatiale de Z à l'intérieur des parcelles, détachant la potentialité pour différencier la diversité intra-parcellaire. C'est aussi intéressant de discuter les différences que l'on enregistre (spécialement au nord du bassin) entre parcelles voisines, l'histoire de l'utilisation et les technique de conduite du sol inter-parcelles et qui expliquent ces différences. Dans les exemples, on peut remarquer l'intensité de la variabilité de Z dans une même parcelle et sa potentialité pour orienter la conduite des terres.

Il existe une série des facteurs qui affectent la réflectance des sols que l'on peut organiser en trois grandes groupes :

- 1) L'ensemble des éléments liés aux propriétés des sols. La matière organique exerce une influence directe sur la réflectance des sols, mais il existe aussi une influence sur la structure du sol, sur la couleur. Des propriétés qui sont dépendantes entre elles.
- 2) La position du paysage qu'occupe un sol particulier, spécialement la pente du terrain et l'orientation de la pente. Les propriétés du sol et la position dans le paysage sont directement liés au microrelief du sol, qui distribue des ombres et affecte la rétention de l'eau, produisant des changements dans la réflectance.
- 3) La rugosité du sol, la réflectance augmente quand diminue la taille des particules, ce facteur est lié à la texture du sol. Mais fondamentalement, dans les sols de climats tempérés, ce sont les pratiques de cultures qui sont celles qui conditionnent la présence des parcelles avec des sols nus.

L'indice proposé pour l'analyse de la réflectance et des signatures spectrales des sols est lié aux deux premiers groupes des facteurs du sol. Cet indice dans les parcelles à sol nus fournit l'information signifiante en ce qui concerne la distribution spatiale de la matière organique de l'horizon superficiel du sol.

La recherche de la distribution spatiale de la matière organique liée avec la dynamique du paysage constitue un élément important dans la distribution des propriétés des sols. L'influence du régime et la conduite hydrique des sols constitue un élément essentiel pour comprendre ces processus et avancer vers son modèle. Ainsi les

caractéristiques de la végétation et sa variabilité dans la production primaire exerce une influence déterminante dans le système.

La distribution différentielle dans l'espace et dans le temps de la végétation a été l'objet du travail d'intégration entre les images de haute et basse résolution. L'étude des signatures spectrales avec des images Landsat permet une approche avec le suivi spatial de la matière organique du bassin.

Il nous reste deux éléments importants pour nous permettre d'avancer vers la mise en pratique du modèle de suivi des sols dans un bassin hydrographique, la variabilités du régime hydrique et la mobilisation de la matière organique des sols jusqu'aux cours d'eau.

La potentialité que l'on montre dans ce sens c'est qu'on a réussi une première proposition pour modeler la distribution spatiale de la matière organique en parcelles et d'une façon générale aussi dans le bassin.

En ce qui concerne la relation de cet indice Z avec les classes texturales de la matière minérale du sol avec les données disponibles et produits, on n'a pas pu établir aucun niveau de corrélation. Il y a trois éléments intéressants pour définir avec plus de précision la texture du sol et sa réflectance :

- 1) Etablir la relation entre la texture et la structure dans des sols de cultures faiblement mécanisées.
- 2) Les pratiques de cultures conditionnent le niveau de rugosité du sol.
- 3) Dans le cas où le matériel minéral constitue l'élément prépondérant dans la réflectance d'un sol, la signature spectrale issue a une tendance pour changer sa forme, c'est pourquoi cet indice ne fournira pas beaucoup d'information.

## **2.6 Distribution spatiale du ruissellement superficiel**

La méthodologie suivie pour modeler la distribution du ruissellement superficiel du bassin est une modification de la méthodologie proposé par Lefèvre *et al.* (1993). On travaille sur la base des résultats dans la distribution par année des unités sol-végétation et on construit un modèle d'évapotranspiration maximum.

Pour la construction du modèle, on emploie la série temporelle de précipitation et température qui permet de calculer l'évapotranspiration non corrigée. Avec les valeurs et la conduite mensuelle des unités du sol-végétation on produit un facteur de correction pour obtenir l'évapotranspiration non corrigée. Employant l'estimation d'accumulation totale d'eau par unité de sol de la carte 1 /100.000 réalisée par Moffini et Califra (2001), on peut évaluer la capacité d'information et du ruissellement superficiel, par unité de sol-végétation dans la période de travail 1998-2003.

### Méthodologie

- 1) Calcul de l'évapotranspiration potentielle non corrigée pour chaque mois. Pour résoudre le calcul, on applique la formule Thornthwaite y Mather (1955) qui permet

d'avoir pour chaque mois l'évapotranspiration en utilisant la température moyenne mensuelle. On obtient la valeur ETP'm.

- 2) Premier facteur de correction de l'évapotranspiration. On emploie un facteur de correction K, qui prend en compte la latitude, la durée de l'insolation théorique et le nombre de jours de chaque mois (UNESCO 1982). Ce facteur a comme limitation de ne pas considérer l'humidité atmosphérique, les nuages et le vent.
- 3) Deuxième facteur de correction. Il se construit à partir de résultats de l'évaluation du NDVI travaillé au chapitre 7. On considère les six unités sol-végétation ; pour chaque unité, on calcule le NDVI moyen annuel et le NDVI moyen mensuel et à partir de ces valeurs, on a le facteur de correction K1

$$K_1 = \text{NDVI}_{\text{mm1}} / \text{NDVI}_{\text{ma1}}$$

Étant

NDVI<sub>mm1</sub> le NDVI moyen mensuel pour classe 1, et

NDVI<sub>ma1</sub> le NDVI moyen annuel pour la classe 1

- 4) A partir de ces valeurs on construit le facteur de correction (Kc) de la ETPm obtenant ainsi l'évapotranspiration potentielle moyenne mensuelle maximale corrigée ETPM

Etant :  $Kc = K * K_1$

$$ETPM = ETP * Kc$$

Les résultats obtenus permettent d'évaluer le rôle de l'évapotranspiration potentielle de la végétation dans les conditions réelles de productivité primaire pour l'année et pour chaque mois en particulier.

Cette méthode de calcul du facteur de correction lie les potentialités maximales mensuelles d'évapotranspiration avec les conditions réelles de productivité de chaque unité sol-végétation. Les valeurs standardisées sont construites pour des conditions moyennes de végétation, situation qui se passe rarement en conditions réelles. Et puis quand on travaille avec une taille de pixel qui intègre des mélanges des différentes gestions du sol qui sont difficiles à différencier, les standards se différencient de la réalité.

On présente les résultats des calculs réalisés pour chaque année ; ce schéma proposé présente les résultats synthétiques au niveau des unités sol-végétation, mais la construction d'une source de données permet de faire une analyse minutieuse au niveau de la conduite de chacun des pixels de 1 km<sup>2</sup> de résolution. La méthodologie d'organisation de l'information primaire fabriqué dans l'environnement SIG s'est faite en prenant le pixel de basse résolution comme unité basique spatiale, c'est ainsi que ce modèle peut être fabriqué avec ce niveau de résolution.

Cette méthodologie a été appliquée pour toutes les années de 1998 à 2003, produisant une matrice d'information qui contient l'information de l'évapotranspiration

réelle par unité sol-végétation en échelle temporelle mensuelle. Avec ces résultats et en employant les valeurs de réserve d'eau dans le sol et les tables de précipitation mensuelles, on construit un bilan hydrique par unité sol végétation, modèle qui permet sa représentation spatiale.

Les résultants se pressentent par classe selon sa distribution dans les différentes unités du sol, la table finale contient l'information suivante :

**RU** = Réserve utile d'eau dans le sol (information par unité de sol)

**ETP'<sub>m(n)</sub>** = Evapotranspiration potentielle moyenne mensuelle pour le mois n, non corrigée, calculée selon la formule de Thornthwaite.

**ETPM<sub>(n)</sub>** = Evapotranspiration potentielle moyenne mensuelle corrigée pour le mois n

**RR<sub>(n-1)</sub>** = Réserve d'eau dans le sol depuis le mois antérieur

**P<sub>(n)</sub>** = Précipitation totale mensuelle du mois n

**Rd<sub>(n)</sub>** = **P<sub>(n)</sub>** + **RR<sub>(n-1)</sub>** = Quantité totale d'eau dans le mois n

**ETR<sub>(n)</sub>** = Evapotranspiration réelle, on peut différencier deux situations

a) Si  $ETPM_{(n)} < Rd_{(n)}$ , alors  $ETPM_{(n)} = ETR_{(n)}$

b) Si  $ETPM_{(n)} > Rd_{(n)}$ , alors  $ETPM_{(n)} = Rd_{(n)}$

**RR<sub>(n)</sub>** = **Rd<sub>(n)</sub>** - **ETR<sub>(n)</sub>** = Quantité d'eau disponible dans le mois n

**RUR<sub>(n)</sub>** = Réserve utile d'eau dans le sol dans le mois n ; on différencie deux cas :

Si  $RR_{(n)} < RU$ , alors  $RUR_{(n)} = RR_{(n)}$

Si  $RR_{(n)} > RU$ , alors  $RUR_{(n)} = Ru_{(n)}$

**Ec<sub>(n)</sub>** = **P<sub>(n)</sub>** + **RR<sub>(n-1)</sub>** - **ETR<sub>(n)</sub>** - **RUR<sub>(n)</sub>** = eau disponible que potentiellement peut ruisseler, en estimant qu'il n'existe pas une perte par percolation

**Ces<sub>(n)</sub>** = coefficient de ruissellement

D'après la série des données de précipitation disponible 1981-2003, la précipitation moyenne annuelle est de 1244 mm. Dans la période du travail, l'année 1999 se place en dessous de cette valeur moyenne (82%), le reste des années présentent des valeurs de précipitation supérieures, principalement 2002 (169%).

C'est dans l'année de moindre précipitation que la végétation et la capacité pour stocker l'eau dans le sol présentent la plus grande importance et alors on présente les plus grandes différences entre les niveaux minimum et maximum du coefficient de ruissellement : 39% plus haute dans l'unité agricole du pâturage estivale sur les sols de l'unité Bellaco que dans l'unité forestière sur les sols de l'unité "Tres Bocas".

Pour les autres années, avec des précipitations abondantes, les différences sont plus basses. Pour toutes les autres années, la classe forestière est celle qui présente les plus bas coefficients de ruissellement et les classes, où il y a prépondérance de l'activité agricole, les plus hauts coefficients.

Dans les cas où on présente seulement l'unité sol-végétation pour toutes les unités du sol, le coefficient de ruissellement présente les mêmes valeurs.

## 2.7 Analyse du contenu de MO dans 8 échantillons d'eau

Pour compléter l'interprétation du fonctionnement du bassin et avancer vers la compréhension de la dynamique de la matière organique, on considère qu'il est nécessaire de décrire la dynamique de la matière organique dans les eaux. On considère comme paramètre principal pour faire cette description le carbone organique total qui est présent dans les eaux.

La détermination de la teneur de la matière organique présente dans les eaux du bassin du ruisseau Sanchez" s'est faite avec la collaboration du laboratoire de chimie de l'Eau et de l'Environnement UMR CNRS 6008 - École Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers-Université de Poitiers

Localisation et caractérisations des points d'échantillonnage :

**Point 1-** Le cours d'eau reçoit les eaux de la zone du bassin où se réalisent les activités agricoles avec la plus grande intensité.

**Point 2-** Le point se localise dans un petit cours d'eau qui draine deux petits micro bassins à usage forestier (2700 hectares).

**Point 3-** Il se situe sur le même cours d'eau que le point 1, à une distance de 9 km en aval. A la surface qui draine vers le point 1, on ajoute 5800 hectares desquelles presque 2400 sont pour l'usage forestier.

**Point 4-** Il se situe à l'ouest du bassin ; c'est un cours d'eau qui draine une surface de 5200 hectares desquelles 2200 sont forestières ; le reste étant des cultures agricoles principalement estivales couplées à de l'élevage extensif .

**Point 5-** Il draine une surface de 11500 hectares dédiées principalement à la culture hivernale et estivale intégrée avec du bétail et c'est dans cette zone que l'on trouve la plus part des laiteries qui se développent dans le bassin. Il est important de remarquer qu'en amont du point 5, le cours d'eau passe par une zone forestière de 600 hectares.

**Point 6-** A ce point s'unissent les eaux arrivant des points 4 et 5, plus celles qui arrivent d'une aire forestière vers l'ouest et une aire du pâturage vers l'est.

**Point 7-** Il se trouve en aval des points 1, 2 et 3 et il reçoit les eaux du cours d'eau Sanchez Chico venant de la zone nord-ouest du bassin. Des points 2 et 3, il reçoit uniquement les eaux des champs des prairies naturelles dédiées à l'élevage extensif.

**Point 8-** il se situe juste avant l'embouchure du ruisseau Sanchez avec le Rio Negro, avant l'entrée dans la zone de forêt galerie dense et humide que l'on retrouve bordant les cours d'eau uruguayens.

Analyses des échantillons d'eau :

Les points 4, 5 et 2 sont ceux qui ont les plus grandes valeurs de Cot et sont en plus associés aux zones forestières. Il est intéressant de noter l'enrichissement en Cot

entre les points 1 et 3 (de 7,5 à 10,01 mg/L) situés sur le même cours d'eau mais qui draine une surface importante (2400 hectares) sous un usage forestier. De même, on note la baisse des valeurs de Cot observées des points 2 et 3 à celle du point 7 qui se trouve à moins de 3 km en aval ; ceci est dû à un effet dilution, car il ne reçoit que des eaux des surfaces en prairies naturelles. Le deuxième élément intéressant c'est que les points 4, 2 et 5 reçoivent les eaux des zones où le coefficient de ruissellement est bas, ainsi la disponibilité de l'eau est inférieure.

Ces premières analyses nous permettent de faire quelques commentaires généraux :

- Les sols sablonneux sous gestion forestière favorisent le transport de la matière organique vers les cours d'eau.
- L'abaissement du ruissellement de l'eau des surfaces forestières vers les cours d'eaux produit une plus grande concentration du Cot dans les cours d'eau.
- Les surfaces agricoles ou de pâturage traditionnels ont atteint un niveau d'équilibre qui conduit à stabiliser les pertes du carbone vers les cours d'eau, tandis que les nouvelles cultures forestières produisent un changement dans ces niveaux de stabilité en produisant la mobilisation d'une importante quantité de matière organique.
- Les nouvelles conditions environnementales produites par les cultures forestières aident la dissolution de la matière organique du sol en permettant sa lixiviation vers les cours d'eaux.

### III. CONCLUSIONS

L'objectif de ce travail fut l'exploration méthodologique de l'intégration des techniques de production et de recherche d'informations en environnement SIG pour étudier la dynamique de la distribution de la matière organique de l'horizon superficiel du sol dans le bassin du ruisseau Sánchez.

L'approche méthodologique développée intégrant l'analyse multirésolution et multitemporelle a permis le développement de la cartographie thématique à différentes échelles. L'intégration du développement temporel des unités sol-végétation avec le modèle de la distribution de la matière organique au niveau des parcelles avec un sol constitue l'information nécessaire pour la démarche de gestion du territoire.

Les résultats obtenus avec le travail sont le produit d'un effort constant entre un certain niveau de détail dans la conduite de l'information, sa généralisation et son extrapolation des résultats. Ainsi les résultats peuvent-être groupés en trois lignes principales :

- i) La première concerne l'intégration des images de basse et haute résolution pour définir et suivre dans l'espace et dans le temps les unités sol-végétation.

Pour accomplir cet objectif, il a été nécessaire de résoudre les problèmes d'interprétation et de conduite technique de grandes volumes d'information. La

méthodologie développée a permis une première approche de la conduite et de l'évolution des unités sol-végétation dans le temps et dans l'espace.

- ii) La deuxième ligne de travail fut de trouver la conduite spectrale des sols à partir de l'information Landsat. Pour résoudre ces problèmes, on a travaillé en détails en analysant la réponse spectrale des matériaux constituant le sol et des échantillons de sol connue en générant des prétendus conceptuels qui nous permettent d'interpréter la réflectance enregistrée dans les images. A partir de ces éléments, on propose un modèle d'interprétation de la réflectance du sol nu associé au contenu de matière organique du sol selon sa position dans le paysage. Le modèle présente une haute potentialité pour la gestion parcellaire de la ressource du sol, spécialement associé aux nouvelles techniques de semis de précision qui ont en général une limitation d'information de base sur le potentiel productif des sols.
- iii) La troisième ligne de travail s'est occupée d'explorer la dynamique de l'eau dans le bassin, avec notamment l'élaboration de la cartographie avec la distribution spatiale du coefficient de ruissellement des précipitations. Pour résoudre ce problème, on fabrique un modèle sur la base de l'information produite dans la première ligne de travail et son extrapolation au fonctionnement des unités sol-vegetation, comme élément principale qui conditionne l'évapotranspiration – ruissellement par unité de surface, en arrivant à développer un modèle cartographique de  $1\text{km}^2$  de résolution spatiale avec la distribution spatiale des coefficients de ruissellement. Et enfin, on a pris huit échantillons d'eau de différentes parties du bassin pour disposer de l'information primaire sur la présence du carbone totale et carbone dissout dans l'eau.

Le travail nous a permis d'avancer dans les techniques de gestion, organisation des méthodologies particulières pour la résolution des défis proposés. Les réussites du travail permettent d'avancer dans la compréhension du fonctionnement d'un système complexe comme l'est un bassin hydrographique dans une zone de climat tempéré humide. C'est une connaissance nécessaire pour avancer vers une gestion durable, spécialement face au nouveau défi de gestion des ressources naturelles dans un scénario de changement climatique possible mais indéterminé.

## **PERSPECTIVES**

La génération de l'information pour comprendre le fonctionnement d'un système de bassin hydrographique a été la constante du travail, les résultats indiquent la potentialité des lignes méthodologiques développées. Comme cela arrive fréquemment, quand on cherche à approfondir la connaissance d'un système naturel, on constate que les niveaux d'incertitudes augmentent. Dans ce sens, ce travail a produit une série de perspectives, des défis et des questions sur le futur:

La potentialité d'extrapolation de la méthodologie a été l'objectif pour identifier, délimiter et suivre les unités sol-végétation dans d'autres territoires. Ainsi l'organisation de l'information des images de basse résolution dans ce travail a été faite avec cette idée

en ayant aujourd'hui une base d'images SPOT-VGT, intégrées dans le SIG et une matrice de données construite pour tout le territoire de l'Uruguay.

Notre but est de continuer à intégrer les variabilités environnementales pour améliorer l'interprétation des signatures spectrales du sol, et plus précisément avancer avec les facteurs identifiés : humidité du sol, techniques de conduite du sol, ...

C'est aussi approfondir la méthodologie d'évaluation de l'évapotranspiration / ruissellement superficiel et subsuperficiel avec des données aux champs. Il faut approfondir dans ce sens en déterminant un programme qui intègre plusieurs bassins nous permettant de contraster les résultats théoriques obtenus avec les données aux champs.

Le défi le plus grand est l'utilisation de l'information générée et les propositions méthodologiques pour la gestion durable du territoire, qui tend à augmenter les niveaux de production en réduisant les processus de dégradation du système environnemental. Dans ce sens la méthodologie de travail proposée pour générer de l'information constitue la base d'un plan de gestion au niveau du bassin hydrographique.

Il est aussi nécessaire d'explorer des applications pratiques, en intégrant ces méthodologies pour générer l'information nécessaire au niveau de la parcelle avec les nouvelles techniques agricoles, et plus précisément le semis direct.

## ÍNDICE

Índice de figuras

Índice de tablas

### Agradecimientos

<b>Introducción general</b>	<b>1</b>
<b>PRIMERA PARTE: PROBLEMÁTICA GENERAL. CUENCA DEL ARROYO SANCHEZ</b>	
Introducción	8
<b>A – CONTEXTO SOCIO ECONOMICO Y SELECCIÓN DEL ÁREA PILOTO</b>	<b>10</b>
<b>1) Análisis agroeconómico de la República Oriental del Uruguay</b>	<b>10</b>
i) Aspectos generales	10
ii) Uruguay país pecuario exportador	10
iii) Los procesos de degradación de tierras en el Uruguay	13
<b>2) El litoral oeste del Uruguay</b>	<b>14</b>
i) Un espacio de productores mixtos	14
ii) Análisis socioeconómico	15
<b>3) Selección del área piloto</b>	<b>16</b>
i) Criterios de selección de la cuenca del Arroyo Sánchez	16
ii) Datos generales	17
iii) Uso del suelo	17
<b>B – DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA DEL ARROYO SÁNCHEZ</b>	<b>20</b>
<b>1) Aspectos generales</b>	<b>20</b>
<b>2) Suelos y paisajes</b>	<b>23</b>
i) Unidades de suelo, carta 1:1.000.000, MAP - 1979	23
ii) Unidades de suelos CONEAT	26
iii) Síntesis de suelos y paisajes en la cuenca	28
<b>CONCLUSIÓN</b>	<b>28</b>
<b>SEGUNDA PARTE: EVALUACION DE LAS UNIDADES SUELO- VEGETACION EN LA CUENCA DEL ARROYO SANCHEZ</b>	
Introducción	30
<b>A) MATERIALES y MÉTODOS</b>	<b>33</b>
<b>1) Elaboración de una tipología de unidades suelo vegetación</b>	<b>35</b>
<b>2) Elaboración del SIG</b>	<b>37</b>
i) Problemática	37
ii) Base informática	38
iii) Información contenida en el SIG	38
iv) Referencial geográfico del SIG	39
<b>3) Teledetección</b>	<b>41</b>
i) Problemática	41
ii) Imágenes satelitales	42
iii) Metodología	46
<b>B) RESULTADOS DE LA CARTOGRAFÍA</b>	<b>57</b>
i) Interpretación de la clasificación IAR	57
ii) Interpretación de la clasificación IBR	58
iii) Correspondencias entre IBR e IAR	66
iv) Discusión de los resultados	67
<b>C) ANALISIS DIACRÓNICO</b>	<b>69</b>
i) Comportamiento temporal del NDVI de las USV	69
ii) Discusión del análisis diacrónico en el periodo 1998 - 2003	76
<b>CONCLUSIÓN</b>	<b>78</b>

**TERCERA PARTE: VARIACION ESPACIAL DE LOS SUELOS EN LA CUENCA DEL  
ARROYO SANCHEZ**

Introducción	79
<b>A) COMPORTAMIENTO ESPECTRAL DEL SUELO</b>	<b>82</b>
i) Introducción	82
ii) Materiales y métodos	84
iii) Resultados obtenidos	91
iv) Discusión de los resultados	99
<b>B) EVALUACIÓN DE LA REFLECTANCIA DE SUELOS DESCUBIERTOS UTILIZANDO IMÁGENES LANDSAT</b>	<b>102</b>
i) Introducción	102
ii) Materiales y métodos	104
iii) Evaluación del comportamiento espectral de las muestras seleccionadas	106
iv) Evaluación de la relación entre el comportamiento espectral y la posición en el paisaje	109
v) Relación entre el comportamiento espectral y el contenido de MO integrado a la posición en el paisaje	111
<b>CONCLUSIÓN</b>	<b>114</b>

**CUARTA PARTE: FUNCIONAMIENTO DE LA CUENCA DEL ARROYO SANCHEZ**

Introducción	116
<b>A) EVALUACIÓN DEL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL</b>	<b>117</b>
i) Introducción	117
ii) Materiales y métodos	118
iii) Resultados obtenidos	121
iv) Discusión de los resultados	128
<b>B) LA MATERIA ORGÁNICA EN EL AGUA</b>	<b>131</b>
i) Introducción	131
ii) Materiales y métodos	131
iii) Resultados obtenidos	135
iv) Discusión de los resultados	136
<b>CONCLUSIÓN</b>	<b>137</b>
<b>CONCLUSION GENERAL</b>	<b>138</b>
<b>PERSPECTIVAS</b>	<b>144</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>145</b>
<b>Anexos</b>	

## Índice de Figuras

Figura 1: Localización de la Cuenca del Arroyo Sánchez en la República Oriental del Uruguay	21
Figura 2: Precipitación media mensual	22
Figura 3: Temperatura media mensual	22
Figura 4: Esquema de Balance Hídrico	22
Figura 5: Carta de Suelos 1:1.000.000. Cuenca del Arroyo Sánchez	25
Figura 6: Carta de Suelos CONEAT. Cuenca del Arroyo Sánchez	27
Figura 7: Esquema general para la evaluación de las unidades suelo - vegetación	34
Figura 8: Coberturas Base en la Cuenca	40
Figura 9: MNT Cuenca del Arroyo Sánchez	41
Figura 10: Esquema de trabajo con imágenes Landsat	47
Figura 11: Clasificación de las imágenes Landsat Cuenca del Arroyo Sánchez	51
Figura 12: Esquema del procesamiento de las imágenes NDVI	53
Figura 13: Secuencia lógica de interpretación del ACP	56
Figura 14: ACP- Distribución de las variables por año	59
Figura 15: ACP- Distribución de las unidades espaciales (1998-1999)	61
Figura 16: ACP - Distribución de las unidades espaciales (2000- 2001)	61
Figura 17: ACP - Distribución de las unidades espaciales (2002- 2003)	61
Figura 18: Representación espacial del ACP por año	62
Figura 19: Gráficas de correspondencias interanuales	63
Figura 20: Evolución de la precipitación media mensual (4/1998 a 12/2003)	69
Figura 21: Unidad forestal evolución del NDVI 1998-2003	70
Figura 22: Unidad pastoril agrícola invernal evolución del NDVI 1998-2003	71
Figura 23: Unidad pastoril agrícola estival evolución del NDVI 1998-2003	72
Figura 24: Unidad agrícola pastoril estival evolución del NDVI 1998-2003	73
Figura 25: Unidad agrícola pastoril invernal evolución del NDVI 1998-2003	74
Figura 26: Unidad agrícola evolución del NDVI 1998-2003	75
Figura 27: Imagen resultado del captor del OMP. Bandeja 1 (banda= 1,018 nm)	85
Figura 28: Esquema de trabajo en los laboratorios del OMP	86
Figura 29: Distribución espacial de las parcelas de muestreo	87
Figura 30: Esquema de trabajo para el tratamiento de las imágenes del OMP	88
Figura 31: Selección del área de muestreo en una imagen generada por el OMP	91
Figura 32: Firmas espectrales variación de MO	93
Figura 33: Firmas espectrales variación de MM	95
Figura 34: Firmas espectrales 12 muestras de suelos	97
Figura 35: Firmas espectrales 4 muestras de suelos	98
Figura 36: Esquema metodológico	105
Figura 37: Modelo de regresión entre el % de MO y el índice Z	108
Figura 38: Modelo de regresión entre la posición en el paisaje y el índice z	110
Figura 39: Modelo de regresión entre los índices $W_0$ y Z	111
Figura 40: Distribución espacial del Índice Z en parcelas con suelo descubierto 21/11/1998	112
Figura 41: Distribución espacial del Índice Z en parcelas con suelo descubierto 11/04/2001	113
Figura 42: Distribución espacial del Coeficiente de escurrimiento. 2003. Cursos jerarquizados según Strahler	130
Figura 43: Distribución espacial de los puntos de muestreo de agua (2/11/2004)	132
Figura 44: Ubicación de los puntos de muestreo de agua. Imagen Landsat 21/09/2002	134
Figura 45: Correlación entre el COT y el Ces. del área de drenaje por punto de muestreo	135
Figura 46: Correlación entre el COT y USV – RU del área de drenaje	136

## Índice de Tablas

Tabla 1: Tamaño de los establecimientos	17
Tabla 2: Tenencia de la tierra	17
Tabla 3: Uso del suelo	18
Tabla 4: Rodeo Vacuno	18
Tabla 5: Rodeo Ovino	18
Tabla 6: Cultivos cerealeros, industriales, forrajes y praderas artificiales	19
Tabla 7: Unidades de suelos en la cuenca del Arroyo Sánchez	24
Tabla 8: Características de las unidades de suelos en la cuenca del A° Sánchez	24
Tabla 2: Unidades CONEAT	26
Tabla 10: Integración espacial de las cartas de suelos (1:1.000.000 y CONEAT)	28
Tabla 11: Coberturas de base del SIG	39
Tabla 12: Longitud de onda de las bandas Landsat en micrones	43
Tabla 13: Valores utilizados para convertir los DN a radiancia y reflectancia para el Sensor TM del satélite Landsat 5 y para el Sensor ETM + del satélite Landsat 7	44
Tabla 14: Escenas Landsat	44
Tabla 15: Longitud de onda de las bandas SPOT-VGT en micrones	45
Tabla 16: Matriz de confusión, clasificación de la escena 21/11/1998	49
Tabla 17: Matriz de confusión, clasificación de la escena 20/12/2000	49
Tabla 18: Matriz de confusión, clasificación de la escena 11/4/2001	49
Tabla 19: Matriz de confusión, clasificación de la escena 30/6/2001	49
Tabla 20: Matriz de confusión, clasificación de la escena 21/9/2002	50
Tabla 21: Resultado global de las clasificaciones Landsat	50
Tabla 22: Resultados de los ACP realizados, pertinencia de su aplicación y porcentaje de la varianza explicada por cada uno de los dos primeros componentes	54
Tabla 23: Pertinencia de utilización del ACP según valores de KMO	55
Tabla 24: Resultados de las clasificaciones de las escenas Landsat	58
Tabla 25: Coeficientes de puntuaciones 1° CP	60
Tabla 26: Coeficientes de puntuaciones 2° CP	60
Tabla 27: Criterios de asignación de pixel según los resultados del ACP	61
Tabla 28: Número de píxeles asignados a cada clase según año	63
Tabla 29: Matriz de confusión clasificación IBR respecto a IAR	67
Tabla 30: Resultado de la síntesis geométrica entre las clasificaciones IAR e IBR	68
Tabla 31: Fechas de las mediciones y bandas utilizadas	86
Tabla 32: Coeficientes de correlación por muestra	90
Tabla 33: Variación de los materiales constituyentes en 11 muestras	92
Tabla 34: Valores de reflectancia media por muestra y por longitud de onda	92
Tabla 35: Variación de los materiales constituyentes en 6 muestras	94
Tabla 36: Valores de reflectancia media por muestra y por longitud de onda	94
Tabla 37: Variación de los materiales constituyentes en 12 muestras de suelos	96
Tabla 38: Valores de reflectancia media por muestra y por longitud de onda	96
Tabla 39: Correlaciones %MO - %Reflectancia según longitud de onda	96
Tabla 40: Tamaño de tamizado	98
Tabla 41: Valores de reflectancia media por muestra y por longitud de onda	98
Tabla 42: Síntesis descriptiva de las parcelas piloto	105
Tabla 43: Porcentaje de materia orgánica según muestra	106
Tabla 44: Asignación de valor a la orientación de la pendiente	109
Tabla 45: Capacidad de almacenaje de agua por unidad de suelo	118
Tabla 46: Distribución mensual de la variabilidad de la evapotranspiración real	121
Tabla 47: Distribución mensual del balance hídrico para la clase pastoril agrícola estival, según unidad de suelo. 1999	123
Tabla 48: Balance hídrico anual en la clase pastoril agrícola estival. 1999	124
Tabla 49: Balance hídrico resumen en la Cuenca del Arroyo Sánchez. Año 1998	125
Tabla 50: Balance hídrico resumen en la Cuenca del Arroyo Sánchez. Año 1999	125
Tabla 51: Balance hídrico resumen en la Cuenca del Arroyo Sánchez. Año 2000	126
Tabla 52: Balance hídrico resumen en la Cuenca del Arroyo Sánchez. Año 2001	127
Tabla 53: Balance hídrico resumen en la Cuenca del Arroyo Sánchez. Año 2002	127
Tabla 54: Balance hídrico resumen en la Cuenca del Arroyo Sánchez. Año 2003	128
Tabla 55: Diferencias entre los valores extremos del coeficiente de escurrimiento	129
Tabla 56: Distribución de las características de las microcuencas por punto de muestreo	135
Tabla 57: Síntesis de las características de las microcuencas por punto de muestreo	136

## AGRADECIMIENTOS

- A Michel Kaemmerer por su más amplio apoyo en todos los aspectos de este trabajo, compartiendo y aportando soluciones desde antes del comienzo. Por su confianza en estos años y fundamentalmente por su amistad.
- A Marie José Lefevre por su entusiasmo con la temática de la investigación, sus invalorable aportes, y por compartir generosamente sus experiencias en investigación.
- A Daniel Panario por su amistad y apoyo incondicional en todos estos años, desde que ingresé a la licenciatura de Geografía, orientando mi formación. Especialmente por su permanente disposición a discutir y criticar resultados y sus pacientes lecturas de los manuscritos.
- A Jean-Claude Revel, mi gratitud en cada una de las estadias en el ENSAT, así como extendiendo mi agradecimiento a todo el equipo del laboratorio d' Agro-Environnement – Ecotoxicologie y en general del ENSAT-INP.
- A Taoufiq Bennouna por los importantes aportes que orientaron la estructura y resultados de este trabajo.
- A Jean-Philippe Croué por su generosidad, al disponer honorariamente de su tiempo, viajando especialmente a Uruguay para colaborar con mi tesis y trabajar a tiempo completo durante su estadía.
- Al equipo d'Observatoire Midi-Pyrénées, por su dedicación desinteresada en la generación de las imágenes de las muestras.
- Al equipo del INRA Toulouse por los análisis de la materia orgánica de las muestras de suelo.
- A los estudiantes que en estos años han integrado sus esfuerzos en el marco de este trabajo y que realizando su estadía de investigación obtuvieron resultados que me han hecho sentir orgulloso. Por el valor de su dedicación el agradecimiento a: Virginie Puech, Flavien Anno, Severine Mehier y Sebastien Garces. Especialmente a Eva Bouille y Laurie Boithias, que realizaron su estadía en Uruguay.
- A las autoridades del Programa de Desarrollo Tecnológico por la beca otorgada que me permitió resolver los problemas logísticos de la investigación y especialmente al equipo administrativo por su continua colaboración.
- A las autoridades y compañeros de la Facultad de Ciencias, por su apoyo permanente durante estos años, sin el cual hubiera sido imposible la realización de este trabajo.
- A los compañeros de trabajo del LDSGAT: Ricardo, Fernando, Gabriela y Víctor por su apoyo incondicional y facilitar mi dedicación.
- Muy especialmente a Anita, compañera de trabajo y de la vida..... por todo.

## INTRODUCCIÓN GENERAL

El análisis de la distribución espacial de los suelos, de algunos de sus factores constituyentes o propiedades, es un medio para potencializar la planificación de actividades antrópicas. La rápida degradación de las tierras como consecuencia de su utilización agropecuaria, despertó en las últimas décadas la preocupación creciente de la pérdida de calidad de los suelos y la necesidad de instrumentar sistemas de producción sustentables (Mielniczuk, 1999). El conocimiento preciso de la distribución espacial de la materia orgánica del suelo permite generar información necesaria sobre atributos del suelo y del ambiente. Información que posibilita la elaboración de cambios en los sistemas de manejo utilizados por los productores agropecuarios, para evitar la degradación del sistema (Druck Fuks, 1998; Mielniczuk, 1999).

La variabilidad de los suelos en el paisaje es el problema crítico de la modelización de la superficie terrestre a escala local y regional. La distribución de los suelos constituye en cierta forma un área de influencia determinada por los procesos de superficie y la distribución del sustrato geológico, conformando una continuidad espacial que está determinada por las condiciones ambientales (Palacios-Orueta *et al.*, 1999). La variabilidad espacial y temporal de estos procesos, genera propiedades del suelo muy variables y difíciles de medir y monitorear cuando se trabaja con grandes escalas.

La calidad del suelo puede ser definida por su capacidad para mantener la productividad biológica, por tanto, asociada a la calidad ambiental del ecosistema. Este concepto debe ser ampliado con la preservación ambiental del sistema. Entonces la calidad del suelo debe ser definida en torno a la capacidad del sistema para mantener la productividad biológica, y mantener al suelo libre de agentes biológicos, químicos o físicos perjudiciales al funcionamiento del ecosistema (Achkar, 2002). Además, la calidad del suelo en cuanto que concepto debe ser integrada en la categoría de sociedad sustentable (Mielniczuk, 1999).

En estado "sin alteración" antrópica, el suelo se comporta como un sistema abierto que intercambia materia y energía con el ambiente, un estado de intercambio que puede ser catalogado de sistema en continua alteración. Con relación a la materia orgánica del suelo, estos intercambios se procesan por la adición de carbono debido a la

descomposición de los residuos vegetales que llegan al suelo, por supuesto que la cantidad de carbono adicionada al sistema dependerá del funcionamiento del ecosistema global del cual el suelo es un elemento constituyente. Las pérdidas de carbono del suelo se producen por: descomposición de la materia orgánica fresca, liberación de carbono a la atmósfera, por lixiviación y/o por erosión de suelos. La magnitud de estos procesos depende de una serie de factores internos del sistema, pero también de una serie de procesos externos: el clima, la posición topográfica, y por supuesto las condiciones de manejo del suelo. Tradicionalmente, la intervención antrópica conduce al sistema suelo a distintos niveles de alteración, que en conjunto tienden a causar mas perdidas que ganancias de carbono, generando o desencadenando procesos de alteración del funcionamiento global del sistema.

El contenido de materia orgánica como indicador clave que refleje en sentido amplio la calidad del suelo se basa en que el porcentaje de materia orgánica es un elemento muy sensible con relación a la practicas de manejo (Mielniczuk, 1999). En segundo lugar la mayoría de los atributos del suelo en tanto que sistema, están directamente vinculados con la materia orgánica, así es importante destacar la formación de agregados y, por tanto la estructura, la regulación del régimen hídrico, térmico y de aireación. Se debe vincular entonces el contenido de materia orgánica con las propiedades de: infiltración, escurrimiento superficial, retención de agua en el sistema, resistencia a la erosión, actividad biológica, capacidad de intercambio catiónico, disponibilidad de nutrientes para las plantas, lixiviación de elementos, liberación de anhídrido carbónico y otros gases hacia la atmósfera, etc.

El contenido de materia orgánica de los suelos es una propiedad directamente vinculada a la calidad del suelo y del paisaje. Puede ser considerado como un indicador en los procesos de degradación de tierras. Pero también como un factor regulador de los procesos de disponibilidad de nutrientes, capacidad de retención de agua, permeabilidad, aireación, estructura y como elemento regulador de la compactación mecánica; constituye así un componente fundamental de la capacidad productiva del suelo (Bayer y Mielniczuk, 1999; Arvidsson, 1998).

La estabilidad de la estructura del suelo, en especial de los macroagregados, presenta correlación directa con el contenido de materia orgánica y son fuertemente dependientes

de las condiciones climáticas, pero también de la historia de uso de la tierra, que puede constituir el factor principal en los cambios de la estructura del suelo (Boix-Fayos et. al., 2001). Cowel y Clift (2000) evalúan los impactos globales de la producción agrícola en la tierra, en especial las variaciones en el contenido de materia orgánica y la compactación del suelo a través de un método de valoración que integra los cambios por erosión o acumulación de tierras.

En suelos con cobertura vegetal natural, las variaciones o alteraciones en la cantidad total de materia orgánica se mantienen en cierta faja de variación que induce a pensar en una situación de equilibrio, en torno al valor medio de esta faja de variación.

El contenido de materia orgánica en los suelos con uso agropecuario es relativamente inconstante y reacciona muy rápidamente a los cambios externos. La producción de residuos orgánicos y la descomposición de la materia orgánica fresca muestra una variabilidad espacial y temporal muy alta en el paisaje, presentando correlación fuerte con la topografía del terreno. En los suelos agrícolas los procesos de erosión hídrica y por las técnicas de cultivo condicionan la variabilidad espacial del contenido de materia orgánica en los suelos, según la posición en la ladera. Desde la investigación agronómica es un factor importante en la variación de rendimientos en los cultivos (Krauchenco y Bullocka, 2000). Los ingresos de carbono orgánico en los horizontes superficiales del suelo son afectados por la productividad de la biomasa, temperatura y precipitación (Alvarez y Lavado, 1997). La distribución espacial diferencial de estos factores en el paisaje, condicionan y son condicionados (fertilidad, temperatura y humedad del suelo) a la distribución de la materia orgánica.

El uso agrícola de los suelos produce distintos niveles de alteración en la variación en el contenido total de materia orgánica del suelo, observando en general una disminución o reducción acelerada en dicho contenido. La tasa de disminución del contenido total de materia orgánica dependerá del uso y estilo agropecuario de producción en cada sitio en particular, pero estableciendo un proceso más o menos acelerado de degradación de las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo (Kaemmerer, 1979). La lenta instrumentación de sistemas de medición y monitoreo a escalas regionales y superiores constituye una importante limitante en la interpretación espacial de la génesis de suelo y en la evolución de la cartografía de suelos (Legros, 1996).

La distribución de la materia orgánica del suelo es uno de los factores más importantes del potencial de producción de los suelos (en el sentido amplio del término), y uno de los factores que presenta mayor variación (espacial y temporal) dependiendo del uso histórico del territorio.

La red hidrográfica del Uruguay se caracteriza por el color oscuro de sus aguas, hecho que está en el origen de muchos nombres de los cursos de agua superficiales (Río Negro, Arroyo Negro, nombres que se repiten en la región). La hipótesis de que el color del agua sea consecuencia de la movilización de parte de la MO del suelo hacia las vías de drenaje ha sido el comienzo de los trabajos de esta tesis. Para avanzar hacia la verificación de esta hipótesis es necesario modelizar la variabilidad espacial y temporal de la MO. Para lograr esta modelización en primer lugar es necesario cartografiar los suelos de forma relativamente detallada.

Pero la cartografía de suelos no es una actividad simple ni una construcción mecánica de transposición de la información de terreno a la carta, tiene sus fundamentos en el conocimiento teórico del objeto, sus ciclos y génesis (Gaddas, 2001). En los paisajes, los distintos procesos que condicionan y determinan la variabilidad de los suelos ocurren a diferentes escalas, por lo que es necesario trabajar a distintas escalas de resolución (con suficiente amplitud y nivel de detalle) para poder monitorear su distribución y generalizar los resultados. Ciertas características de los suelos pueden ser usadas como indicadores, en diferentes escalas temporales y espaciales, para definir la estabilidad de los paisajes (Palacios-Orueta *et al.*, 1999). Siendo posible así obtener la información necesaria que permita evaluar los comportamientos de distribución inter e intra parcelario.

En la práctica, la cartografía tradicional de suelos se sustenta en campañas de terreno sistemáticas y análisis complementarios de laboratorio, se trata de una actividad de larga duración y altos costos (Bardinet *et al.*, 1984). Los estudios tradicionales que permiten producir la información para el análisis de los suelos a gran escala (1:100.000 a 1:50.000 a nivel de paisaje y 1:20.000 a 1:10.000 a nivel de parcela) resultan muy extensos en el tiempo, con muchas dificultades y muy costosos. Además, el estudio de la distribución de los suelos de acuerdo a las técnicas tradicionales (aún trabajando a

mediana y gran escala) implica siempre un muestreo discreto y algún nivel de extrapolación de los resultados al resto de la unidad de paisaje.

La utilización de la teledetección se impone como método para discriminar a diferentes escalas espaciales la distribución de suelos en las unidades de paisaje. Estas técnicas que describen las observaciones de un objeto efectuadas sin mediar contacto físico con él (Pinilla, 1995) aportan mucha información para la resolución del problema de la distribución de los suelos en una unidad de paisaje. La teledetección puede ser definida como el conjunto de técnicas y conocimientos utilizados para determinar las características físicas y biológicas de los objetos por medidas efectuadas a distancia (Girard, 1985). En los últimos años la teledetección ha presentado importantes avances y progresos. Desde la década de 1960 varios sensores multispectrales han sido utilizados para la discriminación de diferentes aspectos vinculados a los suelos. Permitiendo cartografiar en forma continua (limitado por la resolución espacial de la imagen satelital) las variaciones de algunas características del sistema: contenido de humedad del suelo, cobertura de vegetación y contenido de materia orgánica en el horizonte superficial de los suelos a diferentes escalas.

Analíticamente se dispone de la información necesaria que permite asegurar que los factores y propiedades de los suelos se distribuyen en forma continua, al menos al interior de una unidad de paisaje (King, 1984). La cartografía tradicional de suelos se construye a partir de la reducción de la variabilidad espacial, sobre la base de la búsqueda de elementos que permiten el tratamiento de la variabilidad en forma discreta. La síntesis de estos trabajos constituye una carta de suelos; es decir un modelo sintético y explicativo de la distribución espacial de los suelos. Pero el análisis estático de la cartografía tradicional de suelos no es suficiente para comprender la eventual migración de una parte de la MO hacia las vías de drenaje. Por lo tanto, en segundo lugar es necesario estudiar la evolución temporal del complejo suelo - vegetación - uso del suelo.

Desde 1969, distintos autores han propuesto combinaciones de bandas espectrales desde radiómetros de terreno para estudiar la cobertura vegetal (Joran, 1969; Tucker et al. 1976). A partir del lanzamiento del satélite Landsat (1972) la combinación de bandas espectrales ha sido ampliamente utilizada, destacándose un índice: NDVI (Normalized Digital Vegetation Index), que permite evaluar en forma significativa la biomasa vegetal

verde, corrigiendo las variaciones debidas a los efectos direccionales del relieve y la atmósfera (Rouse et al. 1972). El análisis de componentes principales en series diacronicas de NDVI coloca en evidencia las relaciones estrechas existentes entre el suelo y la vegetación en la interface biosfera, litosfera y atmósfera (Lefèvre-Fonollosa, 1983). La teledetección diacronica es el único medio que permite estudiar la evolución espacio temporal de la MO a diversas escalas.

Para validar la hipótesis de la migración de MO hacia las vías de drenaje es necesario estudiar el funcionamiento hídrico de las unidades de paisaje. Por ello se propone trabajar en una unidad espacial, una cuenca hidrográfica representativa de la región litoral oeste del Uruguay, la cuenca del Arroyo Sánchez. Modelando el funcionamiento hídrico de la cuenca utilizando un Sistema de Información Geográfica (SIG) que aportara los elementos de descripción y de organización de la cuenca y las técnicas de teledetección utilizadas para ajustar la evapotranspiración. A partir de los resultados obtenidos será posible seleccionar los puntos de muestreo de agua en los cursos para evaluar los contenidos de MO.

Las técnicas de teledetección e integración de SIG, permiten la elaboración de modelos de organización espacial de los suelos, el estudio espacio temporal de su funcionamiento y por lo tanto mejorar la gestión del recurso.

En síntesis, el objetivo general de este trabajo es evaluar la distribución espacial de la materia orgánica del horizonte superficial del suelo en una cuenca hidrográfica, en zona de clima templado húmedo, mediante el uso de técnicas de teledetección.

Específicamente, este trabajo se propone responder las siguientes preguntas:

- ¿La integración de técnicas de teledetección de alta y baja resolución en ambiente SIG, permite definir espacialmente unidades suelo-vegetación?
- ¿Las técnicas utilizadas permiten monitorear en el tiempo el comportamiento de las unidades suelo-vegetación?

- ¿Es posible evaluar la distribución espacial de la materia orgánica del horizonte superficial del suelo mediante el uso de técnicas de teledetección?
- ¿La utilización del comportamiento temporal del NDVI en las unidades suelo-vegetación extraído de las imágenes de baja resolución, permite ajustar la evapotranspiración por unidad de superficie?
- ¿La materia orgánica extraída de los cursos de agua corresponde con los niveles esperados de acuerdo al funcionamiento general de la cuenca y su cobertura vegetal?

Este trabajo comprende cuatro grandes partes:

- a) En la primera parte del trabajo se destaca la importancia del sistema suelo, la situación de los usos del suelo en el Litoral del Uruguay y los procesos de degradación. También se presenta una caracterización sumaria de la cuenca hidrográfica del Arroyo Sánchez y su definición como zona de estudio y área piloto para el desarrollo del trabajo.
- b) En la segunda parte se presenta la definición de las unidades suelo-vegetación. Los aspectos técnicos de la integración de información generada a partir de teledetección alta resolución – baja resolución, proponiendo una metodología de trabajo con apoyo del sistema SIG. Sistematizando los elementos más destacables en la integración SIG - Teledetección para la generación, organización y gestión de la información necesaria para el manejo ambiental del territorio.
- c) En la tercera parte a partir del análisis del comportamiento espectral de los suelos se propone una metodología de evaluación espacial de la materia orgánica de los suelos con el uso de imágenes Landsat.
- d) En la cuarta parte se avanza en la modelización del balance hídrico y el escurrimiento superficial, en la cuenca. En especial se plantea la importancia de estos elementos en la movilidad de la materia orgánica hacia los cursos de agua.

## **PRIMERA PARTE**

**PROBLEMÁTICA GENERAL**

**CUENCA DEL ARROYO SÁNCHEZ**

## **Introducción.**

Los cambios en el uso de la tierra y la cobertura del suelo tienen implicaciones medioambientales regionales profundas, como impactos en la tasa y tipo de degradación de la tierra, alteraciones en la dinámica del escurrimiento superficial, descenso de napas freáticas y reducción de la biodiversidad. Por consiguiente, es reconocido ampliamente que una comprensión de los cambios en el uso del suelo y del agua, es central para el debate de la sustentabilidad de la producción agrícola (Jobbagy y Jackson, 2000).

Una propuesta de Ordenamiento Ambiental del Territorio con objetivos de sustentabilidad, implica la definición conceptual del término sustentable. La definición de sustentabilidad adoptada en este trabajo consiste en: el estado de la condición, vinculado al uso y estilo del sistema ambiental en el momento de producción, renovación y movilización de sustancias o elementos de la naturaleza, minimizando la generación de procesos de degradación presentes o futuros del sistema (Achkar *et al.* 2004b).

Según Duchaufour (1977), en un suelo no perturbado, su perfil está en equilibrio con la vegetación climática característica. Cuando se produce un cambio o alteración de ese equilibrio, la evolución del suelo es calificada de “regresiva” (en relación a su menor fertilidad). En este caso, los suelos sufren una evolución particular, con formación de otro tipo de humus, y en consecuencia, una nueva edafogénesis. En tal sentido, Lal *et al.* (1997) sostienen que la conversión de ecosistemas naturales a tierras de uso agrícola conduce a la pérdida gradual del contenido de carbono orgánico del suelo y la magnitud de este decrecimiento depende, tanto del uso y manejo del suelo, como de los factores ambientales. La cuantificación de esas variaciones provee un punto de referencia en relación al potencial de una mejora de manejo tendiente hacia un aumento en la retención de carbono orgánico.

La capacidad para mejorar las consecuencias de las actividades antrópicas, depende de una mejor comprensión de la distribución y cantidad de carbono orgánico del suelo y de cómo éste es afectado por el cambio de cobertura vegetal, y particularmente, por el tipo de uso y manejo agrícola y pecuario. Sus consecuencias dependen en gran medida del

conocimiento del contenido y distribución actual de la materia orgánica y de los controles que regulan su ingreso y egreso.

A nivel nacional, los estudios en relación al uso del suelo, en general, se han centrado en el mejoramiento del manejo de suelos desde la perspectiva del cultivo. Sin embargo, una creciente necesidad de revertir y/o detener los actuales niveles de erosión y degradación de suelos, ha estimulado gradualmente la incorporación de una visión sistémica. La incipiente inclusión en estos estudios de los procesos y factores que regulan la edafogénesis, constituye también un insumo básico en el desarrollo de políticas de conservación de suelos y la elaboración de criterios de gestión sustentable del territorio.

En el ciclo terrestre del carbono, el carbono orgánico del suelo representa la mayor reserva en interacción con la atmósfera. Los flujos entre el carbono orgánico del suelo y la atmósfera son importantes y pueden ser positivos bajo la forma de captura o negativos como emisión de CO<sub>2</sub>. Las políticas de conservación de suelo deben considerar a los suelos como el principal sumidero de carbono del planeta, en cuanto al volumen que puede almacenar, pero también por ser un ambiente que es manejado por las sociedades humanas.

Luego de una presentación general del Uruguay desde las dimensiones física y agroeconómica, que aborda especialmente las transformaciones recientes del uso del suelo, en esta parte se exponen las razones que han conducido a la elección de la cuenca del Arroyo Sánchez como área piloto para el desarrollo del trabajo. Finalmente se realiza una descripción de las características fundamentales de la cuenca, como sistema agroproductivo.

## **A- CONTEXTO SOCIO-ECONOMICO y SELECCIÓN DEL AREA PILOTO**

### **1) Análisis agroeconómico de la República Oriental del Uruguay**

#### **i) Aspectos generales.**

El Uruguay se extiende por un territorio de ciento setenta y seis mil doscientos quince kilómetros cuadrados, con una gran diversidad de suelos, fruto de la integración específica de las condiciones climáticas, geológicas, topográficas, biológicas y temporales. El clima es templado lluvioso, con índices pluviométricos entre los mil cien y mil cuatrocientos milímetros de precipitación anual, distribuidos en forma relativamente uniforme a lo largo del año, con déficit hídrico en verano por aumento de la evapotranspiración. La temperatura media anual es de dieciocho grados centígrados, con una media del mes más cálido de veinticinco grados y una media en el mes más frío de doce grados.

Las condiciones geológicas, con una gran diversidad litológica determinan la variabilidad de los suelos existentes en el país, corresponden en una clasificación muy esquemática, a sedimentos arenosos en el centro y noreste, a sedimentos cuaternarios limosos en el sur y oeste, rocas ígneas efusivas como basalto en el oeste y norte y a rocas cristalinas en el centro sur. La topografía presenta una variabilidad menor, con el predominio de formas aplanadas y lomadas dominantes.

La población está integrada por 3.163.763 habitantes, de los cuales más del noventa por ciento corresponden a población urbana y cerca del cincuenta por ciento viven en la capital del país: Montevideo.

La estructura de país urbano, en cuanto al lugar de habitación de la población contrasta con la base agropecuaria de la economía del país. El aporte del sector agropecuario al producto bruto interno es del doce por ciento, pero el 81,5 % de las exportaciones son de origen agropecuario (Achkar y Domínguez, 2000a).

#### **ii) Un país pecuario exportador**

Desde la consolidación del país como estado- nación en la primera mitad del siglo XIX y como legado del pasado histórico colonial, Uruguay irrumpe en el escenario comercial internacional como país pecuario exportador (Barrán y Nahum, 1985).

A lo largo de los siglos XIX y XX, la especialización productiva pecuaria basada en las clásicas ventajas comparativas ofertadas por los recursos naturales y la incorporación tecnológica necesaria para modernizar los sistemas de producción, fueron articulando al país a la División Internacional del Trabajo como exportador de rubros derivados mayoritariamente de la actividad ganadera (salvo excepciones históricas acotadas a los períodos bélicos e interbélicos en el siglo XX) con bajo valor agregado y que actualmente son concebidos como “renglones tradicionales” de exportación. La consolidación del Uruguay liberal, urbano con bases pecuarias, promovido a partir de la consolidación nacional en los primeros años del siglo XX, significó una propuesta de modelo de país basado en el subsidio permanente del sector pecuario rural a las dimensiones socio- económicas urbanas (Achkar, *et al.* 1999).

En el espacio rural uruguayo la actividad agrícola siempre resultó marginal desde el punto de vista cuantitativo en volúmenes de producción y en la circunscripción geográfica, destinada mayormente a la satisfacción de un mercado interno muy restringido, generando en algunos rubros saldos exportables, que salvo excepciones, no fueron competitivos en los precios de oferta en el mercado internacional. Con gran impulso durante la implementación del Modelo Sustitutivo de Importaciones entre 1929- 1950, la actividad agrícola logró determinado “desarrollo” bajo el apoyo subsidiario del estado. Desde la crisis del modelo, las bases productivas agrícolas del Uruguay fueron sistemáticamente socavadas por los sucesivos equipos de gobierno (Panario, *et al.* 2000).

El sector agropecuario nacional nunca tuvo planes estratégicos integrales en el devenir histórico del país. Las políticas de desarrollo rural desde el punto de vista oficial, han estado concebidas desde un padrón de desarrollo basado en un modelo agro exportador. Los rubros de exportación que están ligados a las grandes explotaciones, fueron el objetivo de estas políticas sectoriales.

En las últimas décadas, en Uruguay se asiste a cambios importantes en lo que refiere al sistema y estructura agraria, en especial los aspectos vinculados a los modos de propiedad de la tierra, la forma de construir valor y al uso y estilo de aprovechamiento del sistema ambiental en los espacios rurales, en especial en el litoral oeste del país. El

sistema productivo tradicional entendido como la integración de ganadería extensiva mixta (ganadería ovina - bovina) y agricultura extensiva orientada hacia el mercado interno, presenta una serie de transformaciones profundas.

La ganadería extensiva y los principales rubros cerealeros tradicionales en el país (maíz, girasol, trigo, cebada, avena, etc.) son desplazados progresivamente por nuevos rubros: cultivos forestales de rápido crecimiento, arroz y cultivos transgénicos (soja y maíz). Destacándose como principales elementos de transformación del paisaje agrario uruguayo (Achkar, *et al.*, 2004b).

A fines de la década de 1980, el país presenta transformaciones debido a que extensas superficies que eran tradicionalmente destinadas a la actividad ganadera, pasan a ser forestadas. La forestación aparece como una actividad económica con gran dinamismo, apoyada por el Estado y con dimensiones de carácter empresarial, desarrollándose en primera instancia sobre suelos que tienen bajo índice de productividad en carne y lana según CONEAT (1994) denominados de prioridad forestal, pero luego va extendiéndose sobre el territorio, abarcando suelos que tienen otras condiciones físico – químicas y productivas.

Más recientemente, en el 2002, un nuevo rubro introduce cambios en la tradicional ocupación del espacio productivo destinado a la producción cerealera, tal es el caso de la irrupción de la soja con importantes superficies sembradas en el litoral oeste del país.

Estos dos nuevos procesos productivos como la forestación bajo el sistema de plantaciones, principalmente de eucaliptos y pinos y las plantaciones sojeras han introducido transformaciones que inciden en los territorios sobre los cuales se desarrollan, así como en los territorios cercanos. Tanto el sector forestal como los emprendimientos sojeros se asocian a estrategias de carácter empresarial de gran importancia y han inducido cambios en varios aspectos: sociales, económicos, tecnológicos, ambientales y paisajísticos, en el litoral oeste del Uruguay.

Si bien la lógica de las plantaciones forestales y sojeras responde ante todo a una concepción de ventajas comparativas que ofrecen los territorios en el espacio uruguayo, sus efectos debido al tipo de implantación y a la elección de técnicas y métodos de

producción tendrán sus impactos a diversas escalas. Estos impactos tendrán efectos diferenciales a escala local, nacional y regional. Sin embargo no ha existido a nivel nacional una evaluación profunda sobre cuales serian las fortalezas y oportunidades del país para el desarrollo de estas actividades, así como sus debilidades y amenazas.

### **iii) Los procesos de degradación de tierras en el Uruguay.**

El desarrollo de una base sistemática de estudios de suelos en el Uruguay que se implementó a partir de la década de 1960, permite realizar una caracterización general de los suelos dominantes y asociados para toda la superficie del país. Aunque el trabajo ha quedado inconcluso en varios aspectos hoy se dispone de una cartografía de base, escala 1:1.000.000. Cada unidad de mapeo de suelos representa una diversidad de situaciones que se agrupan en suelos dominantes que ocupan más del 50% de la unidad; suelos asociados que ocupan entre el 10 al 50% de la superficie y suelos accesorios que ocupan menos del 10% de la superficie total de la unidad de mapeo (MAP-DSF, 1976).

Las tierras principalmente agrícolas con diferentes aptitudes de uso ocupan aproximadamente el 19% del total de la superficie del país y las tierras agrícolas pastoriles el 21%. A pesar de la alta disponibilidad de tierras con potencial productivo la superficie agrícola del país nunca ha superado el millón de hectáreas (6% de la superficie total del país) en la actualidad ocupa unas 600.000 hectáreas (3,75 %) y los cultivos forestales 660.000 (4,1%). Sin embargo el principal recurso utilizado para el desarrollo de la actividad agropecuaria ha estado sometido a sistemas de explotación que distan bastante de las condiciones de sustentabilidad (en muchos de los casos los procesos de degradación están ligados a la falta de planificación agropecuaria). Los estudios nacionales de evaluación de la situación de las tierras indican que la mayoría de las tierras del territorio nacional han sufrido procesos de degradación que se manifiestan bajo distintos grados de deterioro. La última campaña de evaluación de la degradación de tierras realizada para todo el territorio nacional (PNUMA, 1983) indica que el 7% de la superficie total del país presenta niveles severos de degradación de tierras, el 28% niveles moderados, el 62% procesos ligeros de degradación y solamente el 3% niveles nulos o muy ligeros de degradación.

Estas cifras indican que el estilo de desarrollo empleado en el espacio productivo nacional ha tenido (y tiene) un elevado costo ambiental y social en el medio rural uruguayo (Achkar, *et al.* 1999).

## **2) El litoral oeste del Uruguay**

### **i) Un espacio de Productores Mixtos**

Este espacio está integrado, en términos genéricos, por un conjunto de productores que no se caracterizan por una producción específica dominante sobre las demás, con permanencia a través del tiempo y con una ubicación espacial específica en el territorio. Tal es el caso de los productores lecheros o ganaderos. En la actualidad este espacio abarca cerca de cuatro millones de hectáreas y comprende a la mayor parte de la producción agrícola extensiva.

El elemento preponderante en esta clasificación es el nivel de la capacidad de gerenciamiento de los productores, que les permite actividades dinámicas, de mayor ganancia y riesgo, cuya importancia dentro de la empresa es alterada rápidamente en función de las conveniencias económicas del momento. Un buen ejemplo podrían ser las empresas de tamaño medio y grande (entre 500 y 2500 hectáreas), ubicadas sobre una base de suelos de “alta productividad”, que realizan como actividades la agricultura extensiva, la ganadería de engorde (invernada) y la lechería. Muchas de estas empresas están incorporando progresivamente el cultivo de soja, y en las tierras con menor “productividad” la forestación .

Es claro que ni las proporciones ni los niveles de realización de los rubros son constantes, ni tampoco la ubicación geográfica, ya que se encuentran empresas de este tipo distribuidas por todo el país, pero casi siempre sobre los mejores suelos de cada zona.

Las empresas así definidas son muy dinámicas, aunque con elevados niveles de riesgo, donde la proporción de participación y el nivel de cada actividad está subordinado al plan general de la empresa, en general también presentan los mejores niveles de rendimiento económico de cada actividad dentro de sus sectores específicos.

Estas empresas, son líderes en la aplicación de las técnicas a la producción agropecuaria (revolución verde o revolución genética), esto podría explicarse porque el sistema privilegia su aplicación (crédito subsidiado, mejores plazos, etc.) y es por lo tanto más rentable económicamente. Es muy posible que si se privilegiara el uso de técnicas sustentables aún en el concepto de sustentabilidad débil (Hauwermeiren, 1998), éstas también fueran líderes en su aplicación innovadora si la misma se tradujera en mayores beneficios económicos. Sin embargo, el impacto económico de estas empresas en el litoral oeste del país es importante, las estimaciones realizadas indican que en esta zona se genera el 50% del total de los puestos de trabajo del sector agropecuario nacional y el mayor aporte al PBI agropecuario por hectárea (Panario, *et al.* 2000).

## **ii) Análisis socioeconómico**

El sector agropecuario uruguayo de productores mixtos, se ha desarrollado a lo largo del siglo XX, especialmente a partir de la II Guerra Mundial, concentrándose en el litoral del país siguiendo una lógica de regionalización que responde al potencial productivo de los suelos. El desarrollo alcanzado por el sector es el reflejo de una política de subsidios, integrada a la etapa de sustitución de importaciones, con el objetivo de abastecer el mercado interno, logrando así un importante grado de diversificación de la producción y potencializando el desarrollo de los pequeños productores.

A partir de la década de 1960 la aplicación sistemática de políticas económicas de orientación neoliberal, (que se consolidan en la década de 1980), generó una serie de impactos en la agricultura uruguaya:

- desarrollo de planes de fortalecimiento de productos destinados a la exportación, destacándose por periodos algún producto (actualmente se destacan la soja y la forestación);
- reducción de la diversidad de productos cultivados con una serie de desapariciones de cultivos;
- retracción de los cultivos cerealeros tradicionales destinados al abastecimiento del mercado interno;
- aplicación masiva de paquetes tecnológicos inspirados en la revolución verde que aumentaron la dependencia del productor en la adquisición de insumos externos e incidieron en la depredación de los recursos naturales con ausencia de políticas de investigación y promoción de conservación;

- concentración de la producción en el sector de agricultores empresariales con capacidad de inversión;
- aumento en el proceso de concentración de la tierra con la desaparición creciente de pequeños y medianos productores y
- mantenimiento del problema histórico de tenencia de la tierra.

(Achkar, 2000a)

### **3) Selección del área piloto**

#### **i) Criterios de selección de la cuenca del Arroyo Sánchez**

Para la selección del área de estudio se consideraron los siguientes criterios:

- Definir un espacio con criterios de cuenca hidrográfica ya que su propia delimitación implica la definición de un sistema natural. La cuenca hidrográfica es una unidad espacial compuesta por una diversidad de componentes bióticos y abióticos que interactúan entre sí. La energía solar y las precipitaciones constituyen los principales "ingresos" de energía, materia e información desencadenando procesos e interrelaciones entre sus componentes, a partir de lo que se generan respuestas de "salidas" de acuerdo a su estructura y dinámica interna. La cuenca actúa entonces como un "operador sistémico" por lo cual cualquier alteración cualitativa y/o cuantitativa producida en los ingresos incidirá tanto en el funcionamiento global como en el de sus subsistemas componentes (Achkar, *et al.* 2004b)
- Se consideró la diversidad de usos del suelo en la cuenca. Para su elección se recurrió a fotolectura de imágenes Landsat. En la cuenca seleccionada se distribuyen actividades agrícolas, ganadería extensiva e intensiva y forestación.
- Tamaño de las parcelas. La organización de la producción (independientemente de la tenencia de la tierra) en parcelas suficientemente grandes como para poder identificar variabilidad al interior de cada parcela, fue un factor considerado. Se identificaron 537 parcelas con una superficie promedio de 112.6 há.
- Condiciones de accesibilidad. Un elemento secundario que fue considerado son las condiciones de accesibilidad al área de trabajo, la disponibilidad de caminería para poder acceder con relativa facilidad a todos los puntos de la cuenca.

Por último la diversidad de suelos existentes en la cuenca. El área de trabajo presenta una importante variabilidad de suelos, que comprende desde vertisoles\* con textura muy

---

\* Anexo 1 – texto explicativo de la taxonomía de suelos utilizada en Uruguay.

pesada, ligeramente ácidos a neutros, fertilidad natural muy alta, permeabilidad lenta, drenaje moderado a pobre, con más de 7 % de materia orgánica a argisoles\* con textura ligeramente arenosa, moderadamente ácidos, fertilidad natural baja a muy baja, con contenidos de materia orgánica inferior al 2%.

## ii) Datos generales

La cuenca del A° Sánchez no escapa a la lógica general del litoral oeste del país, siendo la estructura socioeconómica la resultante de la política agropecuaria.

- Superficie total de la cuenca: 60.470 hectáreas
- Numero de establecimientos agropecuarios: 78
- Población rural: 410
- Población trabajadora rural: 370

## iii) Uso del suelo

Sobre la base de los datos del Censo General Agropecuario del año 2000 (DIEA-MGAP 2003) se presenta una aproximación a la situación actual de concentración de la tierra y el peso de los grandes establecimientos en la cuenca.

La tendencia en la cuenca es similar a la que se desarrolla en todo el territorio nacional, con las particularidades del litoral oeste del país. Así el 20 % de los establecimientos concentran el 70 % de la tierra (establecimientos de más de 1000 hectáreas), Tabla 1.

**Tabla 1: Tamaño de los establecimientos**

Tamaño (ha)	N° Esta.	Sup. (has)	%
1 – 4	4	15	0.02
5 – 9	6	36	0.06
10 – 19	3	38	0.06
20 – 49	4	114	0.19
50 – 99	9	625	1.03
100 – 199	13	1984	3.28
200 – 499	13	4496	7.43
500 – 999	11	7461	12.34
1000 – 2499	11	17575	29.06
2500 – 4999	3	9518	15.74
5000 – 9999	2	14704	24.32

**Tabla 2: Tenencia de la tierra**

Tipo de Tenencia	Sup. (ha)
Propiedad	38464
Arrendamiento	8746
Pastoreo	3026
Aparcería	4276
Ocupante	917
Otros	1139

Fuente: DIEA – MGAP - 2003

En la tabla 2 se presenta la distribución por superficie según la tenencia de la tierra, donde se destaca la importancia de los propietarios entre los productores de la zona (64 % de la superficie total de la cuenca).

**Tabla 3: Uso de suelo**

Uso	Sup. (ha)
Monte Natural	2260
Forestación	6524
Huerta	3
Cultivos Cerealeros	6986
Cultivos Forrajeros	6668
Tierra Arada (30/6/2000)	1089
Rastrojo	2218
Praderas Artificiales	9885
Siembra en Cobertura	435
Campo Natural Fertilizado	1377
Campo Natural	21208
Tierras Improductivas	145

Fuente: DIEA – MGAP - 2003

**Tabla 4: Rodeo Vacuno**

Nº de Animales	Nº Est.	Sup. (ha)	Cabezas
< 20	12	505	117
20 – 100	14	4090	929
100 – 200	9	1696	1218
200 – 500	13	5738	4229
500 – 1000	8	6995	5397
1000 – 2000	7	10088	9702
> 2000	5	23948	21749
Total	68	53060	43341

Fuente: DIEA – MGAP – 2003

**Tabla 5: Rodeo Ovino**

Majada	Nº Est.	Sup. (ha)	Cabezas
< 50	16	6880	357
50 – 200	10	3906	1044
200 – 500	8	7157	2948
500 – 1000	6	5565	4221
1000 – 2000	3	6936	5239
2000 – 3500	1	5557	3314
> 3500	1	5903	7323
Total	46	41905	24448

Fuente: DIEA – MGAP - 2003

En la tabla 3 se presenta los usos del suelo, según la apertura utilizada por el censo agropecuario (año 2000), que tiene algunas limitaciones en cuanto a la comparación con los resultados obtenidos de la clasificación de imágenes. Por ejemplo la vegetación denominada Monte Parque, según la densidad de los árboles aparece indistintamente en esta leyenda como monte natural o como campo natural

Las tablas 4 y 5 presentan la distribución de las actividades ganaderas en la cuenca según tamaño de los productores en función del rodeo animal. Dos aclaraciones son necesarias. Primero, en general y como se desprende de las cifras se trata de productores que integran la cría vacuna y ovina en los mismos establecimientos. Segundo, la lechería comercial está integrada en la tabla 4 de rodeo vacuno, se trata de 11

establecimientos que practican esta actividad en 9379 hectáreas con un rodeo total de 3506 cabezas de ganado y obtienen una producción anual de 8.726.472 litros de leche.

**Tabla 6: Cultivos Cerealeros, Industriales, Forrajes y Praderas Artificiales**

Cerealeros e Industriales			Praderas Artificiales			Forrajes		
Tipo	N° Est	Sup. (ha)	Tipo	N° Est	Sup. (ha)	Tipo	N° Est	Sup. (ha)
Trigo	19	4721	Alfalfa	7	255	Avena	36	3886
Cebada Cervecera	6	927	Trébol Blanco	2	175	Trigo	8	725
Avena para Grano	11	613	Trébol Rojo	6	335	Reygrass	9	575
Maíz	2	200	Lotus	14	1614	Otras	15	1481
Girasol	4	225	Otras	3	106			
Sorgo	1	173	Mezclas	34	7834			
Soja	1	126						
Total	26	6986	Total	48	10319	Total	43	6668

Fuente: DIEA – MGAP – 2003

La tabla 6 presenta una síntesis de los distintos cultivos que se desarrollan en la cuenca. En el año del censo (2000), aún no comenzaba el crecimiento acelerado de la producción de soja en el país, la expansión de este cultivo comienza en el año 2001. En el 2000 se cultivaron 12.000 has de soja, en 2001, 29.000, en 2002, 79.000 y en 2003 270.000, siendo el litoral oeste del país la zona principal de crecimiento del área sembrada (Achkar, *et al.*, 2004c).

La categoría praderas artificiales incluye las áreas con agregado de especies forrajeras sobre el tapiz herbáceo natural con o sin roturación del suelo. Como forrajes se integran todos aquellos cultivos anuales que son utilizados para el ganado, sea como pastoreo directo o como reserva de forraje.

## **B- DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA DEL ARROYO SÁNCHEZ**

### **1) Aspectos Generales**

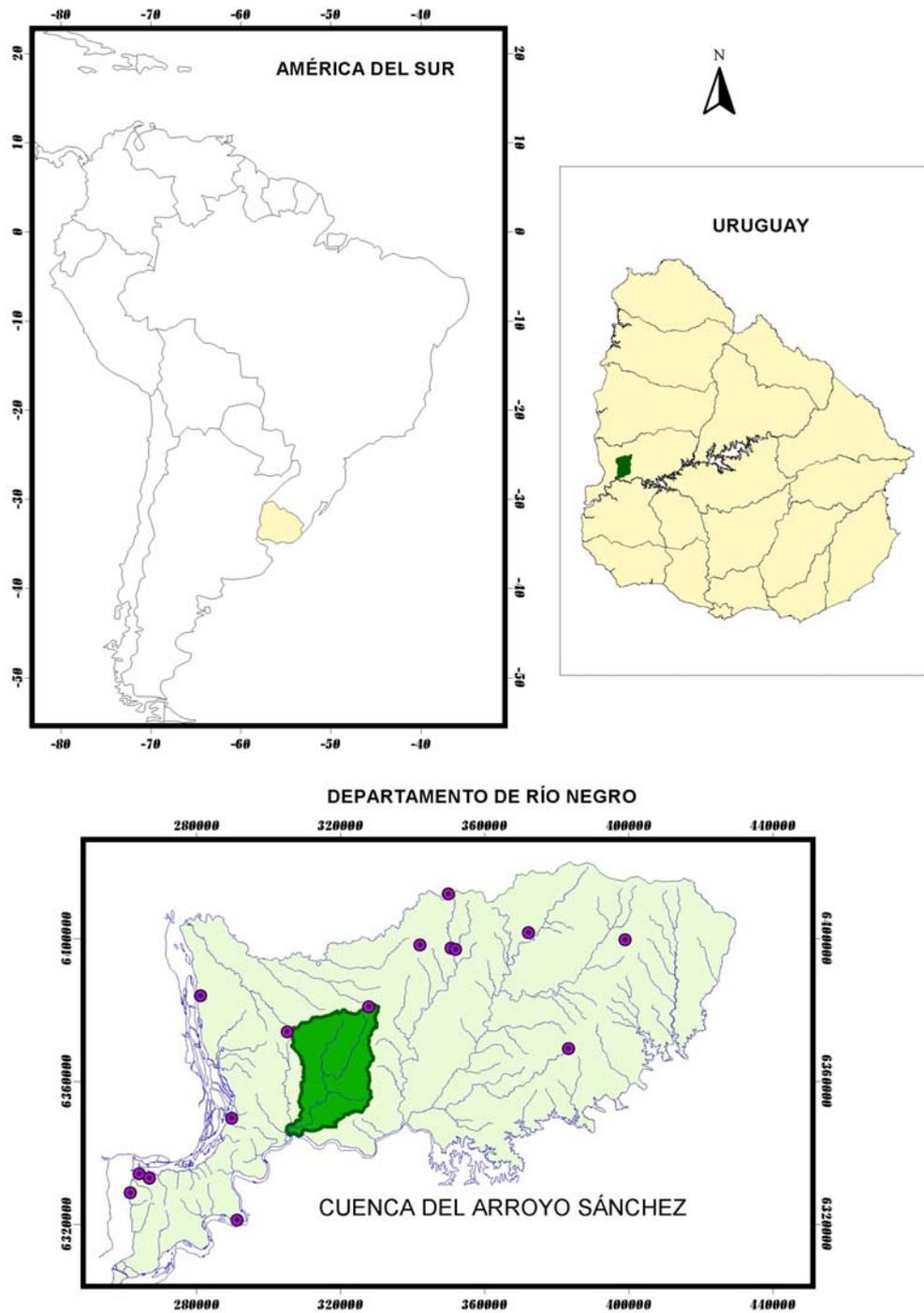
El área de trabajo, constituye una subcuenca de la cuenca del Río Negro. En términos generales corresponde a un paisaje de lomadas suaves colindante a las llanuras y planicies fluviales. El paisaje se desarrolla a partir de sedimentos heterotexturales de diversas formaciones geológicas. Los delgados aportes de sedimentos recibidos durante el cuaternario en esta zona facilitó la formación de valles de lomadas característicos de la cuenca (Panario, 1987)

En los interfluvios y laderas predominan los suelos de fertilidad natural media a alta dependiendo del material geológico generador, con permeabilidad lenta, drenaje moderado y riesgo de sequía medio. En las laderas de mayor pendiente pueden presentarse suelos de fertilidad natural media a baja, permeabilidad lenta, drenaje moderado y riesgo medio de sequía, con tendencia a la erosión. Los ecosistemas predominantes son la pradera estival / invernal de tapiz denso y el monte fluvial típico, dependiendo de la posición en el paisaje.

Existe una diferenciación en los usos del suelo en esta unidad paisajística en función de la localización geográfica. Hacia el oeste, se desarrolla la agricultura extensiva cerealera y los cultivos forrajeros vinculados a la ganadería intensiva bovina. En los últimos años se han implantado monocultivos forestales de especies de rápido crecimiento en los suelos predominantemente arenosos.

La cuenca del Arroyo Sánchez ubicada en el departamento de Río Negro, se extiende entre los 32°41'52.8'' - 33°1'28.3'' de latitud sur y entre los 57°36'23.2'' - 57°53'10.9'' de longitud oeste. El área total de estudio es de 60.000 has. y forma parte de la región del litoral oeste del país (figura 1).

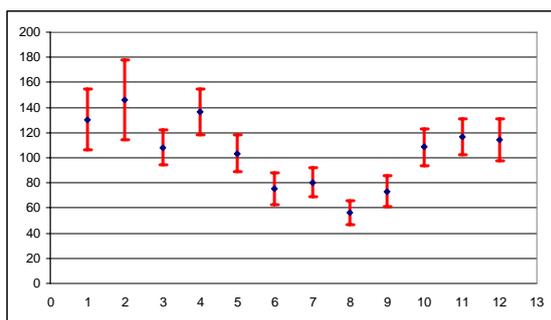
**FIGURA 1: LOCALIZACIÓN DE LA CUENCA DEL ARROYO SÁNCHEZ EN LA REPÚBLICA ORIENTAL DEL URUGUAY**



Las formas de relieve predominantes en la cuenca son lomadas suaves y ocasionalmente aplanadas, con pendientes que varían entre 0 y 14 % con valores medios en el entorno de 4%. La zona es de clima templado lluvioso (clasificación de Koeppen  $C_{fa}$  a  $C_w$ ). La distribución de la temperatura, precipitación y un esquema del balance hídrico anual sin correcciones se presenta en las figuras 2, 3 y 4 respectivamente.

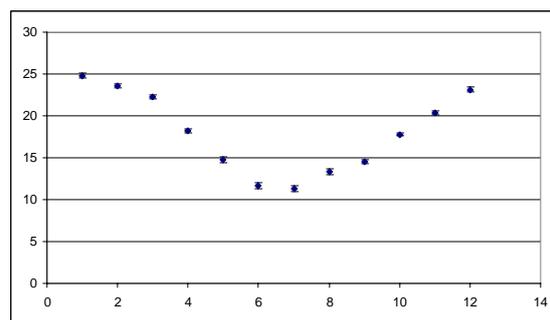
**Figura 2: Precipitación media mensual**

Serie 1981 – 2003, en mm,  
Intervalo de Confianza 95%.



**Figura 3: Temperatura Media Mensual**

Serie 1981 – 2003, en °C,  
Intervalo de Confianza 95%.

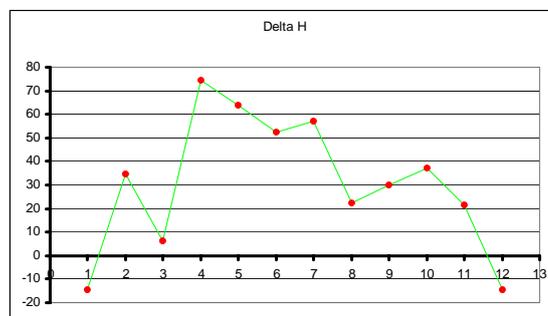


Fuente: Elaboración a partir de los datos de la estación Meteorológica Young - DNM 2004

Los gráficos presentados se realizan a partir de los datos de la estación meteorológica de Young, ubicada en el extremo norte de la cuenca. El sistema de geformas en la zona de trabajo no indicaría grandes cambios en la distribución de la precipitación y temperatura. Se trabajó con la serie de datos disponible, 1981 - 2003 y se presenta la distribución media mensual de la serie de datos con un intervalo de confianza de 95%, para temperatura y precipitación.

**Figura 4: Esquema del Balance Hídrico**

Serie 1981 – 2003, en mm.



Para el cálculo del balance hídrico se trabajó con la fórmula de Thornthwaite y Mather (Unesco, 1982). Dicha fórmula consiste en calcular la evapotranspiración potencial media mensual, a partir de la temperatura media y la latitud. La comparación de los

datos calculados de evapotranspiración con los datos de precipitación media permite obtener una referencia teórica sobre el balance hídrico medio mensual.

## **2) Suelos y paisajes**

En Uruguay existen dos cartas de suelos que abarcan todo el territorio nacional, la carta de reconocimiento de suelos (MAP- DSF. 1976) y la carta de unidades CONEAT (Comisión Nacional de Estudio Agronómico de la Tierra) (MGAP, DGRNAR, CONEAT, 1994). La carta de reconocimiento de suelos elaborada a escala 1:1.000.000 define unidades de suelos en áreas relativamente homogéneas de acuerdo a las características morfológicas, físicas, químicas y de la distribución espacial de los suelos. Desarrollando una nueva clasificación de los suelos del país.

Las unidades CONEAT, escala 1:20.000 no son estrictamente unidades cartográficas básicas de suelo, sino que constituyen áreas homogéneas, definidas por su capacidad productiva en términos de carne bovina, ovina y lana. Esta capacidad se expresa por un índice relativo a la capacidad productiva deducido de las características básicas de los suelos. La información contenida en ambas cartas aportan información básica sobre los tipos de suelos en la cuenca así como sobre los aspectos generales del paisaje.

### **i) Unidades de suelo, carta 1:1.000.000, MAP –1979.**

Las unidades de mapeo utilizadas en la carta representan asociaciones de suelos, es decir un grupo taxonómico de tipos de suelos que se asocian espacialmente de una manera regular, según una proporción determinada y un patrón de posición en el paisaje. Para su elaboración se realizaron 6.000 descripciones de perfiles y se analizaron 1.100 perfiles, generalizando los resultados sobre fotografías aéreas escala 1:40.000. El objetivo fundamental que orientó la elaboración de esta carta fue realizar una caracterización, clasificación y cartografía de los suelos en el territorio nacional. El resultado para cada unidad de mapeo, parte de una enumeración de los suelos según su proporción de ocurrencia sobre la base del sistema taxonomico elaborado, los materiales generadores, las formas de relieve, la disposición de los suelos en las distintas posiciones del paisaje y la vegetación natural predominante (MAP- DSF. 1976).

El volumen de información para cada unidad, así como su orientación en la construcción: síntesis entre su génesis y los caracteres morfológicos, hacen de esta carta un importante insumo para la descripción y comprensión de una unida espacial como es

la cuenca hidrográfica. La cuenca del A° Sánchez está integrada por 5 unidades de suelos de la carta de reconocimiento de suelos del Uruguay, escala 1:1.000.000 (MAP-DSF. 1976), tabla 7.

**Tabla 7: Unidades de suelos en la cuenca del A° Sánchez**

Unidad	Sigla	Sup. Has.	Porcentaje
Bellaco	<b>Bc</b>	14708	24.1%
Fray Bentos	<b>FB</b>	15244	25%
Tres Bocas	<b>TB</b>	24344	40%
Villa Soriano	<b>Vs</b>	3125	5.1%
Young	<b>Yg</b>	3513	5.8%
Total		60934	100%

Fuente: MAP – DSF. 1976

En la figura 5 se presenta la distribución espacial de estas unidades de suelos en el territorio de la cuenca, los límites iniciales de las unidades de suelo corresponden a la carta de suelos 1:1.000.000 original. En la tabla 8 se describen las principales características de cada unidad de suelo, según la Dirección de Suelos y Fertilizantes (MAP – DSF 1976).

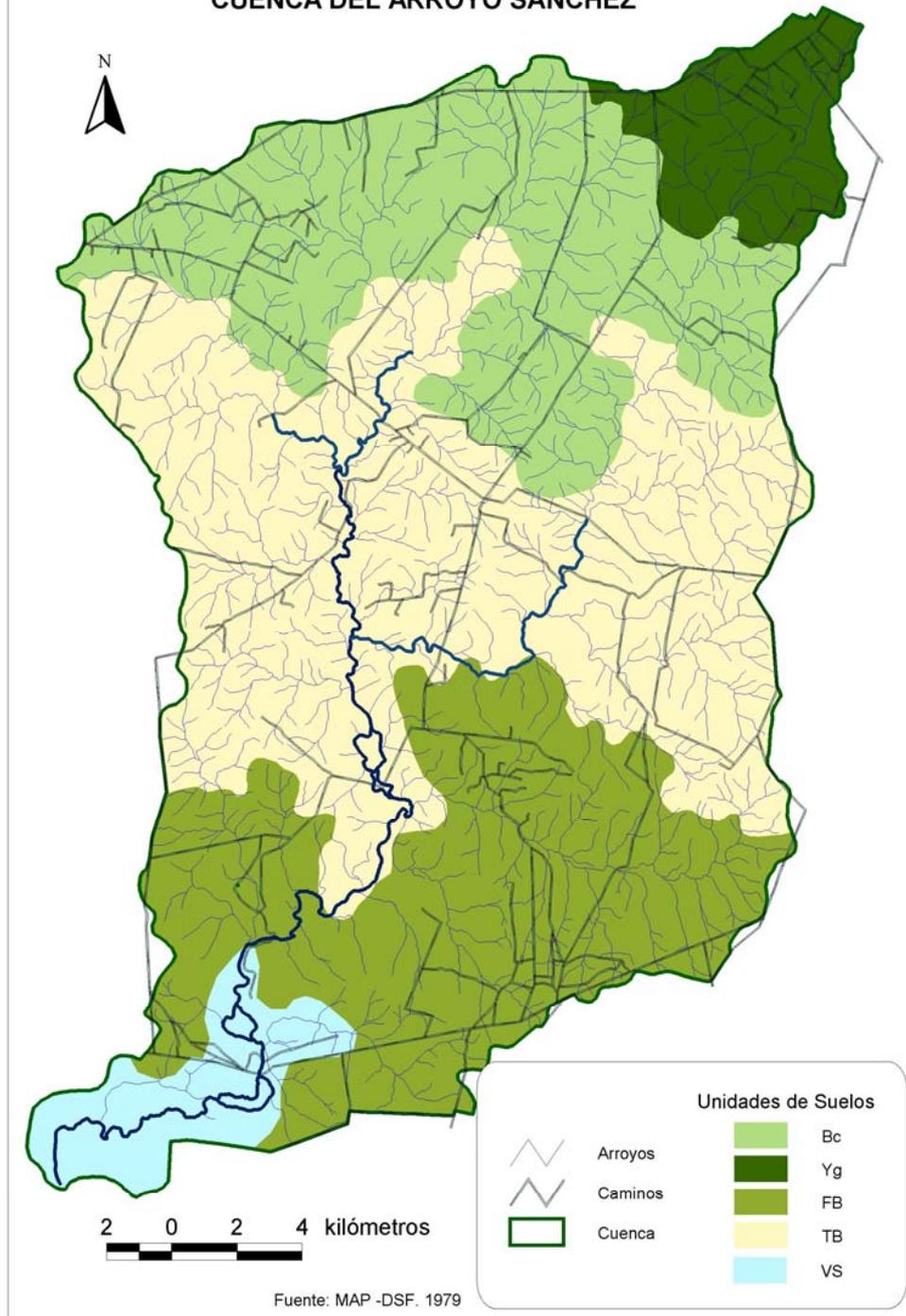
**Tabla 8: Características de las unidades de suelos en la cuenca del A° Sánchez**

Unidad de suelo	Materiales generadores	Suelos <sup>1</sup>	Relieve	Vegetación
<b>Bellaco (Bc)</b>	Sedimentos arcillosos	Vertisoles y Brunosoles	Lomadas suaves, ocasionalmente aplanadas	Pradera predominantemente invernical típica de tapiz denso con Monte Parque y Selva fluvial típica accesorias
<b>Fray Bentos (FB)</b>	Sedimentos limo arcillosos	Brunosoles	Colinas sedimentarias, lomadas fuertes e interfluvios de lomadas suaves	Pradera invernical de tapiz denso con Parque de espinillos asociados y Selvas fluviales accesorias
<b>Tres Bocas (TB)</b>	Sedimentos areno arcillosos	Argisoles y Brunosoles	Lomadas suaves al este de la unidad aparecen casquetes de cantos rodados	Pradera predominantemente estival de tapiz denso con Parque de algarrobos y espinillos y Selva fluvial típica hacia los arroyos.
<b>Villa Soriano (VS)</b>	Sedimentos aluviales	Gleysoles, Fluvisoles y Vertisoles	Llanuras medias y bajas	Pradera estival/invernical de tapiz denso. Asociados: Parque de espinillos y algarrobos, Selva fluvial típica y comunidades hidrófilas uliginosas.
<b>Young (Yg)</b>	Sedimentos francos	Brunosoles	Lomadas suaves con lomadas fuertes asociadas	Pradera predominantemente invernical de tapiz denso con parque y Selva fluvial típica accesorias

La rigurosidad en la elaboración de esta cartografía de suelos (respondiendo a los objetivos), así como el cumulo de trabajos posteriores que se realizaron sobre esta base, en especial los trabajos sobre acumulación de agua por unidad de suelo (Molfino y Califra, 2001) serán de mucha utilidad en la etapa final de este trabajo.

<sup>1</sup> Anexo 1 – texto explicativo de la taxonomía de suelos utilizada en Uruguay

**FIGURA 5: CARTA DE SUELOS 1:1.000.000  
CUENCA DEL ARROYO SÁNCHEZ**



## ii) Unidades de suelo CONEAT

CONEAT (Comisión Nacional de Estudio Agro- económico de la Tierra), realiza la caracterización físico- ambiental para construir un Índice de Productividad en carne y lana de los Grupos de Suelos. Definen espacialmente áreas homogéneas a partir de la identificación de los grupos de suelos dominantes, asociados y accesorios y describen las características del relieve y las pendientes medias asociadas, así como también la geología que se presenta como material madre, los ecosistemas predominantes y la potencialidad de uso del suelo, a escala 1:20.000. Según la carta de unidades CONEAT es posible identificar 12 unidades en la cuenca del A° Sánchez, la proporción en superficie ocupada por cada unidad se presentan en la tabla 9. La descripción de cada unidad se realizó sobre la base de la leyenda de las unidades CONEAT (MGAP, DGRNAR, CONEAT, 1994).

**Tabla 9: Unidades CONEAT**

<b>Unidades CONEAT<sup>2</sup></b>	<b>Sup. en has.</b>	<b>Porcentaje</b>
<b>03.2</b>	23	0,04
<b>03.3</b>	296	0,49
<b>03.40</b>	14840	24,35
<b>03.51</b>	140	0,23
<b>03.52</b>	545	0,89
<b>09.3</b>	13007	21,35
<b>10.1</b>	2926	4,80
<b>10.2</b>	14093	23,13
<b>11.1</b>	1473	2,42
<b>11.2</b>	3210	5,27
<b>11.5</b>	9333	15,32
<b>11.6</b>	248	0,41
<b>Areas no rurales</b>	800	1,31
<b>Total</b>	<b>60934</b>	<b>100,00</b>

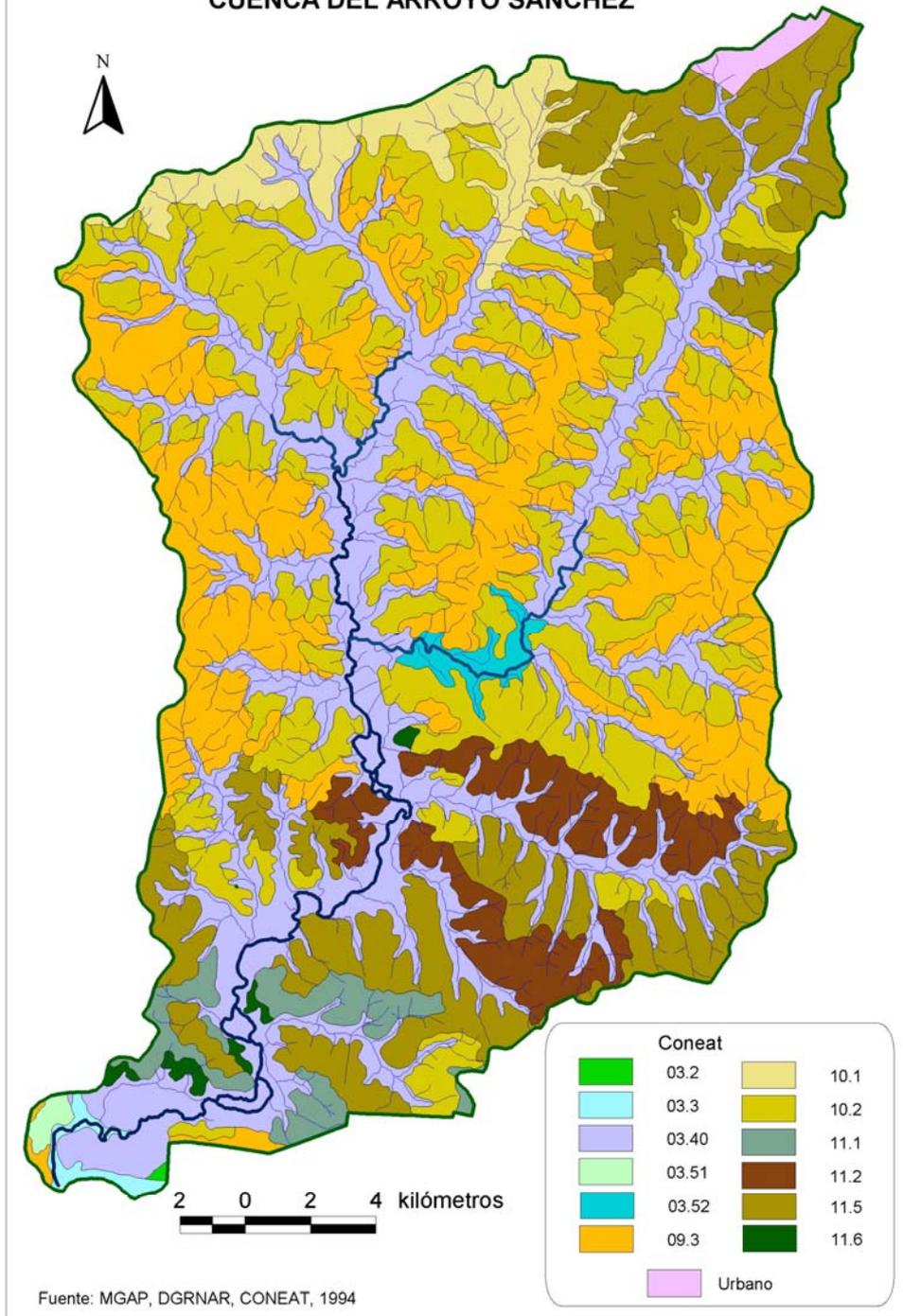
Fuente: MGAP, DGRNAR, CONEAT, 1994

La figura 6 presenta la distribución espacial de las unidades CONEAT en la cuenca.

Las unidades de suelo CONEAT se relacionan con las unidades de la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay a escala 1:1.000.000. Se indican para cada grupo, algunas propiedades importantes de los suelos y características asociadas del paisaje. La delimitación de los Suelos obtenida se superponen al parcelario rural y se representan en la cartografía CONEAT a escala 1:20.000 (MGAP, DGRNAR, CONEAT, 1994).

<sup>2</sup> Anexo 2 – Descripción de las Unidades CONEAT.

**FIGURA 6: CARTA DE UNIDADES CONEAT  
CUENCA DEL ARROYO SÁNCHEZ**



### iii) Síntesis de suelos y paisajes en la cuenca

En la tabla 10 se presenta la síntesis de la integración espacial entre los dos sistemas de cartografía de suelo del país. El análisis de las superficies relativas de cada una de las 34 subclases generadas, indica la consistencia entre los dos sistemas de clasificación de suelos a pesar de las dos escalas disímiles de trabajo y representación que se utilizan para su elaboración. Estos resultados son los esperables ya que las dos clasificaciones son el resultado del mismo proceso de relevamiento de suelos.

**Tabla 10: Integración espacial de las cartas de suelos (1:1.000.000 y CONEAT)**

Suelo	Sup.	%	Suelo	Sup.	%	Suelo	Sup.	%
<b>Bc 03.40</b>	2051	3,39	<b>FB 11.6</b>	52	0,09	<b>VS 03.51</b>	140	0,23
<b>Bc 09.3</b>	2313	3,82	<b>TB 03.40</b>	7087	11,72	<b>VS 09.3</b>	164	0,27
<b>Bc 10.1</b>	2806	4,64	<b>TB 03.52</b>	421	0,70	<b>VS 10.2</b>	73	0,12
<b>Bc 10.2</b>	5406	8,94	<b>TB 09.3</b>	10344	17,10	<b>VS 11.1</b>	233	0,39
<b>Bc 11.5</b>	1694	2,80	<b>TB 10.1</b>	94	0,16	<b>VS 11.5</b>	253	0,42
<b>FB 03.40</b>	3549	5,87	<b>TB 10.2</b>	5735	9,48	<b>VS 11.6</b>	179	0,30
<b>FB 03.52</b>	125	0,21	<b>TB 11.2</b>	448	0,74	<b>Yg 03.40</b>	388	0,64
<b>FB 09.3</b>	187	0,31	<b>TB 11.5</b>	198	0,33	<b>Yg 10.1</b>	26	0,04
<b>FB 10.2</b>	2576	4,26	<b>TB 11.6</b>	18	0,03	<b>Yg 10.2</b>	302	0,50
<b>FB 11.1</b>	1239	2,05	<b>VS 03.2</b>	23	0,04	<b>Yg 11.5</b>	2434	4,02
<b>FB 11.2</b>	2762	4,57	<b>VS 03.3</b>	296	0,49	<b>Area no</b>	800	1,31
<b>FB 11.5</b>	4754	7,86	<b>VS 03.40</b>	1764	2,92	<b>Rural</b>		

Fuente: Elaboración propia a partir de la cartografía original

La consistencia entre los dos sistemas de clasificación, así como la disponibilidad de nuevos trabajos que profundizan sobre la características de los suelos a partir de la base de la carta de reconocimientos de suelos, hace que se considere más apropiado utilizar la carta de reconocimiento de suelos 1:1.000.000 como base para el presente trabajo.

### CONCLUSIÓN.

La cuenca del Arroyo Sánchez constituye una de las zonas tradicionales de producción cerealera integrada con la producción ganadera. La consolidación de productores mixtos en el área es representativa del proceso del resto del litoral. La dinámica, en los cambios en el uso del suelo en el periodo de trabajo (1998 – 2003) está caracterizada por el aumento progresivo de áreas de cultivos forestales con especies de rápido crecimiento (el comienzo de la cosecha de madera), la expansión del cultivo de soja a partir del año 2001 y la disminución del stock de ganado ovino.

Los cambios importantes en el uso del suelo en estos años hacen de la zona un área interesante como área piloto, ya que la propia dinámica de las transformaciones de la fisionomía del territorio, permite evaluar la potencialidad de los trabajos desarrollados.

Por otra parte la realidad cambiante de año a año de la situación de uso y aprovechamiento de los ecosistemas presentes en la cuenca dificulta y hace más complejo el desarrollo del trabajo. Sin embargo, esta serie de cambios dinámicos en la cuenca se realizan sin transformaciones importantes en el parcelario (subdivisión de la tierra en unidades productivas) lo que facilita el desarrollo de la metodología que se propone. En base a estos elementos es posible afirmar que la cuenca del Arroyo Sánchez reúne efectivamente las condiciones para ser considerada un área piloto que permita avanzar en metodologías de evaluación y modelización de los bienes de la naturaleza disponibles para el desarrollo de las actividades productivas de la sociedad uruguaya.

La elección del área reunió las características necesarias en cuanto a la diversidad de ambientes y de usos productivos a lo que se sumó la dinámica en los usos del suelo. Conocer la dinámica de las transformaciones del uso del suelo, constituyen un elemento interesante ya que condiciona la evolución de los aportes de materia orgánica fresca al suelo. Evaluar la situación de este proceso y monitorear el comportamiento de la vegetación tanto en la dimensión espacial como temporal, constituye el primer insumo que permite comprender la dinámica de la materia orgánica del suelo.

**SEGUNDA PARTE**

**EVALUACIÓN DE UNIDADES**

**SUELO – VEGETACIÓN**

**EN LA**

**CUENCA DEL ARROYO SÁNCHEZ**

## Introducción

La vegetación, cultivos y manejo del suelo son los principales factores de regulación del intercambio de carbono orgánico del suelo (COS) con la atmósfera (Follet, 2001). La acumulación, conservación o degradación de la materia orgánica del suelo depende de los residuos vegetales y del manejo que se realice en los distintos sistemas productivos implementados (Larson *et al.* 1972, Rasmussen *et al.* 1980, Paustian *et al.* 1992, Gregorich *et al.* 1996, Hassink y Whitmore, 1997). Las observaciones indican que las prácticas agrícolas con medios mecánicos disminuyen el stock de carbono en el suelo (Reicosky *et al.* 1997). Mucho se ha avanzado en la evaluación de las pérdidas o ganancias de carbono en el suelo dependiendo de las prácticas de manejo (Robertson *et al.* 2000; Follet y McConkey, 2000; West y Marland, 2002). Sin embargo, aún resta por instrumentar sistemas permanentes de monitoreo en escalas medias temporales y espaciales para comprender el sentido de estas variaciones. Por tanto la evaluación de la dinámica espacial de la materia orgánica del suelo, implica en primer lugar disponer de la información necesaria sobre el desempeño espacial y temporal de la vegetación (Larson *et al.* 1972; Rasmussen *et al.* 1980; Hassink y Whitmore 1997). Las técnicas de teledetección asociadas a los Sistemas de Información Geográfica, constituyen una de las principales herramientas para resolver este problema (Kontoes *et al.* 1993; Price *et al.* 1992; Lauver *et al.* 1993). La disponibilidad creciente de imágenes de alta resolución, así como la evolución constante de la informática constituyen elementos que facilitan la expansión de estas técnicas (Pax-Lenney y Woodcock, 1997; Guerschman *et al.* 2002; Seyler *et al.* 2002; Oetter *et al.* 2000). En los últimos años también se registran aumentos sostenidos en el uso de imágenes de baja resolución para el monitoreo de la variación anual de la productividad de la vegetación en escalas pequeñas de análisis (Defries *et al.* 1999; Carreiras *et al.* 2002).

El seguimiento de la productividad, el desempeño temporal y espacial de la vegetación ha sido uno de los principales desafíos en la investigación a partir de técnicas de teledetección, (Moulin *et al.* 1997; Clevers, 1997; Moulin *et al.* 2003). Progresivamente se han obtenido importantes resultados en la evaluación de la cobertura vegetal del suelo (Qin, 1993; Ray y Murray 1996; Asner *et al.* 2000; Braun y Hense, 2004).

Sin embargo, la disponibilidad de datos generados por sensores remotos aún se mantiene entre la dicotomía de sacrificar la resolución temporal o la resolución espacial.

Para evaluar el desempeño de la vegetación es necesario disponer de altas frecuencias temporales, lo que implica trabajar con baja resolución espacial (Guissard, *et al.* 2004). Esto plantea un problema metodológico complejo al intentar evaluar la dinámica espacial y temporal de la vegetación a partir de bajas resoluciones espaciales, en especial en zonas de paisaje heterogéneo. Las evaluaciones de vegetación a partir de sensores con baja resolución han generado muchos problemas de interpretación por la confusión al interior del pixel (Kogan, 1990; Guissard, *et al.* 2004). En los últimos años se realiza un gran esfuerzo en la investigación que conduzca a la resolución de este problema utilizando los datos de terreno o de sensores de alta resolución para la interpretación de los datos de baja resolución (Tian, *et al.* 2002). La diversidad de aplicaciones de estas técnicas ha presentado un importante aumento (Hedley y Mumby, 2003) en los últimos años. Las técnicas experimentales de Unmixing constituyen una de las principales líneas de investigación hacia la solución de este problema (Genovese, *et al.* 2001), sin lograr una solución definitiva del problema. Su resolución aún se mantienen a dos niveles, la resolución geométrica o la resolución específicamente conceptual.

Otra solución posible es trabajar con la identificación de los pixeles “puros” (Guissard, *et al.* 2004), es decir pixeles que cubren una sola unidad de vegetación y a partir de ellos evaluar su comportamiento temporal.

El estudio de la vegetación a través de imágenes de alta y baja resolución, permite realizar la cartografía de la distribución espacial y temporal de la cobertura vegetal, con altos niveles de precisión (Soegaard *et al.* 2003; Xiao *et al.* 2002; Cihlar *et al.* 2002; Qi *et al.* 2000). Esta metodología de trabajo permite la interpretación de la heterogeneidad espacial de la información contenida en las imágenes NDVI (AVHRR, VEGETATION, etc.). En estas imágenes de baja resolución se define que existe un aumento de la probabilidad de mezcla de unidades de cobertura del suelo en la medida que disminuye la resolución espacial, sin embargo la alta frecuencia temporal entre imágenes aumenta su potencial de utilización (Aman *et al.* 1992; Chen *et al.* 2002; Rahman *et al.* 2003).

Los índices de vegetación se han convertido en las principales fuentes de información para realizar el monitoreo y espacializar en forma cartográfica los resultados de los cambios de la cobertura vegetal. El índice de vegetación más utilizado en este contexto es el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), que representa una función de bandas espectrales correspondientes al rojo e infrarrojo cercano (Rouse *et al.* 1974; Tucker, 1979).

$$\text{NDVI} = (\text{PIR}-\text{R}) / \text{PIR}+\text{R}$$

La diferencia entre las bandas roja e infrarroja es un indicador fuerte de la cantidad de biomasa verde fotosintéticamente activa (Tucker, 1979). Este índice es ampliamente utilizado a diversas escalas: locales, regionales, continentales y globales (Estreguil, 1996 ; Girard, 1989 ; Paruelo *et al.* 2001). La utilización de SIG y la teledetección consiste en unir dos tecnologías que componen un sistema sinérgico, particularmente bien adaptado para los estudios del comportamiento de la vegetación (Chen *et al.* 2002).

Por otra parte, evaluar las modificaciones del territorio, considerando diversas escalas espaciales y temporales, es un factor de primer orden para la toma de decisiones en todas las instancias de gestión. La creación de una base de datos sobre usos del suelo, dinámica y con actualización permanente, constituye una herramienta potente para orientar la gestión ambiental del territorio (Chen, 2002). La integración de imágenes de alta y baja resolución, que permiten su utilización sistemática en el tiempo, es otro de los insumos fundamentales para avanzar hacia la organización de la información. La construcción de bases de datos que contengan esta información georreferenciada constituyen entonces la base de todo trabajo de planificación territorial.

En la cuenca del A° Sánchez, se define un área piloto, para evaluar las potencialidades y restricciones en la utilización de técnicas de teledetección multitemporal y multiresolución integradas en un Sistema de Información Geográfica, como metodología de trabajo que permita satisfacer la necesidad de contar con información actualizada de los usos y coberturas del suelo. Considerando la importancia en el manejo de esta información para los diferentes organismos y dependencias estatales y la posibilidad de generar información para todo el territorio nacional, se buscó con la construcción de las clases suelo-vegetación, realizar una sistematización primaria que posteriormente permita su estandarización en todo el territorio nacional.

La adopción de criterios abiertos y flexibles en la definición de las clases de unidades suelo – vegetación, permitirá a posteriori avanzar en clasificaciones más detalladas sin generar inconsistencias con la base del sistema general.

Los principales beneficios de la metodología de trabajo se pueden resumir en:

- Evaluar territorialmente la distribución espacial de los recursos naturales.

- Disponer de una herramienta para los planes de manejo de los recursos naturales.
- Evaluar en forma sistemática los cambios globales de los ecosistemas y tecnosistemas.
- Disponer de información a escala intermedia para evaluar la fragmentación de los ecosistemas naturales.
- Monitorear e inventariar en forma continua los cambios en el uso del suelo.
- Generar información cartográfica (cuantitativa y cualitativa) sobre la distribución espacial de la productividad vegetal y su actualización permanente.
- Identificar y evaluar áreas con procesos de degradación de tierras.
- Determinar tendencias y construcción de escenarios a mediano y largo plazo de acuerdo a las distintas modalidades de uso de la tierra.

La metodología de trabajo propuesta y utilizada para la resolución práctica de estos problemas, sintetizada en la figura 9 (Anno *et al.* 2003; Achkar *et al.* 2004a), se construye para permitir una aproximación al sistema dinámico de distribución espacial de las unidades de vegetación.

El objetivo principal de esta parte consiste en definir unidades suelo-vegetación y analizar su comportamiento temporal y espacial integrando sensores remotos alta y baja resolución en ambiente SIG y analizar el comportamiento de las unidades suelo-vegetación durante el periodo 1/4/1998 a 21/12/2003.

## **A) MATERIALES y MÉTODOS**

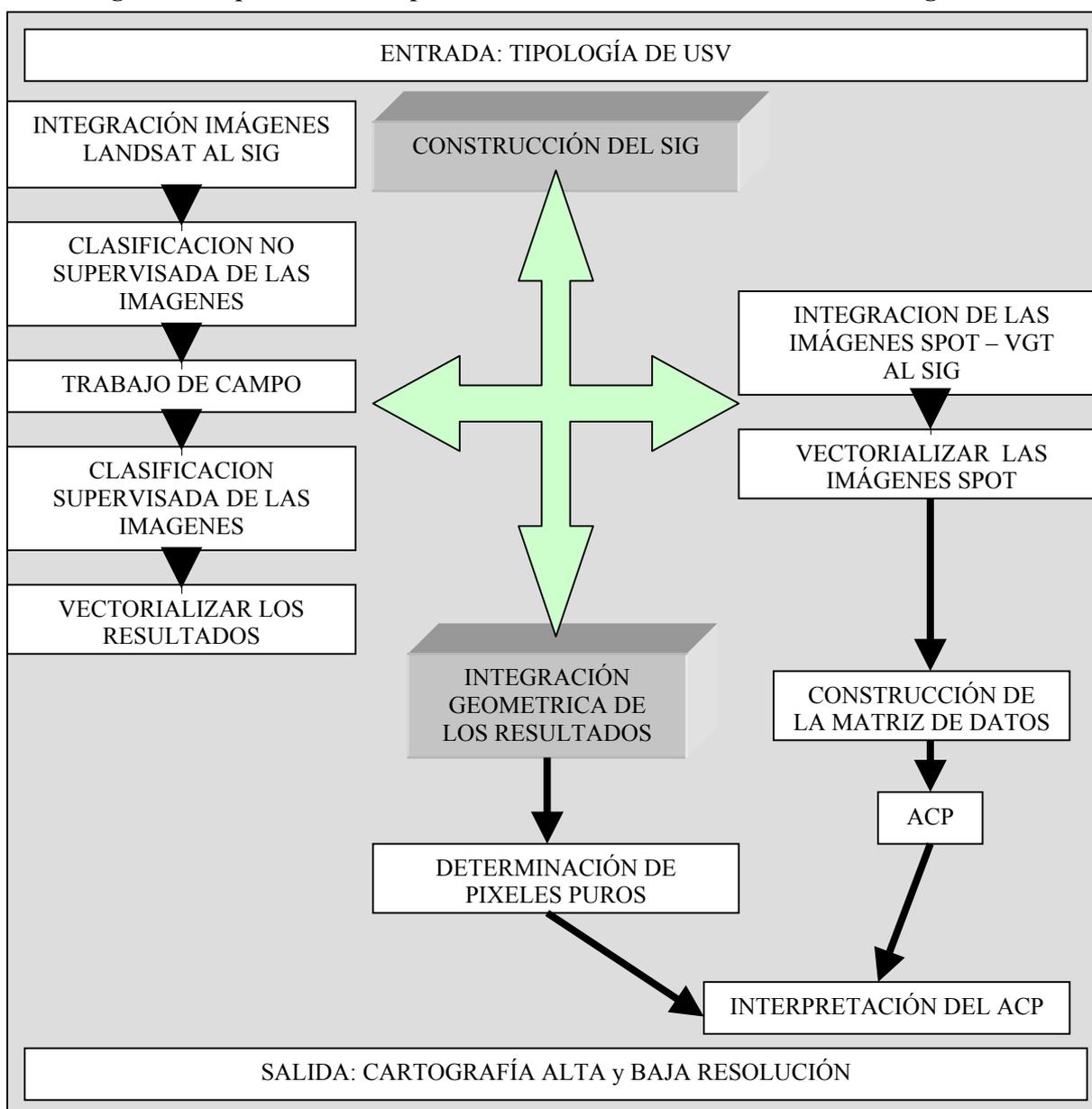
El esquema lógico de la metodología propuesta consiste básicamente en 4 pasos sucesivos:

- a) En la primera etapa se elabora una tipología de unidades homogéneas que comprenden un complejo de vegetación suelos y usos del suelo (USV) de acuerdo a la situación actual de la cuenca, para ello se toman en cuenta las unidades de suelo, la vegetación natural de la región y el uso actual del suelo.

- b) En segundo lugar se construye una base de datos georreferenciados a través de un SIG, que permita manejar por una parte la información física y socioeconómica y por otra parte los datos de teledetección iniciales y procesados.
- c) En tercer lugar se utilizan clasificaciones de imágenes de sensores remotos alta resolución (Landsat) y baja resolución (SPOT – Instrumento Vegetation, VGT) para estudiar la distribución espacio temporal de las unidades USV.
- d) Finalmente se analiza la evolución diacronica de cada una de las USV en el periodo 1998-2003 principalmente en función de criterios climáticos.

El esquema general (figura 7) permite ilustrar las diferentes etapas de la aproximación metodológica utilizada que se describe en detalle posteriormente.

**Figura 7: Esquema General para la evaluación de las Unidades Suelo - Vegetación**



## 1) Elaboración de una tipología de Unidades Suelo Vegetación (USV)

La elaboración de una tipología de unidades suelo – vegetación implica en todos los casos realizar una síntesis entre la distribución espacial de los ecosistemas y los tecnosistemas presentes en un territorio determinado (Gastó *et al.* 1993). Los ecosistemas naturales son el conjunto de estructuras relacionales que vinculan a los seres vivos entre ellos y con el ambiente inorgánico e integran las complejas interacciones geoambientales en el tiempo y el espacio.

Los tecnosistemas son sistemas donde la interacción de los componentes naturales están mediados por relaciones técnicas de origen antrópico (Sejenovich, 1996). Así es posible definir diversas clases de tecnosistemas de acuerdo a la magnitud de la mediación técnica: agrarios, forestales, urbanos, industriales, etc. con variaciones también en la alteración de las estructuras relacionales entre los elementos de la naturaleza.

Por extensión de estos criterios, es posible avanzar hacia una tipología de unidades de suelo – vegetación que integre la espacialidad genérica de la vegetación, como componente destacable de los ecosistemas terrestres, con la intensidad de la mediación técnica de los tecnosistemas agrarios.

Con esta interpretación conceptual sobre los usos del suelo, la distribución espacial de las unidades de suelos, la cartografía de suelos existente, las aproximaciones a la distribución de ecosistemas en el país, así como las interpretaciones agronómicas de los paisajes (MAP. DSF., 1979; Cayssials y Alvarez, 1983; Panario, 1987; Sganga, 1994; Rosengurtt, 1994; Panario, 1994; PNUD-DINAMA, 1999; Achkar *et al.* 1999) se definen 6 unidades suelo – vegetación.

Las unidades propuestas son definidas en base a la información disponible sobre la diversidad paisajística de la zona litoral del Río Uruguay, con uso agropecuario que integra la producción cerealera con la ganadería ovina y bovina de carne y leche. Integrando los usos de suelo más actuales en la zona, los cultivos forestales con especies de rápido crecimiento y en los últimos tres años el crecimiento del área ocupada por cultivos de soja.

Las seis unidades definidas presentan las siguientes características:

- a) **Forestal**, incluye los espacios ocupados por cultivos forestales con especies de rápido crecimiento. En especial para la cuenca del A° Sánchez se trata exclusivamente de cultivos de eucaliptos. Los suelos predominantes son Argisoles y en menor medida Brunosoles, el relieve está constituido por lomadas suaves.
- b) **Pastoril agrícola invernal**, son espacios fundamentalmente dedicados a la ganadería. El uso principal del suelo está dado por praderas naturales con predominio de gramíneas de ciclo invernal (*Bromus*, *Poa*, *Agrostis*, *Calamagrostis*, *Polypogon*, *Koeleria*, *Danthonia*, *Phalaris*, *Briza*, *Erlantheicum*, *Melica*, *Vulpia*, *Hordeum*, *Stipa*, *Piptocaetlum*, etc.); praderas artificiales invernales y cultivos forrajeros predominantemente con especies invernales y en menor representación cultivos agrícolas extensivos invernales. En la cuenca se destacan cultivos de: trigo, cebada cervecera y avena para grano. Los suelos predominantes son Brunosoles y en menor medida Vertisoles, en formas de relieve dominadas por colinas y lomadas fuertes.
- c) **Pastoril agrícola estival**, son espacios dedicados a la ganadería extensiva. El uso principal del suelo está dado por praderas naturales con predominio de gramíneas de ciclo estival (*Andropogon*, *Schizachyrium*, *Aristida*, *Panicum*, *Paspalum*, *Chioris*, *Bouteloua*, *Eleusine*, *Eragrostis*, *Sporobolus*, *Axonopus*, *Centchrus*, *Digitaria*, *Setaria*, *Stenotaphrum*, *Echinochioa*, *Coelorhachis*, etc.). En las posiciones bajas del paisaje estas praderas naturales son lindantes o están integradas al monte parque (comunidades de praderas con árboles y arbustos: *Acacia Farnesiana*, *Prosopis nigra*, *Prospopis Alagorrobilla*, etc.) y en los bordes de los cursos de agua están integradas con el monte fluvial. También se encuentran en esta unidad espacios con praderas artificiales y cultivos forrajeros con predominio de especies de ciclo estival, asociadas con áreas de cultivo agrícolas extensivos estivales principalmente para la zona son: maíz, girasol, sorgo y soja. Los suelos dominantes son Brunosoles y Argisoles en las áreas de lomadas y suelos asociados Gleysoles y Fluvisoles en las posiciones más bajas del paisaje (llanuras bajas).

- d) **Agrícola pastoril estival**, la composición de esta unidad es similar a la pastoril agrícola estival, en cuanto a las clases de uso del suelo que la componen, pero varían en la proporción siendo la clase cultivos agrícolas estivales la que ocupa la mayor superficie de la unidad. Los suelos dominantes son Brunosoles, en menor medida Argisoles y en las zonas bajas pueden ocurrir Vertisoles y Fluvisoles.
  
- e) **Agrícola pastoril invernal**, la composición de esta unidad es similar a la pastoril agrícola invernal, en cuanto a las clases de uso del suelo que la componen, pero varían en la proporción siendo la clase cultivos agrícolas invernales la que ocupa la mayor superficie de la unidad. Los suelos dominantes son Vertisoles y Brunosoles de textura pesada y alta fertilidad, en formas de relieve correspondientes a lomadas suaves a fuertes.
  
- f) **Agrícola**, esta unidad está formada por aquellas áreas de la cuenca casi exclusivamente dedicadas a las actividades agrícolas, con integración de cultivos de verano e invierno y rotaciones de cultivos agrícolas con la implantación de praderas artificiales. Es la unidad que presenta el uso del suelo más intensivo. Corresponden a las zonas con suelos de mayor fertilidad Vertisoles y Brunosoles en formas de relieve de lomadas suaves y llanuras medias.

## 2) Elaboración del SIG

### i) Problemática

Un SIG es un conjunto de principios, de métodos, de instrumentos y de datos georreferenciados utilizados para organizar, transformar, analizar, modelizar, simular y cartografiar fenómenos y procesos distribuidos en el espacio geográfico. Constituyen una herramienta operativa que permite resolver el problema de asociar información obtenida de fuentes diversas: clasificación de imágenes satelitales de alta y baja resolución, cartografía en papel, mapas temáticos disponibles, información de campo, datos estadísticos, etc. y a partir de ellos generar nueva información, proponer y comprobar hipótesis, para luego construir nuevas cartas sobre la base de las hipótesis comprobadas (Assad *et al.* 1998).

En este trabajo el SIG elaborado permitirá la agregación y el cruzamiento de información a partir de sus atributos espaciales con el objetivo de avanzar en la comprensión del funcionamiento del sistema cuenca.

## **ii) Base informática**

La base informática del SIG está compuesta por el programa ArcView SIG versión 3.2 y su extensión "Imagen Analisis" (productos desarrollados por la compañía ESRI Inc. USA.) y la extensión "Polygeom" (producto desarrollado por IFREMER Francia). El apoyo en tratamiento de imágenes satelitales, se realizó con el programa ENVI 3.5 (producto desarrollado por Research Systems Inc. USA). El apoyo en el tratamiento estadístico de las matrices de datos, se realizó con el programa SPSS 11.5 (producto desarrollado por SPSS Inc. USA).

Se seleccionó este conjunto de programas por la facilitación en el intercambio de información entre ellos sin procesos de transformación del formato de la información. La interface entre el Arc View y ENVI permite procesar imágenes satelitales en ambos programas con igual formato (tif. img.) manteniendo los atributos de georreferenciación. Por su parte el SPSS permite trabajar matrices de datos en formato dbf., y facilita el ingreso directo de las bases de datos desde y hacia el ArcView sin mediar ningún nivel de transformación.

## **iii) Información contenida en el SIG**

Respondiendo a las necesidades del trabajo, se entiende pertinente la construcción de cada cobertura de trabajo por la naturaleza de elementos a representar del espacio geográfico en estudio. Por otra parte, las distintas coberturas con la misma estructura básica de construcción se representan en coberturas de polígonos, de líneas o de puntos, dependiendo de los elementos que se trabajen. La primera etapa consistió en la construcción de las coberturas generales de representación de elementos geográficos e información secundaria disponible (tabla 11, figuras 8 y 9). El procedimiento para la creación de las coberturas básicas consistió en la metodología de "digitalización en pantalla" (Achkar, 2000b). La escala de trabajo de la cartografía de base esta dada por los elementos básicos de las cartas topográficas escala 1:50.000, de la cartografía del Servicio Geográfico Militar (SGM).

**Tabla 11: Coberturas de base del SIG**

<b>Cobertura</b>	<b>Escala inicial</b>	<b>Fuente</b>
Cursos de agua	1:50.000	Cartas: Young, Sánchez y Cololó, SGM., 1994
Caminería	1:50.000	Cartas: Young, Sánchez y Cololó, SGM., 1994
Curvas de nivel	1:50.000	Cartas: Young, Sánchez y Cololó, SGM., 1994
Padrones rurales	1:20.000	Catastro Rural, CONEAT. 1994
Parcelas	1:20.000	Elaboración propia lectura de imágenes Landsat
Suelos 1:1.000.000	1:1.000.000	MAP- DSF. 1979
Suelos CONEAT	1:20.000	CONEAT. 1994
MNT	30 metros	Elaboración propia en base a la grilla de Landsat

Posteriormente se desarrollan series de coberturas de información específicas del proyecto, en formato vectorial y raster según las necesidades operativas.

#### **iv) Referencial geográfico del SIG**

Todas las coberturas son trabajadas en coordenadas planas en el sistema Yacaré (sistema de coordenadas planas utilizado en la cartografía nacional). Sistema geodésico usado en Uruguay por el Servicio Geográfico Militar (SGM). Es un sistema de coordenadas local, el elipsoide asociado es Hayford 1909 (internacional 1924). La proyección es Gauss con distancia en metros, meridiano de contacto 62°, el origen de la cuadrícula es:  $X_0 = 500$  km. al oeste del meridiano 62°;  $Y_0 =$  Polo Sur, el Datum horizontal es el punto Yacaré. Este sistema es empleado en toda la cartografía terrestre nacional. Para pasar del Sistema WGS84 al Sistema Yacaré los valores de los deltas de pasaje son:

$$\lambda_x = +155$$

$$\lambda_y = -171$$

$$\lambda_z = -37$$

(François, 2000)

En base a estas consideraciones generales se optó por instrumentar el SIG utilizando el sistema Yacaré de coordenadas planas, ya que casi la totalidad de la información cartográfica disponible en el país se ha desarrollado con este sistema y por lo tanto su utilización favorece un intercambio directo de información, en el mediano y largo plazo. Además, como es posible disponer de los parámetros de pasaje desde el sistema en que se encuentra la información de las imágenes satelitales, se comprende que es más sencillo transformar las coordenadas de las imágenes que transformar el conjunto de la

información utilizada. El resultado constituye un SIG operativo que contiene toda la información generada en el trabajo y que ha posibilitado a lo largo del mismo generar nueva información en base a los atributos espaciales de los elementos contenidos en el sistema.

FIGURA 8: COBERTURAS BASE EN LA CUENCA

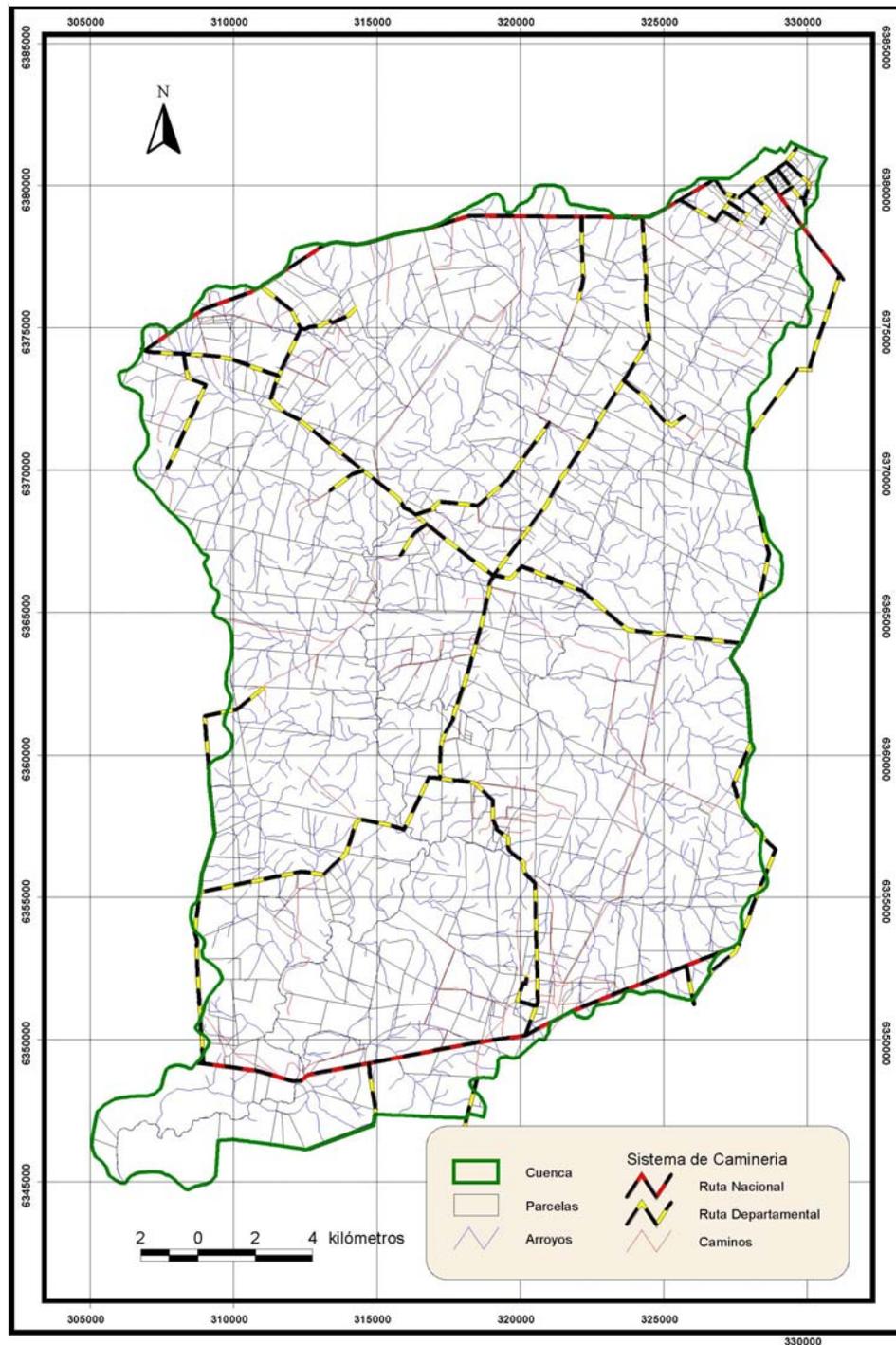
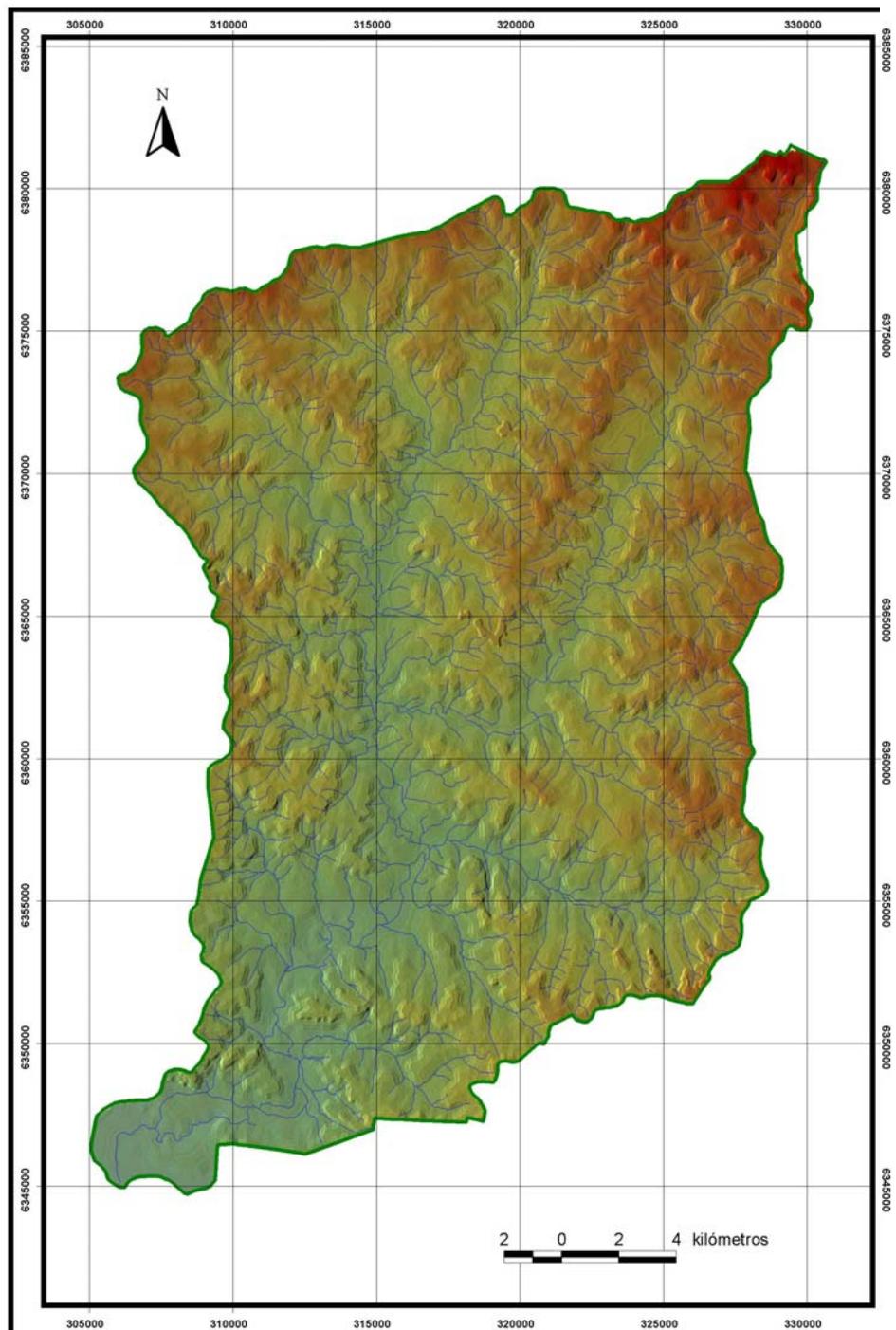


FIGURA 9: MNT CUENCA DEL ARROYO SÁNCHEZ



### 3) Teledetección

#### i) Problemática

En esta etapa del trabajo se utiliza la teledetección para estudiar y evaluar la distribución espacio temporal de las USV. Por lo cual fue necesario diseñar la elaboración de una base de datos que permitiera cumplir con tres características: a) disponer de una serie de

fuentes de información extensa en el tiempo y con alta frecuencia entre fechas; b) disponer en el sistema de la mejor resolución espacial posible; y c) que el costo de adquisición fuera mínimo. La resolución de estos tres requerimientos se logró mediante un proceso metodológico de integración de sensores de alta y baja resolución espacial. Como imágenes de alta resolución se optó por la adquisición de imágenes Landsat, ya que: son las más utilizadas en Uruguay, existía disponibilidad de una imagen en nuestro laboratorio y en el momento de comienzo de la tesis resultaban menos costosas que otras imágenes de similar resolución espacial. En el caso de las imágenes baja resolución, las opciones disponibles en su momento fueron las imágenes AVHRR, que fueron descartadas por la escasa estabilidad radiométrica en las longitudes de onda corta dependientes de los ángulos de observación y sus dificultades para georreferenciar en forma sistemática (Chuvieco *et al.* 2001). Mientras que las imágenes SPOT-VGT, que comenzaba su política de libre recepción, presentan la misma resolución espacial (1 km<sup>2</sup>), mejora la estabilidad radiométrica y geométrica con lo cual facilita y minimiza los tiempos de preprocesamiento y permitió disponer de una serie temporal suficientemente amplia, 6 años ([www.spot-vegetation.com](http://www.spot-vegetation.com)).

Hoy están disponibles nuevos productos generados por otros sensores remotos, que contienen información estable y con mejor resolución espacial (HYPERION, ASTER, MODIS, MERIS), pero que no estaban disponibles al comienzo de la tesis (2001), o que no permitían una serie histórica suficientemente amplia.

## **ii) Imágenes satelitales**

### **a) Imágenes Alta Resolución (IAR) Landsat**

El programa Earth Resources Technological Satellite (ERTS) de la NASA, ha desarrollado a partir de 1966 los satélites Landsat con el objetivo de observar la superficie de la tierra. En 1972 comienza a funcionar Landsat 1 con captor Thematic Mapper y en 1976 Landsat 2 con captor Thematic Mapper. En 1982 comienza a funcionar Landsat 3 con captor Thematic Mapper y en 1984 comienza a funcionar Landsat 4 con captor Thematic Mapper. En 1991 comienza a funcionar Landsat 5 con captor Thematic Mapper Plus. La altitud estándar es de 705.3 km., la periodicidad de pasaje 16 días generando escenas de 170 por 185 km. Landsat utiliza captadores multispectrales en 7 bandas espectrales de alta resolución espacial, que corresponde a 30 m para las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7. La banda 6 correspondiente al infrarrojo térmico, tiene una resolución de 120 m en Landsat 5TM y de 60 m en Landsat 7 ETM+ (tabla 12)

**Tabla 12: Longitud de onda de las bandas Landsat en micrones.**

<b>Bandas</b>	<b>LANDSAT 5 TM</b>	<b>LANDSAT 7 ETM+</b>
<b>1 – Azul</b>	0,45 – 0,52	0,45 – 0,515
<b>2 – Verde</b>	0,52 – 0,60	0,525 – 0,605
<b>3 – Rojo</b>	0,63 – 0,69	
<b>4 – IR cercano</b>	0,76 – 0,90	
<b>5 – IR Medio</b>	1,55 – 1,75	
<b>6 – IR Lejano</b>	10,4 – 12,4	10,40 – 12,5
<b>7 – IR Medio</b>	2,08 – 2,35	2,09 – 2,35

Fuente: [www.gsfc.nasa.gov](http://www.gsfc.nasa.gov)

La imagen Landsat obtenida por el sensor tiene valores de contaje, Digital Number (DN), que varían entre 0 y 255, en cada banda. Derivado de  $2^8 = 256$ .

Estos valores no tienen un significado físico directo, por ello es necesario convertir estos valores a Radiancia y a Reflectancias (Presutti, 2003).

La relación entre DN y radiancias esta dada por la siguiente ecuación lineal:

$$L = a_0 DN + a_1$$

Los coeficientes  $a_0$  y  $a_1$  gain y offset respectivamente se obtienen del Header de la imagen y son fijos para el sensor.

La radiancia medida por el sensor depende de la irradiancia solar al tope de la atmósfera, por lo cual debe normalizarse a reflectancias para poder comparar valores entre fechas diferentes. La ecuación usada para calcular las reflectancias es:

$$\rho(\lambda) = LB * d^2 / E_i(\lambda) * \cos(\theta)$$

Donde:

$\rho(\lambda)$  Reflectancias al tope de la atmósfera

$L$  Radiancias

$d$  Distancia tierra-sol

$E_i(\lambda)$  Irradiancia solar

$\theta$  Angulo cenital solar

Los valores utilizados en la calibración de las imágenes trabajadas se detallan en la tabla 13. Como en este trabajo se utilizaron imágenes Landsat 5 y Landsat 7, se incorporan los dos sistemas de valores utilizados, para obtener los valores de reflectancias

**Tabla 13: Valores utilizados para convertir los DN a radiancia y reflectancia para el Sensor TM del satélite Landsat 5 y para el Sensor ETM+ del satélite Landsat 7.**

Banda	LANDSAT 5 TM			LANDSAT 7 ETM+		
	A <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	Irradiancia [W/m <sub>2</sub> *µm]	a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	Irradiancia [W/m <sub>2</sub> *µm]
1	-1.5	0.7314	185.0	-6.2	0.7757	1969.0
2	-3.1	1.3533	342.0	-6.4	0.7957	1840.0
3	-2.7	0.9714	245.0	-5.0	0.6192	1551.0
4	-2.5	1.0686	270.0	-5.1	0.9655	1044.0
5	-0.45	0.1429	36.0	-1.0	0.1257	225.7
7	-0.30	0.0757	19.0	-0.35	0.0430	1368.0

Fuente: [www.gsfc.nasa.gov](http://www.gsfc.nasa.gov)

A partir de estas transformaciones se trabajó con los valores de reflectancia con las cinco imágenes utilizadas. Esto posibilitó la comparación de valores entre las imágenes que corresponden a distintas fechas. Incluso los valores de NDVI se calcularon a partir de los valores de reflectancia en las bandas 3 y 4. En cuanto a la corrección geométrica de las imágenes se realizó mediante técnicas convencionales utilizando puntos tomados de las cartas topográficas.

Se seleccionaron 5 imágenes Landsat del área de trabajo que abarcan el periodo 1998 – 2002, en la tabla 14 se presentan las fechas de cada imagen.

**Tabla 14: Escenas Landsat**

Path/Row	Sensor	Fecha	Estación
225-083	5 TM	21/11/1998	Primavera
225-083	7 ETM+	20/12/2000	Verano
225-083	7 ETM+	11/4/2001	Otoño
225-083	7 ETM+	30/6/2001	Invierno
225-083	7 ETM+	21/9/2002	Primavera

#### **b) Imágenes Baja Resolución (IBR) SPOT – VGT.**

El programa SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre) comienza a fines de la década de 1970, los satélites SPOT se ubican a una altura de 820 km. y el ciclo de recubrimiento es de 26 días. Estos satélites están equipados con captadores de alta resolución espacial, 20 m y registran información en espectro electromagnético correspondiente al visible y al infrarrojo cercano.

Los satélites SPOT 4 y 5 disponen de un “INSTRUMENTO VEGETATION” de baja resolución que registra información en cuatro bandas espectrales (tabla 15) y permite

disponer para cada día de imágenes de 1km<sup>2</sup> de resolución para casi la totalidad de las tierras emergidas del planeta.

**Tabla 15: Longitud de onda de las bandas SPOT – VGT en micrones.**

<b>Bandas</b>	<b>Longitud de onda</b>
0 – Azul	0,43 – 0,47
2 – Rojo	0,61 – 0,68
3 – IR Cercano	0,78 – 0,89
4 – IR Medio	1,58 – 1,75

Fuente: <http://www.spot-vegetation.com>

El instrumento Vegetation de SPOT, es el resultado de un esfuerzo conjunto entre el Centro National d'Etudes Spatiales (CNES) de Francia, Bélgica, Suecia, Italia y la Comisión Europea. Este sistema fue creado para ofrecer una fuente de información permanente que permite realizar análisis globales, continentales y regionales.

Las principales características que se destacan en sus productos son:

- La sensibilidad del sistema captor a la actividad fotosintética de las plantas en especial las imágenes NDVI continentales con un frecuencia temporal de 10 días.
- La alta precisión geométrica de los productos que facilita su operabilidad.
- La disponibilidad de productos sistemáticos corregidos para su utilización directa.
- La posibilidad de acceso libre por Internet.

Los productos del sistema SPOT – VGT están disponibles a partir de 1/4/1998 y presentan un gran potencial de aplicación en estudios ambientales a diversas escalas.

Las imágenes NDVI de SPOT-VGT contienen la información en valores numéricos (DN) con una amplitud de 256 (0 a 255), estos valores corresponden a una función lineal del NDVI:

$$\text{NDVI} = (\mathbf{a} * \text{DN}) + \mathbf{b}$$

Con

$$a = 0.004$$

$$b = -0.1$$

Fuente: <http://www.spot-vegetation.com>

### **iii) Metodología**

Esquemáticamente los métodos de clasificación de imágenes satelitales se pueden organizar en tres grandes grupos, dentro de los cuales existen por su parte diversas metodologías específicas según los objetivos de cada trabajo en particular. Estos tres grupos son:

- La interpretación visual o imagen lectura, se trata de la lectura de la información de la imagen e interpretación por parte del operador. Esta metodología tiene la ventaja de ser precisa pero depende fuertemente de la experiencia del operador. Por otra parte tiene la desventaja de ser lenta en el tiempo lo cual la inhabilita para estudios de series de imágenes multitemporales. Esta metodología fue utilizada para separar las parcelas de manejo presentes en la cuenca.
- La clasificación radiométrica multiespectral, presentan la ventaja de su rapidez en la clasificación, en especial cuando se dispone de mucha información de campo. Sin embargo aumenta su limitación de aplicación en la medida que disminuye la resolución espacial de la imagen, particularmente por la mezclas de vegetación al interior del pixel, lo cual imposibilita su aplicación en las IBR. Esta metodología de clasificación se usa en el caso de las imágenes Landsat TM.
- Análisis estadístico a partir de índices con significado físico en la realidad, por ejemplo el NDVI. Este conjunto de métodos presenta las ventajas de la rapidez de procesamiento, se adapta bien al trabajo con IBR y en especial es muy operativo para el procesamiento de series grandes de imágenes. Presenta como limitación utilizar solo una parte de la información disponibles en las imágenes, por lo cual constituye una aproximación global al problema analizado. Esta metodología será la empleada para el procesamiento de las imágenes SPOT-VGT.

#### **a) Clasificación de IAR**

Para la determinación del uso de suelo, se trabajó con la combinación de las bandas 3, 4 y 5 de las imágenes Landsat. Las cinco imágenes son integradas al SIG, previamente georreferenciadas en el sistema Yacaré.

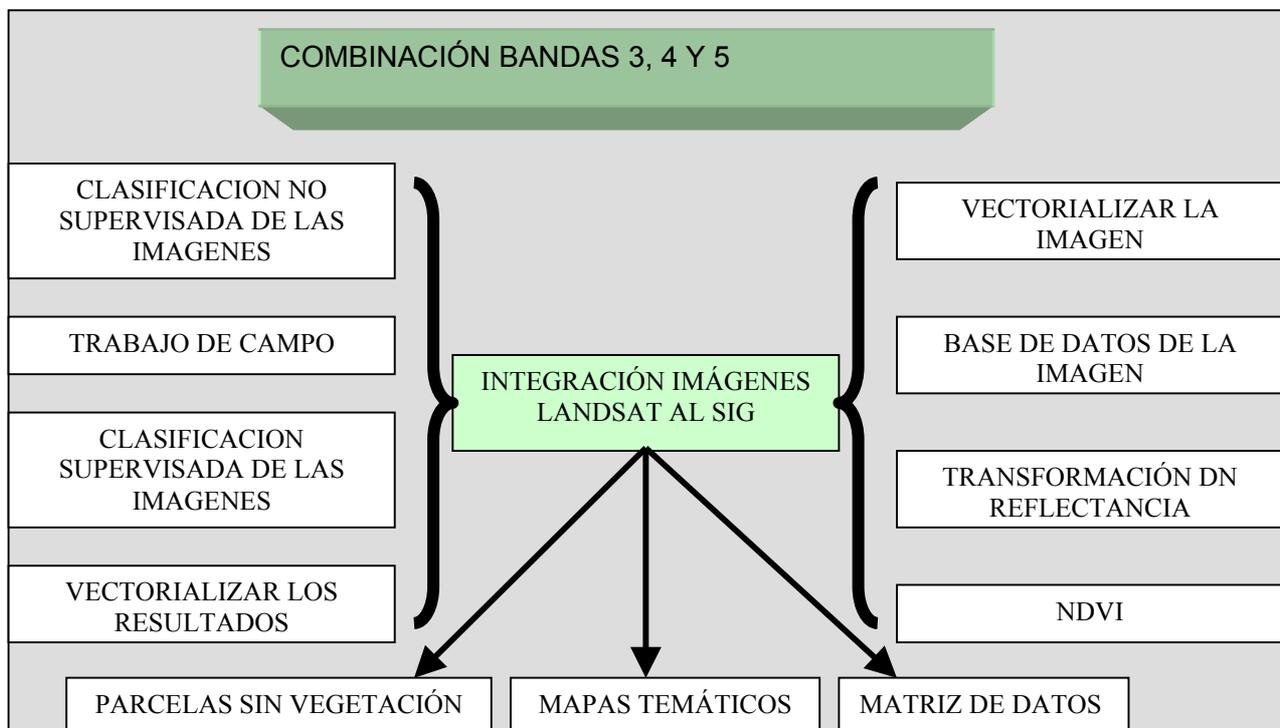
Las imágenes son integradas al SIG y se realizan clasificaciones no supervisadas, para orientar las campañas de terreno. En dos campañas de terreno se obtuvo la información necesaria sobre usos del suelo (información georreferenciada en campo), para realizar las clasificaciones supervisadas de las imágenes. El apoyo de campo se realiza mediante las cartas topográficas de la cuenca y las impresiones de las clasificaciones no

supervisadas de las imágenes. En estas campañas el relevamiento de información consistió en la identificación de parcelas específicas, y en reseñar el uso del suelo para cada una de las fechas de las imágenes mediante observación directa y entrevista a los productores rurales. Las parcelas identificadas fueron separadas en dos grupos, representativos de cada uso del suelo, que permitieron realizar las clasificaciones supervisadas y a posteriori construir las matrices de confusión.

Con la información obtenida en el campo se realizan las clasificaciones supervisadas de las imágenes Landsat, tomando como áreas de entrenamiento las parcelas con información que se obtuvieron en el campo. La metodología de clasificación se realizó por extracción de clases en forma progresiva. Para las clases con menor dificultad (forestal, campo natural) se trabajo directamente con el ArcView y en los niveles más complejos con ENVI con el método de máxima similitud.

En la figura 10 se presenta un esquema del trabajo realizado a partir de las imágenes Landsat para elaborar las cartas temáticas de uso del suelo, identificar las parcelas con suelo descubierto y construir la matriz de datos con la información de 6 bandas a nivel de pixel.

**Figura 10 - Esquema de trabajo con imágenes Landsat**



Para la clasificación supervisada se construyó una leyenda operativa con ocho clases:

- **Forestal:** incluye los cultivos forestales con especies de rápido crecimiento (eucaliptos).
- **Monte natural y parque:** incluye a los montes fluviales y a las comunidades de praderas con árboles y arbustos (acacia farnesiana, *Prosopis nigra*, *Prosopis alagorrobilla*, etc.).
- **Campo natural invernal:** incluye a las praderas naturales con predominio de gramíneas de ciclo invernal (*Bromus*, *Poa*, *Agrostis*, *Calamagrostis*, *Polypogon*, *Koeleria*, *Danthonia*, *Phalaris*, *Briza*, *Erlantheicum*, *Melica*, *Vulpia*, *Hordeum*, *Stipa*, *Piptocaetlum*, etc.).
- **Campo natural estival:** incluye a las praderas naturales con predominio de gramíneas de ciclo estival (*Andropogon*, *Schizachyrium*, *Aristida*, *Panicum*, *Paspalum*, *Chioris*, *Bouteloua*, *Eleusine*, *Eragrostis*, *Sporobolus*, *Axonopus*, *Centchrus*, *Digitaria*, *Setaria*, *Stenotaphrum*, *Echinochloa*, *Coelorhachis*, etc.).
- **Cereales invernales:** incluye a los cultivos agrícolas extensivos invernales principalmente para la zona de estudio son cultivos de trigo, cebada cervecera y avena para grano.
- **Cereales estivales:** incluye a los cultivos agrícolas extensivos estivales principalmente para la zona son maíz, girasol, sorgo y soja.
- **Praderas invernales:** son praderas artificiales y cultivos forrajeros con predominio de especies invernales.
- **Praderas Estivales:** son praderas artificiales y cultivos forrajeros con predominio de especies estivales.

Los resultados obtenidos de las clasificaciones supervisadas son vectorializadas para facilitar el análisis espacial y posteriormente la integración de la información con las imágenes de baja resolución. Las tablas 16 a 20 presentan las matrices de confusión para las clasificaciones de cada una de las imágenes Landsat. Los polígonos de “realidad terreno” para la construcción de las matrices de confusión, suman más de 150 hectáreas por clase en todos los casos.

Tabla 16: Matriz de confusión, clasificación de la escena 21/11/1998

		1	2	3	4	5	6	7	8	No Clas.	Total
Forestal	1	83,2	1,5	2,7	5,3	4,6	1,3	0	1,4	0	100
Monte Natural y Parque	2	2	83,2	2,1	4,6	3,1	2,5	1,2	1,3	0	100
Campo Natural Invernal	3	0	2,5	81	5,7	2,3	1,6	3,2	1,4	2,3	100
Campo Natural Estival	4	1,5	4,9	0	91,8	0,8	0	0,7	0,2	0,1	100
Cereales Invernales	5	0	0	3	0,6	86	1	5,2	3,8	0,4	100
Cereales Estivales	6	3,2	0	1,6	0	4,8	89	1,2	0	0,2	100
Praderas Invernales	7	2,5	1,2	5,2	0,2	5,3	1	82,3	0,8	1,5	100
Praderas Estivales	8	0	5,2	1	0,3	0,3	0,2	0	93	0	100
Total		92,4	98,5	96,6	109	107	96,6	93,8	102	4,5	800

Tabla 17: Matriz de confusión, clasificación de la escena 20/12/2000

		1	2	3	4	5	6	7	8	No Clas.	Total
Forestal	1	98,1	0,6	0	0	0	0,2	0	1,1	0	100
Monte Natural y Parque	2	3,5	67,5	4,2	6,8	0,4	4,5	0,5	10,3	2,3	100
Campo Natural Invernal	3	0,2	1,2	85,3	3,4	1,3	3,6	1,8	0,8	2,4	100
Campo Natural Estival	4	0,6	1,3	0,5	93,5	1,2	0,8	0	1,4	0,7	100
Cereales Invernales	5	0	1,2	2,3	0,2	92,1	0,5	0,2	3,5	0	100
Cereales Estivales	6	3,6	0,6	1,3	0,2	1,5	88,2	2,3	1,8	0,5	100
Praderas Invernales	7	1,3	3,6	7,9	1,2	4,6	0,4	79,3	1,3	0,4	100
Praderas Estivales	8	0,5	0,3	0,2	2,5	0,2	0,9	0,1	95,3	0	100
Total		108	76,3	102	108	101	99,1	84,2	116	6,3	800

Tabla 18: Matriz de confusión, clasificación de la escena 11/4/2001

		1	2	3	4	5	6	7	8	No Clas.	Total
Forestal	1	94,3	2,5	0	1,3	0	1,3	0,2	0	0,4	100
Monte Natural y Parque	2	3,2	79,2	2,3	5,8	3,2	2,3	1,5	2,1	0,4	100
Campo Natural Invernal	3	0,2	5,6	86,4	0,3	1,2	1,4	2,4	0,8	1,7	100
Campo Natural Estival	4	4,5	3,6	0,5	82,4	0,5	3,7	1,8	2,5	0,5	100
Cereales Invernales	5	0	0,2	1,5	0	94,3	0,5	1,8	1,3	0,4	100
Cereales Estivales	6	4,6	2,3	0,9	5,6	3,4	74,5	3,2	4,5	1	100
Praderas Invernales	7	0,3	2,3	2,4	0	1,8	0,5	92,3	0,4	0	100
Praderas Estivales	8	2,5	1,2	3,2	7,6	0,5	0,8	0	83,9	0,3	100
Total		110	96,9	97,2	103	105	85	103	95,5	4,7	800

Tabla 19: Matriz de confusión, clasificación de la escena 30/6/2001

		1	2	3	4	5	6	7	8	No Clas.	Total
Forestal	1	98,3	0,5	0	0,2	0	0,3	0,5	0	0,2	100
Monte Natural y Parque	2	4,2	69,5	3,5	8,9	5	7,7	1,2	0	0	100
Campo Natural Invernal	3	0,3	2,3	82,3	3,7	0,9	2,7	3,9	1,7	2,2	100
Campo Natural Estival	4	3,5	6,7	0,5	81,3	1,5	0,6	2,3	3,4	0,2	100
Cereales Invernales	5	0	0	1,2	0,6	92,3	0,5	2,5	2,9	0	100
Cereales Estivales	6	0,5	4,9	0,9	3,7	3,2	78,6	3,4	4,6	0,2	100
Praderas Invernales	7	0	1,2	3,2	0	0,3	0	95,3	0	0	100
Praderas Estivales	8	2,1	5,8	0,3	4,5	2,6	0,4	0	84,3	0	100
Total		109	90,9	91,9	103	106	90,8	109	96,9	2,8	800

Tabla 20: Matriz de confusión, clasificación de la escena 21/9/2002

		1	2	3	4	5	6	7	8	No Clas.	Total
<b>Forestal</b>	<b>1</b>	<b>89</b>	7,3	0,5	2,4	0	0,5	0	0,3	0	100
<b>Monte Natural y Parque</b>	<b>2</b>	0	<b>99,3</b>	0,1	0	0,2	0	0	0	0,4	100
<b>Campo Natural Invernal</b>	<b>3</b>	0	0,2	<b>95,4</b>	0,4	0	1,3	0,2	2,5	0	100
<b>Campo Natural Estival</b>	<b>4</b>	0,5	3,5	0	<b>92,3</b>	0,5	0,4	0,9	1,1	0,8	100
<b>Cereales Invernales</b>	<b>5</b>	1,5	0	1,2	0	<b>89,4</b>	1,3	2	3,5	1,1	100
<b>Cereales Estivales</b>	<b>6</b>	0,3	0,6	0,2	0,4	3,7	<b>91,8</b>	2,4	0,6	0	100
<b>Praderas Invernales</b>	<b>7</b>	0,4	0,6	5,2	2,4	1,2	1	<b>88,4</b>	0	0,8	100
<b>Praderas Estivales</b>	<b>8</b>	2,3	8,9	3,5	7,8	2,3	5,1	0,5	<b>69,5</b>	0,1	100
<b>Total</b>		94	120	106	106	97,3	101	94,4	77,5	3,2	800

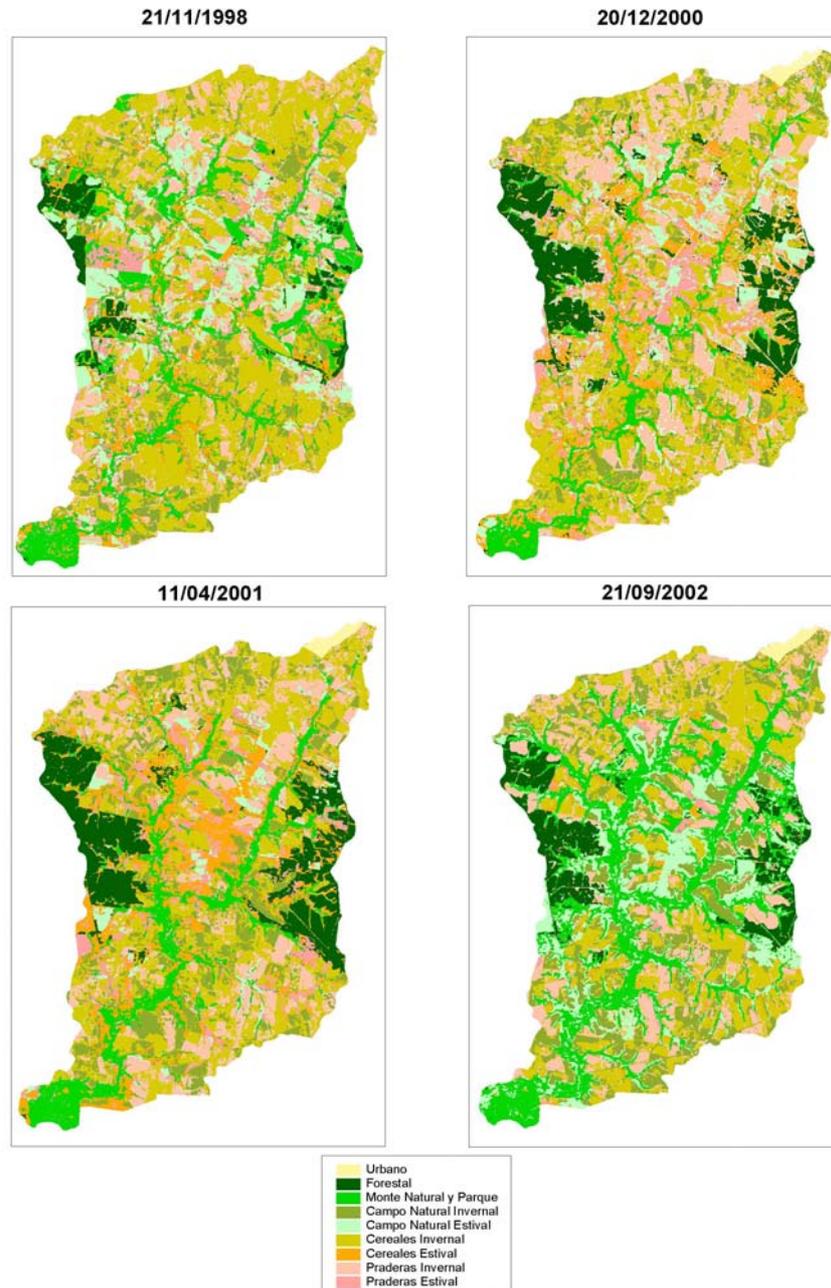
Tabla 21: Resultado global de las clasificaciones Landsat

Escenas Landsat	% Píxeles correctamente clasificados	% Píxeles mal clasificados
21/11/1998	86.19	13.81
20/12/2000	87.41	12.59
11/4/2001	85.91	14.09
30/6/2001	85.24	14.76
21/9/2002	89.39	10.61
<b>Media</b>	<b>86.83</b>	<b>13.17</b>

La precisión cartográfica global de las clasificaciones realizadas (balance entre los píxeles correctamente clasificados con la suma de los píxeles mal clasificados) se presenta en la tabla 21. En términos generales el 86,83 % de la superficie a sido bien clasificada, estos altos valores responden a la posibilidad de disponer de una buena base de información sobre el uso del suelo construida a partir de campañas de terreno, disponer en el SIG del parcelario rural elemento que facilita la rutina de clasificación de imágenes.

En la figura 11 se presenta la distribución espacial de los resultados obtenidos en la clasificación de las imágenes Landsat.

**FIGURA 11: CLASIFICACIÓN DE LAS IMAGENES LANDSAT  
CUENCA DEL A° SÁNCHEZ**



### **b) Clasificación de IBR**

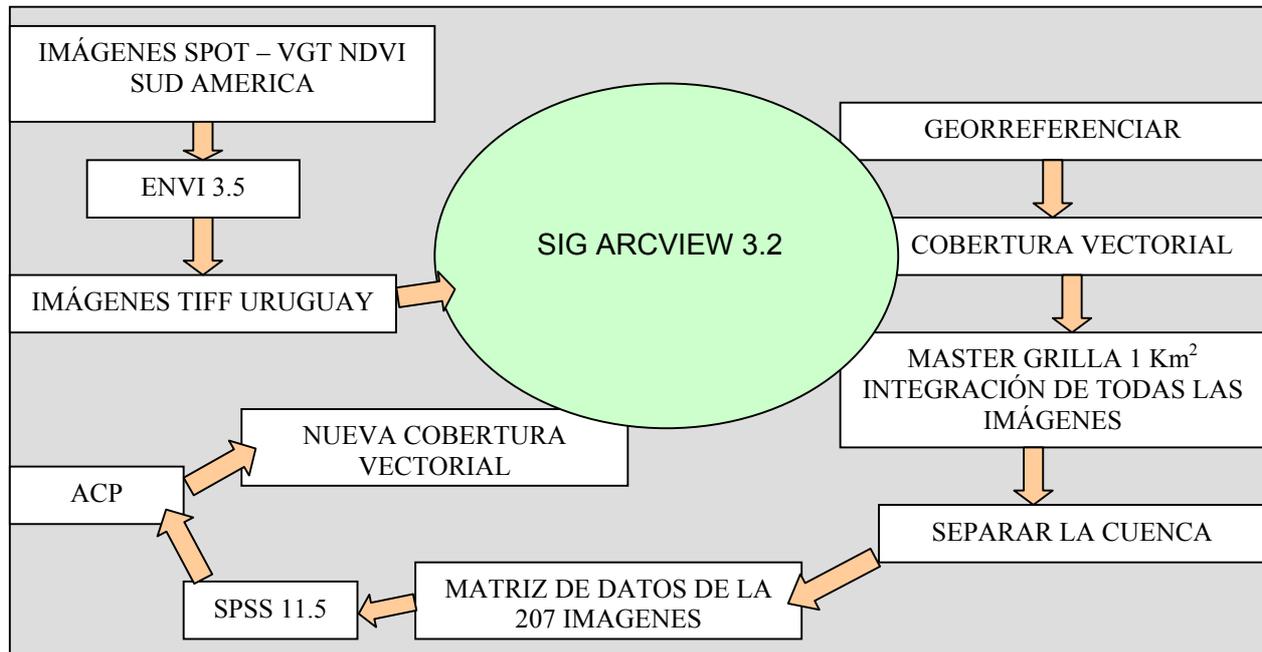
Se dispone de una serie de imágenes NDVI del instrumento SPOT-VGT que cubren el periodo 1/4/1998 al 21/12/2003, con frecuencia cada 10 días, con un total de 207 imágenes. Dado el alto número de imágenes utilizadas, fue necesario construir una rutina de trabajo que permitiera sistematizar la integración y procesamiento de las

imágenes en el SIG. En la figura 12 se presenta un esquema de la rutina de trabajo utilizada en el procesamiento de las imágenes SPOT-VGT, que abarca una serie de acciones integradas que se resumen a continuación:

- Captura de las imágenes NDVI desde el sitio web (<http://www.spot-vegetation.com>) y almacenamiento de las imágenes correspondientes a América del Sur.
- Transformación de las imágenes desde el formato hdf (formato original de las imágenes) al formato tiff, para esta transformación se utiliza el programa ENVI 3.5. El formato tiff posibilita la integración de las imágenes al SIG trabajado con el programa ArcView 3.2.
- Recortar las imágenes en un área que cubra todo el territorio del Uruguay, lo cual posibilitará su utilización futura en otras áreas del país.
- Georreferenciar las imágenes al sistema Yacaré.
- Vectorializar las imágenes, se obtiene una cobertura vectorial por imagen que consiste en una grilla de 1 km<sup>2</sup>, la cobertura contiene 214.871 polígonos.
- A partir de las coberturas vectoriales de las imágenes, se crea una cobertura única que integra la información de las 207 imágenes. Generando así una matriz de datos que contiene el total de la información. Hasta aquí el proceso se realiza cubriendo todo el territorio nacional, por lo cual se obtiene una matriz con 214871 registros y 207 variables.
- Desde la cobertura única que integra el total de la información se separa una cobertura que cubre la cuenca del A° Sánchez. Así se obtiene un matriz para la cuenca que contiene 787 registros (píxeles) y 207 variables.
- A partir de la matriz de datos en formato dbf se realiza el análisis de componentes principales (ACP) utilizando el programa SPSS 11.5.
- Los resultados del ACP son integrados al SIG para analizar su distribución espacial.
- Se compara geoméricamente, los resultados del ACP con los resultados obtenidos con las imágenes Landsat en el ambiente SIG.

Con los resultados obtenidos a partir del ACP, es posible diferenciar espacialmente seis clases suelo – vegetación. También es posible obtener la separación por clase de los distintos píxeles en la matriz de datos y a partir de la matriz de datos así organizada evaluar el comportamiento anual y estacional de las distintas unidades suelo – vegetación.

**Figura 12: Esquema del procesamiento de las imágenes NDVI**



Con la metodología de trabajo e integración al SIG de las imágenes SPOT –VGT, se construyó una matriz de datos constituida por 787 registros (número de píxeles que abarcan la cuenca del A° Sánchez) y 207 columnas que corresponden a los valores (DN) de las imágenes cada 10 días en el periodo 1/4/1998 al 21/12/2003. A partir de la matriz de datos de NDVI generada, se dispone de la información necesaria para evaluar el comportamiento de las seis unidades suelo – vegetación definidas:

- Forestal,
- Pastoril agrícola Invernal,
- Pastoril agrícola estival,
- Agrícola pastoril estival,
- Agrícola pastoril invernal,
- Agrícola

Esta evaluación implica resolver dos problemas:

- a) Separar los píxel (o polígonos de 1km<sup>2</sup> en la cobertura vectorial) que estén incluidos en cada clase, y
- b) Determinar el comportamiento anual y plurianual de cada clase suelo – vegetación definida.

Para conocer la importancia de las variables temporales (valores para cada fecha de imagen) en la distribución espacial de los valores del NDVI, se utiliza el método de análisis de componentes principales (ACP) a partir de la matriz construida.

Los ACP no son técnicas descriptivas ni explicativas en si mismas, sino que pueden ser empleadas en ambos sentidos según el interés del investigador. Se utilizan para reducir el volumen de información y comprender la importancia de las variables en el funcionamiento del sistema o para formular hipótesis, lo que dependerá de los objetivos del trabajo (James y McCulloch, 1990; Pía, 1986).

Los principales atributos del análisis multivariado, en especial el ACP es reducir la gran cantidad de información contenida en la matriz original en un pequeño conjunto de variables (componentes principales), representativas de la variabilidad del sistema y sin pérdidas significativas de información (Reis, 1997). La aplicación de un ACP en este trabajo, posibilita la representación de las 207 variables y las 787 unidades espaciales en un espacio de dos dimensiones que explica la dispersión de las variables originales, así como el comportamiento de la distribución del NDVI en el espacio de la cuenca (Carrasco, 2002). En este caso a través del ACP se pretende obtener nuevas variables sintéticas (componentes) no correlacionadas que agrupen a las variables originales (relacionadas entre si), de forma que estas nuevas variables expliquen el comportamiento de las variables originales y por tanto el máximo de la variabilidad total del sistema. La tabla 22 presenta un resumen de la viabilidad de aplicación y los resultados de los siete ACP realizados para el análisis de las series anuales y de todo el periodo del NDVI.

**Tabla 22: Resultados de los ACP realizados, pertinencia de su aplicación y porcentaje de la varianza explicada por cada uno de los dos primeros componentes.**

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	1998-2003
KMO	0.925	0.957	0.961	0.958	0.958	0.953	0.981
% de la varianza explicada por el 1° Componente	51.786	65.007	67.949	70.567	71.579	66.687	59.581
% de la varianza explicada por el 2° Componente	15.985	17.841	12.871	12.673	12.178	11.493	10.131
Total de la varianza explicada	<b>67.771</b>	<b>82.848</b>	<b>80.82</b>	<b>83.24</b>	<b>83.757</b>	<b>78.195</b>	<b>69.712</b>

KMO. Es el test de medida de la adecuación de muestreo de Kaiser- Mayer- Olkin. La medida de adecuación de muestreo es un índice que compara las magnitudes de los coeficientes de correlación observados con las magnitudes de los coeficientes de correlación parciales e indican la pertinencia del uso del modelo de ACP para una matriz de datos Kaiser (1974) caracteriza los valores de KMO (tabla 23).

**Tabla 23: Pertinencia de utilización del ACP según valores de KMO**

<b>KMO</b>	<b>Pertinencia del ACP</b>
$KMO > 0.9$	excelentes
$0.9 > KMO > 0.8$	muy buenas
$0.8 > KMO > 0.7$	medianas
$0.7 > KMO > 0.6$	mediocres
$0.6 > KMO$	inaceptables

Fuente: Kaiser, 1974

Como se desprende de las tablas 15 y 16 los resultados de la aplicación del ACP son excelentes, así como la proporción de la varianza total del sistema explicada con los dos primeros componentes. Es de destacar que los resultados de menor calidad para el año 1998 se corresponden a que no se cuenta con valores para todo el año, ya que los datos disponibles corresponden al periodo 1/4/1998 al 21/12/1998. De todas formas  $KMO = 0.925$  resulta excelente y entre los dos primeros componentes explicar el 67,771 de la variabilidad del sistema es un resultado satisfactorio.

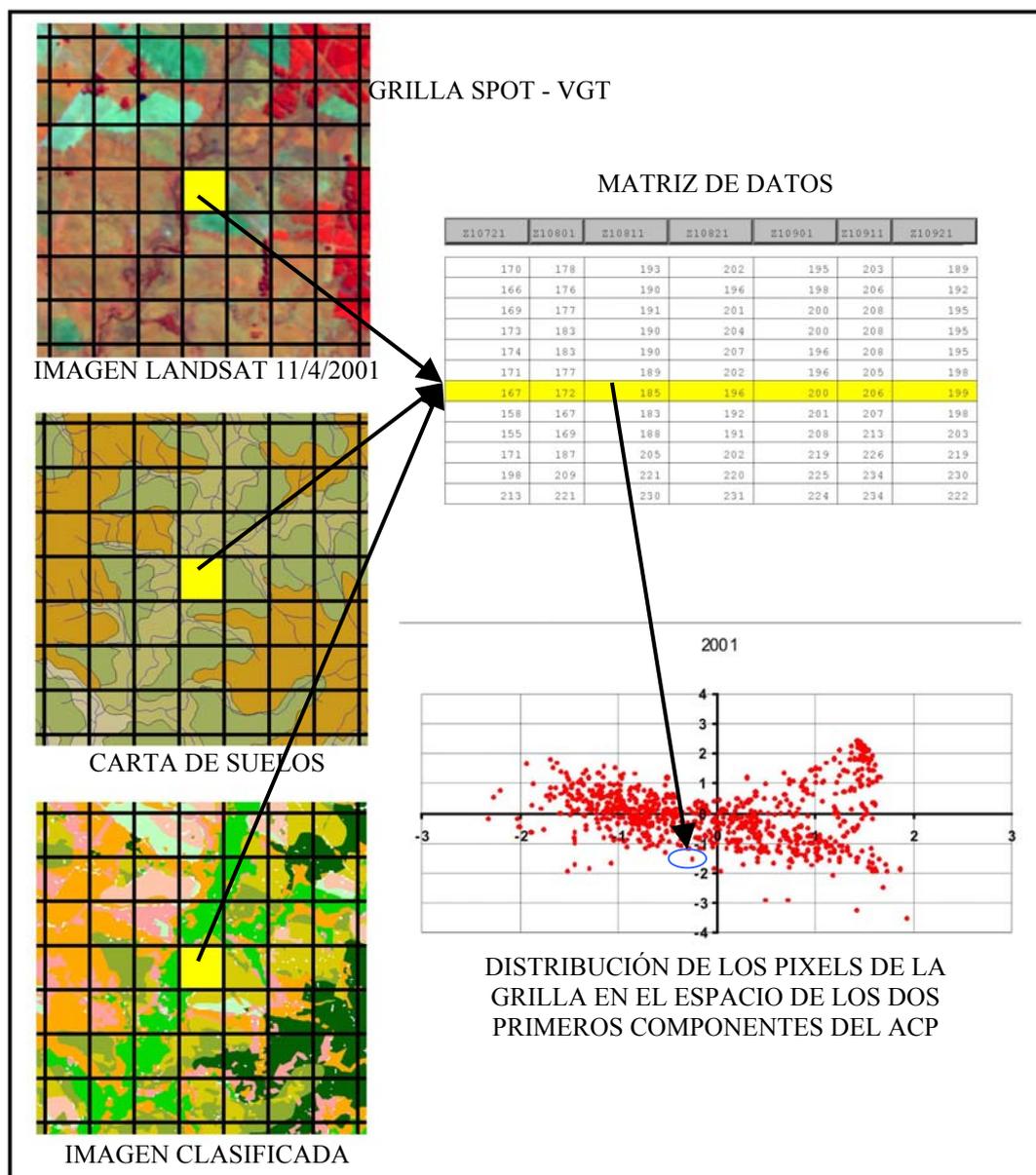
Estos resultados son esperables ya que las variables son el NDVI para cada fecha en una serie temporal cada 10 días, por lo tanto cada valor que un pixel presenta para una fecha determinada está condicionado por el valor que tuviere 10 días antes y que tendrá 10 días a posteriori.

En la figura 13 se presenta la secuencia lógica que se utilizó para la interpretación de los resultados en el ACP. Mediante la interacción Imágenes – SIG – ACP se pudo identificar pixeles y analizar su distribución en el espacio de variabilidad de los dos primeros componentes. En el esquema se representa un pixel de la clase Agrícola Pastoril Estival, su ubicación en la matriz de datos y en el resultado del ACP.

A partir de esta metodología de trabajo se generaron hipótesis de distribución de pixeles según su pertenencia a las distintas clases. Estas hipótesis de trabajo permitieron

orientar la clasificación y asignación de cada pixel de la grilla SPOT – VGT determinando su pertenencia a cada una de las clases suelo – vegetación, su comportamiento temporal y su distribución espacial. El ACP se trabajó a partir de la matriz de datos en formato dbf. que se extrae del SIG luego de la integración de la totalidad de las imágenes SPOT – VGT y se procesa con el programa SPSS 11.5. Se realiza el análisis de ACP, con una rotación de factores utilizando el método “Varimax” que tiene por objetivo lograr las rotaciones necesarias para cada par de factores de forma tal que hagan máximas las varianzas. En síntesis el método “Varimax” permite reducir la complejidad de la matriz maximizando la varianza de los factores y permitir alcanzar una explicación factorial más sencilla sin perder información sobre la variabilidad del sistema. (Jiménez y Rodríguez, 2000).

**Figura 13: Secuencia lógica de interpretación del ACP**



## **B) RESULTADOS DE LA CARTOGRAFÍA**

### **i) Interpretación de la clasificación IAR**

En la tabla 24 se presentan los resultados por superficies ocupadas por cada clase producto de las clasificaciones de las distintas escenas Landsat. Resulta necesario realizar algunos comentarios sobre los productos obtenidos en la clasificación:

- La tendencia registrada en la clase forestación se corresponde con el proceso de aumento acelerado de la superficie ocupada por cultivos forestales hasta los años 2000 - 2001 y luego un estancamiento. Situación que se repite en todo el país como consecuencia de la disminución en los subsidios directos a la actividad forestal. Además a partir del año 2001 – 2002 en la zona comienza la cosecha de madera, con lo cual, las áreas identificadas como forestales sufren modificaciones significativas en la respuesta espectral, situación que dificulta su clasificación como parcelas forestales y puede ser incluida como parcela agrícola.
- El monte natural y parque presenta un importante nivel de confusión. En especial el monte parque con las clases campo natural estival y praderas estivales, ya que se trata prácticamente de los mismos espacios donde se conserva o no el monte parque pero la composición de la pradera es similar. Dependiendo de las condiciones de precipitación y la estación del año varía la confusión registrada. En especial en las áreas con menor densidad de árboles.
- Las clases campo natural tanto invernal como estival se corresponden con los valores esperados, considerando algunos niveles de confusión que se vinculan a rastrojos muy antiguos que se confunden con el campo natural, además de las confusiones entre las clases campo natural estival y monte parque.
- Cereales Invernales, el descenso progresivo del área utilizada se corresponde con las variaciones encontradas.
- Cereales estivales, el aumento sostenido del área se vincula especialmente al aumento del cultivo de soja, que se corresponde con la tendencia de todo el litoral y fue verificada en las campañas de terreno.

- Praderas invernales y estivales, en los dos casos la variabilidad se vincula tanto a la rotación de cultivos – praderas, como a las confusiones con estas clases ya que las fechas de cultivo y desarrollo de la vegetación son coincidentes, por otra parte esta separación debería ser revisada ya que las praderas permanentes con mezclas de especies están muy difundidas en la zona y aumentan los niveles de confusión a la hora de las clasificaciones de imágenes.

Sin embargo, a pesar de la necesaria y permanente revisión de la leyenda para la clasificación de las imágenes, los resultados obtenidos son satisfactorios si se considera que la variabilidad del uso del suelo en una zona de productores mixtos es muy dinámica de año a año. La apertura utilizada aporta la información necesaria para la definición espacial de las unidades suelo - vegetación propuestas y constituyen la base para el procesamiento de las imágenes de baja resolución.

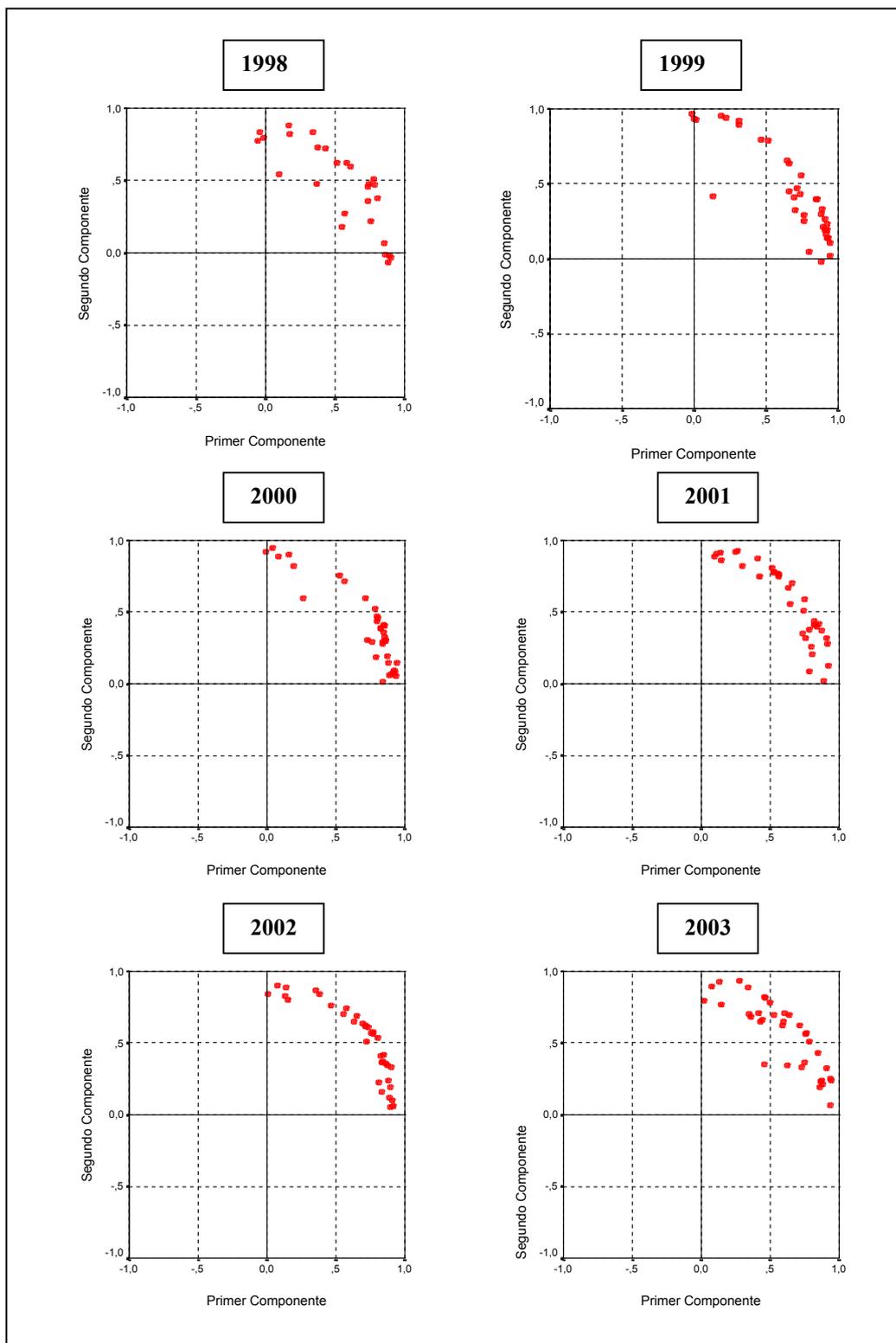
**Tabla 24: Resultados de las clasificaciones de las escenas Landsat (todas las superficies se presentan en hectáreas)**

Leyenda de clasificación	Escenas Landsat					Media	Desvío
	21/11/1998	20/12/2000	11/4/2001	30/6/2001	21/9/2002		
Forestal	5415	9040	9539	9585	9870	8689,8	3186,79
Monte Natural y Parque	9457	4955	6708	8198	5910	7045,6	1797,01
Campo Natural Invernal	5497	5767	5396	6219	8308	6237,4	1200,54
Campo natural Estival	7775	4335	4983	3007	7572	5534,4	2079,81
Cereales Invernales	13678	11841	10055	10009	10626	11241,8	4552,70
Cereales Estivales	5724	9305	10767	6724	7625	8029,0	2018,92
Praderas Invernales	7723	9093	7291	9687	7452	8249,2	2324,83
Pradera Estivales	4655	6207	5734	7047	3079	5344,4	1533,14
Total	59923	60543	60473	60476	60442	60371,4	253,36

## ii) Interpretación de la clasificación IBR

Los gráficos de la figura 14 presentan la ubicación de las distintas variables (se entiende por variables a las fechas de las imágenes SPOT-VGT) en el espacio de los dos primeros componentes, año por año. En estos gráficos se representan los coeficientes de la matriz rotada, lo que permite visualizar que variable contribuye a la explicación de cada componente.

**Figura 14: ACP - Distribución de las variables por año**



Para interpretar la figura 14 en las tablas 25 y 26 se presentan los coeficientes de puntuaciones para cada componente principal. Estos coeficientes establecen la contribución de cada variable específica (en este caso agrupadas por estación) al comportamiento de cada componente. En el Anexo 3 se presentan los valores de los

coeficientes de puntuaciones por fecha y por año. Con estos valores cada componente puede ser expresado como una combinación lineal de las variables originales (García Jiménez *et al.* 2000; Carrasco, 2002). Las variables de otoño y verano aportan el 68.2% de la variabilidad del 1° CP, mientras que las variables de primavera e invierno aportan el 82.7% de la variabilidad del 2° CP.

**Tabla 25: Coeficientes de Puntuaciones 1° CP**

Estación	COEFICIENTES DE PUNTUACIÓN 1° CP					Total
	2003	2002	2001	2000	1999	
VERANO	21,66%	33,06%	35,13%	29,51%	21,07%	<b>28,10%</b>
OTOÑO	44,08%	39,49%	39,24%	34,46%	43,24%	<b>40,10%</b>
INVIERNO	6,35%	4,26%	5,22%	9,02%	9,90%	<b>6,95%</b>
PRIMAVERA	27,91%	23,19%	20,41%	27,01%	25,79%	<b>24,85%</b>
TOTAL	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

**Tabla 26: Coeficientes de Puntuaciones 2° CP**

Estación	COEFICIENTES DE PUNTUACIÓN 2° CP					Total
	2003	2002	2001	2000	1999	
VERANO	17,13%	6,83%	6,43%	3,51%	2,49%	<b>7,28%</b>
OTOÑO	11,23%	11,54%	12,08%	7,37%	7,93%	<b>10,02%</b>
INVIERNO	19,57%	14,95%	35,49%	10,78%	36,15%	<b>23,39%</b>
PRIMAVERA	52,06%	66,69%	46,00%	78,35%	53,44%	<b>59,31%</b>
TOTAL	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

La rotación de coeficientes de correlación empleada (Varimax), aporta simplicidad y representa para cada componente los coeficientes de variación más altos posibles, o los más bajos posibles de tal forma que la variabilidad del sistema quede notoriamente resaltada en la representación gráfica (Fonseca, 2002). El primer componente queda mayoritariamente explicado por las variables de otoño y verano, lo que se vincula a la capacidad productiva de la unidad entre las dos estaciones. Así el aporte de las variables entre el verano y el otoño al primer componente indican que existe una correlación inversa entre la variabilidad de la productividad de la unidad espacial (desde el mínimo del verano hacia el máximo del otoño) con la proporción representada en este componente. Una unidad suelo-vegetación que tenga un mínimo de cambio entre la productividad estival y otoñal presentará los mayores valores en el primer componente, siendo también cierta la situación inversa. El segundo componente está mayoritariamente explicado por las variables de primavera e invierno. Así el aporte de las fechas de primavera hacia el segundo componente se vincula a la capacidad de la unidad espacial de generar cambios importantes en su producción de biomasa entre el

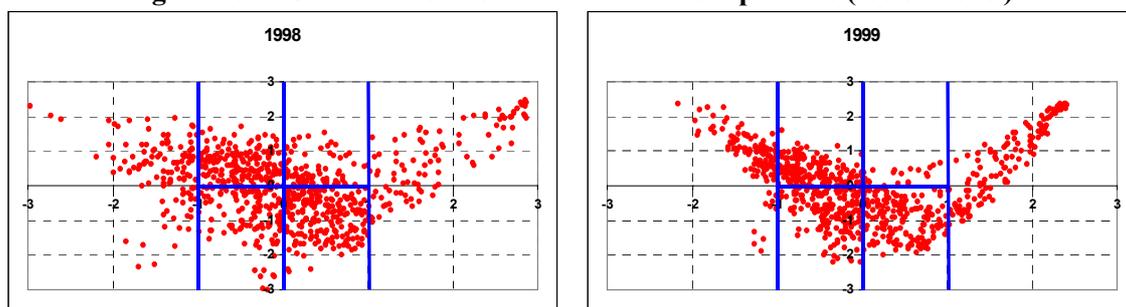
invierno y la primavera. La interpretación realizada del comportamiento de las 207 variables en sus gráficos de distribución y las 787 unidades espaciales, permite avanzar hacia hipótesis de asignación de cada pixel a una unidad suelo-vegetación de acuerdo a su ubicación en el espacio de los dos primeros componentes principales. En la tabla 27 se presentan hipótesis de criterios de asignación de cada pixel a una unidad suelo-vegetación, según su ubicación en el espacio de variabilidad de los dos primeros componentes del ACP.

**Tabla 27: Criterios de asignación de pixel según los resultados del ACP**

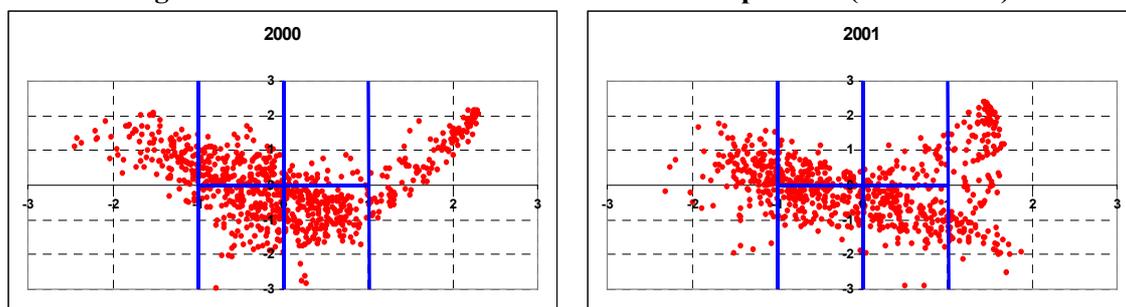
Unidad Suelo – Vegetación		Criterio
<b>Unidad 1</b>	Forestación	$x \geq 1$
<b>Unidad 2</b>	Pastoril agrícola invernal	$0 \leq x < 1 / y \geq 0$
<b>Unidad 3</b>	Pastoril agrícola estival	$0 \leq x < 1 / y < 0$
<b>Unidad 4</b>	Agrícola pastoril estival	$-1 \leq x < 0 / y < 0$
<b>Unidad 5</b>	Agrícola pastoril invernal	$-1 \leq x < 0 / y \geq 0$
<b>Unidad 6</b>	Agrícola	$x < -1$

Las figuras 15, 16 y 17 presentan gráficamente las hipótesis para los seis años. En todos los casos, el eje de las X corresponde al 1° CP y el eje de las Y al 2° CP.

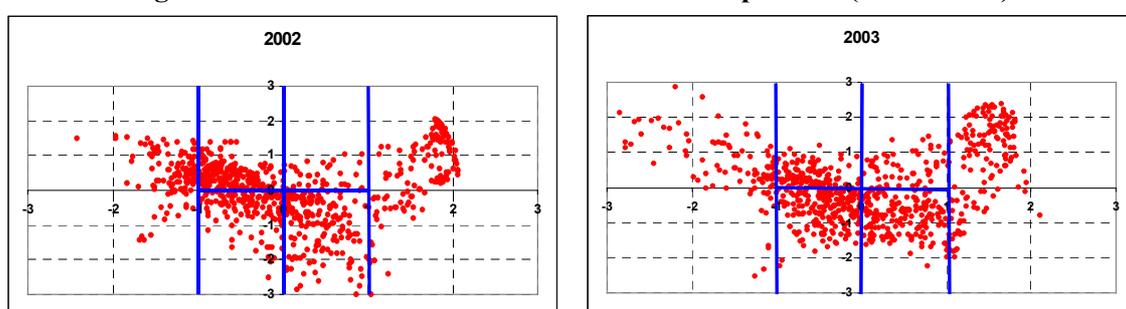
**Figura 15: ACP - Distribución de las unidades espaciales (1998 – 1999)**



**Figura 16: ACP - Distribución de las unidades espaciales (2000 - 2001)**

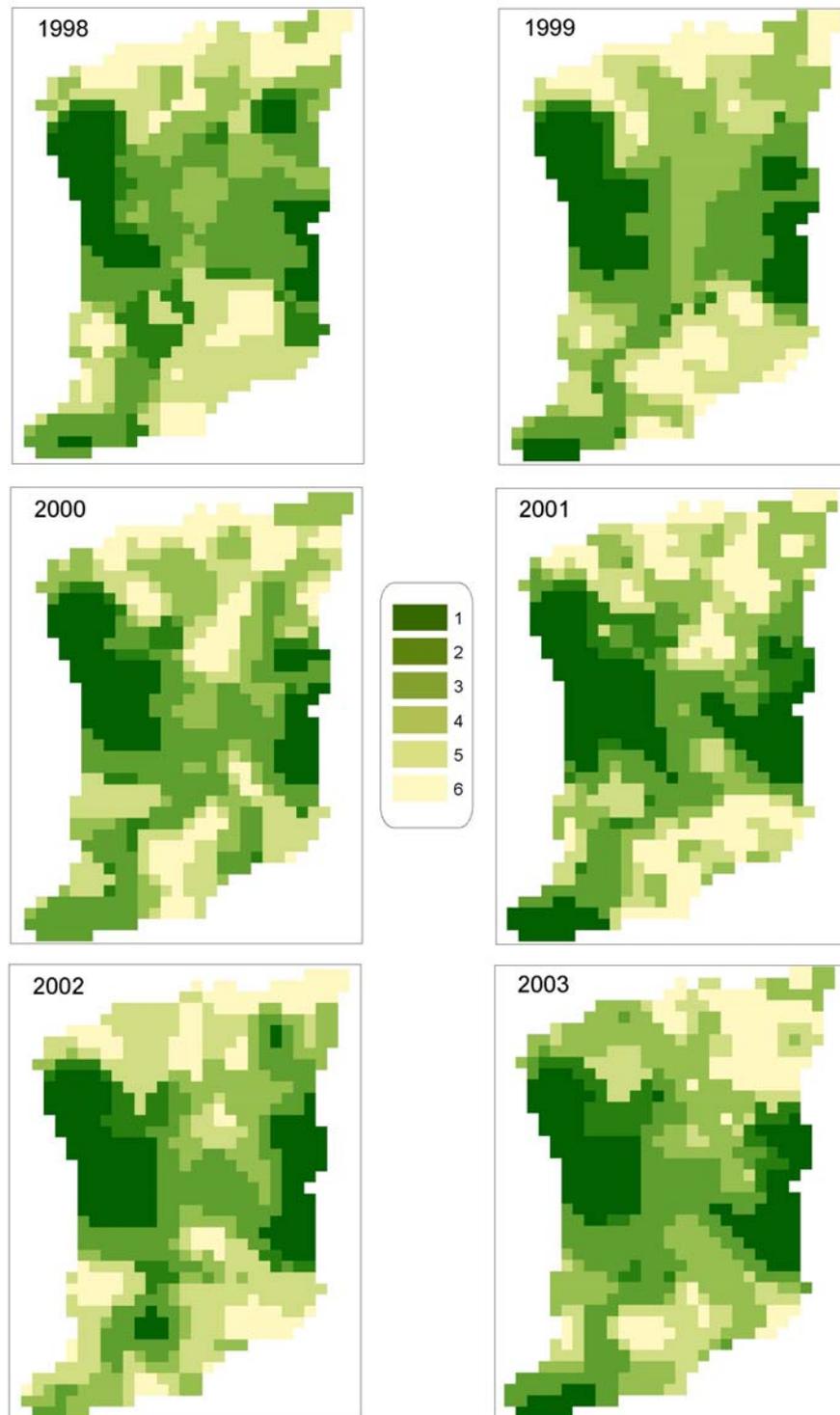


**Figura 17: ACP - Distribución de las unidades espaciales (2002 - 2003)**



En la figura 18 se representa espacialmente la interpretación del ACP por año.

**FIGURA 18: REPRESENTACIÓN ESPACIAL DEL ACP POR AÑO**

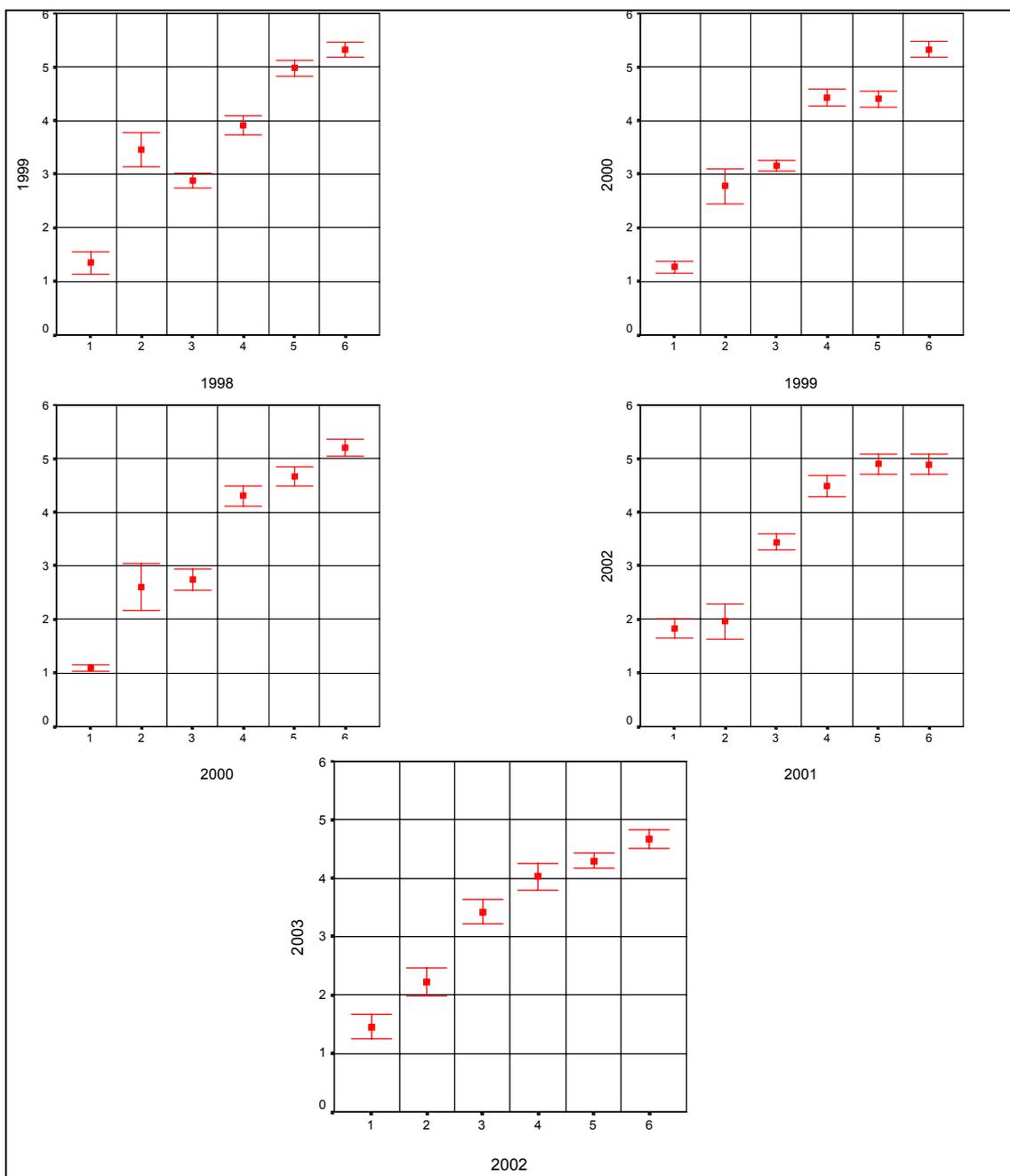


En la tabla 28 se presenta los resultados de la asignación de píxeles según cada unidad suelo-vegetación para cada uno de los años considerados y también para el periodo 1998 – 2003.

**Tabla 28: Número de píxeles asignados a cada clase según año.**

Clase	1998	1999	2000	2001	2002	2003	98 – 03	Media	Desvío
1	99	137	120	177	148	148	144	139,0	24,5
2	71	22	30	47	37	50	18	39,3	18,4
3	204	172	212	157	162	172	186	180,7	20,9
4	125	171	155	139	137	203	146	153,7	26,2
5	173	162	151	118	187	111	172	153,4	28,8
6	115	123	119	149	116	103	121	120,9	14,0

**Figura 19: Gráficas de correspondencias interanuales**



En el Anexo 4 se presentan las tablas de correspondencia interanual según los criterios de asignación de pixel a cada unidad suelo vegetación. Los valores de las tablas de correspondencias indican la variabilidad interanual en la asignación de los pixeles correspondientes a cada categoría. La interpretación de estos resultados se presenta (figura 19) en las gráficas de correspondencias interanual (nivel de confianza del 95%). Las gráficas de la figura 19 permiten evaluar los problemas en la asignación de los pixel en la unidad 2, que es la unidad que presenta mayor dispersión interanual, así como la variabilidad de la unidad 6 hacia y desde las unidades 4 y 5.

### **Discusión de las clasificaciones IBR obtenidas**

- a) **Forestal:** El número de pixeles con uso del suelo predominantemente forestal, presenta un crecimiento sostenido, que se indica por la incorporación progresiva y gradual de áreas que abandonan otros usos del suelo, para pasar al uso forestal. Sin embargo la situación discrepante del año 2001 al 2002, se explica por dos motivos que son bien identificados en el comportamiento de la clasificación propuesto. Primero en el año 2001 comienza la cosecha o corte en áreas importantes en la cuenca. En segundo lugar, en el año 2002 las condiciones impuestas por la crisis financiera del país determinan una reducción de los subsidios directos al sector y por tanto un enlentecimiento en el crecimiento de las áreas forestales. Situación que comienza a recomponer el área total por la reincorporación de las áreas de rebrote, y nuevamente son identificadas como áreas forestales.
- b) **Pastoril agrícola invernal:** Esta es la unidad que presenta mayor variabilidad en todo el periodo considerado. La sequía marcada en el verano de comienzos de 1999, genera un nivel importante de confusión con áreas que disminuyen en forma muy acelerada su productividad y con recuperación lenta que en algunos casos conduce a un comportamiento del pixel que tiende más al predominio de la agricultura que de campos de pastoreo. Presentando si bien con mucha variabilidad una tendencia a la recuperación del área hacia el final del periodo.
- c) **Pastoril agrícola estival:** Esta unidad presenta una importante estabilidad en el periodo, su variabilidad está dada por: El descenso importante del área bajo cultivo, en tierras que resultan marginales para los cultivos, durante la sequía de 1999. El avance de la forestación hacia estas tierras. En el periodo 2002 - 2003 se registra un

marcado avance del cultivo de soja, hacia tierras que aunque marginales para el desempeño del cultivo, la rentabilidad esperada por el valor internacional del grano determinó su avance territorial.

- d) **Agrícola pastoril estival:** El crecimiento del área ocupada por esta unidad del año 2002 al 2003, se vincula fuertemente a la expansión del área de cultivo de soja. En especial las áreas que pueden incorporar suelos con alto potencial para la producción de este cultivo de verano, mayormente reflejan la tendencia. Se destaca que en estos años muchas tierras que eran ocupadas para cultivos de invierno pasan a ocupar esta unidad así como algunas áreas exclusivamente agrícolas, también tienden a ser cultivadas solamente con soja.
  
- e) **Agrícola pastoril invernal:** Esta unidad presenta un comportamiento relativamente estable en todo el periodo, donde algunas áreas cambian de uso de año en año fundamentalmente aumentando su proporción exclusivamente agrícola, y por tanto pasan a la clase agrícola, e incluso se presentan algunas variaciones entre áreas de cultivo de verano e invierno. Esta situación es especialmente notoria entre los años 2002 y 2003 donde importantes superficies son ocupadas por cultivos de soja.
  
- f) **Agrícola:** En esta unidad se registran una serie de espacios que responden a los cambios coyunturales del sector cerealero, donde según el año algunos píxeles integran las unidades agrícolas pastoriles estivales o invernales de acuerdo a la expansión o retracción de los distintos subsectores agrícolas. Pero sí se registra un predominio de las áreas que permanecen agrícolas durante todo el periodo.

La distribución de los píxeles entre las distintas unidades suelo-vegetación, de acuerdo a las hipótesis de interpretación del ACP realizado, presentan un comportamiento que responde a la lógica de uso de suelo en la cuenca del A° Sánchez. El análisis de los resultados a nivel cartográfico que se presenta en la figura 19, también señala la coherencia de la metodología empleada. Tanto las interpretaciones anuales (seis años) como las correspondencias interanuales corresponden al proceso de uso y ocupación del territorio en la cuenca analizada.

### iii) Correspondencias entre IBR e IAR

Como síntesis de los resultados obtenidos con la metodología para procesar en forma sistemática las imágenes SPOT - VGT, se realizaron las correspondencias entre las clasificaciones de las imágenes Landsat y las unidades suelo-vegetación construidas a partir de las imágenes de baja resolución. Para obtener la información que permitiera comparar ambos resultados se realizó el cruzamiento geométrico desde las utilidades del SIG de las coberturas vectorial de la clasificación de Landsat y la grilla de SPOT -VGT. Los resultados se presentan en cuadros de doble entrada por año y los valores representan superficies totales por clase y por unidad, en hectáreas, anexo 5.

Para analizar los valores obtenidos se consideraron los siguientes criterios de correspondencias entre las unidades suelo-vegetación con las clases de uso del suelo de la clasificación de las imágenes Landsat:

- **Forestal:** Esta unidad constituye la integración de la clase forestal a la que se suman los píxeles que presentan mezcla con monte natural y parque, campo natural estival y praderas estivales. Se incluyen estas unidades porque son las que corresponden fundamentalmente a la vegetación natural en los suelos definidos como de aptitud forestal. Sin embargo existe también mezcla con las otras clases generadas a partir de Landsat en especial en los píxeles de los bordes hacia el norte y hacia el sur de las áreas forestadas que integran otras clases con mayor aptitud invernal.
- **Pastoril agrícola invernal:** Constituye la integración de la clase campo natural invernal, cultivos cerealeros invernales y praderas artificiales invernales. También en esta clase se da mezcla entre clases con mayor aptitud estival.
- **Pastoril agrícola estival:** Constituye la integración de las clases, campo natural estival, monte natural y parque, cultivos cerealeros estivales y praderas estivales. El monte parque es parte integral de la unidad, ya que la ganadería extensiva es el uso principal de estas tierras.
- **Agrícola pastoril estival:** Constituye la integración de las clases, cultivos cerealeros estivales, praderas artificiales estivales, campo natural estival, monte natural y parque. En especial para esta unidad los píxeles puros son prácticamente inexistentes, ya que se trata de la integración de cultivos / praderas en rotaciones más o menos cortas que son comunes en la zona litoral y entre la modalidad de productores mixtos.

- **Agrícola pastoril invernal:** Constituye la integración de las clases, cultivos cerealeros invernales, praderas artificiales invernales y campo natural invernal. La posibilidad de encontrar pixeles puros en esta unidad es similar a lo discutido para la unidad anterior.
- **Agrícola:** Constituye la integración de las clases, cultivos cerealeros invernales, cultivos cerealeros estivales y praderas artificiales. En esta unidad una parte importante de los pixeles son puros, sin embargo no son homogéneos ya que presentan un mosaico de campos de cultivo con distintos tiempos y manejos prediales y parcelarios.

La tabla 29 presenta los resúmenes de las confusiones obtenidas a partir de la cobertura síntesis, entre la clasificación de cada imagen y la distribución de las unidades para el año correspondiente. Para cada año se presenta el porcentaje de áreas que presentan confusión en la asignación correspondiente.

**Tabla 29: Matriz de confusión clasificación IBR respecto a IAR.**

UNIDADES	1998	2000	2001 (4)	2001 (6)	2002
<b>Forestal</b>	23%	20%	23%	13%	19%
<b>Pastoril agrícola invernal</b>	33%	39%	57%	54%	46%
<b>Pastoril agrícola estival</b>	31%	33%	24%	37%	33%
<b>Agrícola pastoril estival</b>	29%	33%	25%	46%	31%
<b>Agrícola pastoril invernal</b>	25%	22%	20%	28%	20%
<b>Agrícola</b>	30%	19%	21%	24%	18%

#### iv) **Discusión de los resultados**

Los resultados obtenidos muestran la pertinencia del método de procesamiento de imágenes de baja resolución para la determinación de unidades suelo-vegetación en una zona de paisaje heterogéneo y complejo. Este trabajo fue realizado en un área piloto de 60 mil hectáreas donde la variabilidad interanual en el uso del suelo es importante, por rotaciones entre cultivos – praderas – pasturas, cambios desde cultivos estivales a invernales y la inversa. El crecimiento de los cultivos forestales y en los últimos años del periodo considerado el incremento significativo del área ocupada con cultivos de soja, aumentan la complejidad de la cuenca.

La unidad forestación es la que presenta menor nivel de confusión, lo cual es esperable ya que se trata de grandes extensiones de cultivos forestales donde se ubica la mayor

proporción de píxeles “puros” que son perfectamente clasificados con la metodología propuesta. En el otro extremo la unidad pastoril agrícola invernal es la que presenta mayores problemas en la clasificación esto refiere a la escasa representación de la unidad, solo 5 % de los 787 píxeles analizados fueron asignados a esta unidad (tabla 29). Para esta unidad no fue posible encontrar ningún píxel “puro” , la mayor parte de las áreas correspondientes a praderas naturales con predominio de especies invernales se encuentran bajo cultivo. Lo cual conduce a considerar que esta unidad definida a priori del análisis de ACP no presenta significación espacial en la cuenca.

Sin embargo, todos estos elementos aparecen en el análisis de los resultados obtenidos y pueden ser identificados claramente al estudiar los datos. Por otra parte la densidad de información en la escala temporal permite, a pesar de la heterogeneidad de cada uno de los píxeles de 1 km<sup>2</sup>, avanzar hacia la identificación de las unidades suelo-vegetación. Otro elemento que aparece en la tabla 30 es la mezcla al interior de cada píxel de las IBR. La sumatoria de áreas minoritarias correspondientes a otra unidad al interior de un píxel es parte de la explicación de los altos valores. A modo de ejemplo la tabla 28 presenta el resumen de la síntesis geométrica entre las clasificaciones IAR e IBR para el año 2000.

**Tabla 30: Resultado de la síntesis geométrica entre las clasificaciones IAR e IBR**

Unidad	Pixel IBR	Nº polígonos de síntesis	Media de polígonos por píxel IBR	Superficie media por polígono	Desvío en las superficies
1	120	2182	18	5.1	10.2
2	30	734	24	3.7	6.6
3	212	4608	21	4.2	7.7
4	155	3520	22	3.9	7.5
5	151	3415	22	4.0	8.2
6	119	2320	19	4.9	9.3

Como se desprende de la tabla 30 cada píxel de la IBR esta compuesto por una media de 20 polígonos en la síntesis geométrica entre las dos clasificaciones con una media en superficie que se ubica en 4 hectáreas por polígono. Por tanto la heterogeneidad en el uso del suelo en la cuenca es el principal factor que explica los niveles de confusión resumen de la tabla 29.

La metodología empleada permitió resolver en forma satisfactoria la extracción de información sobre la distribución espacial de los usos del suelo y su variación anual. El

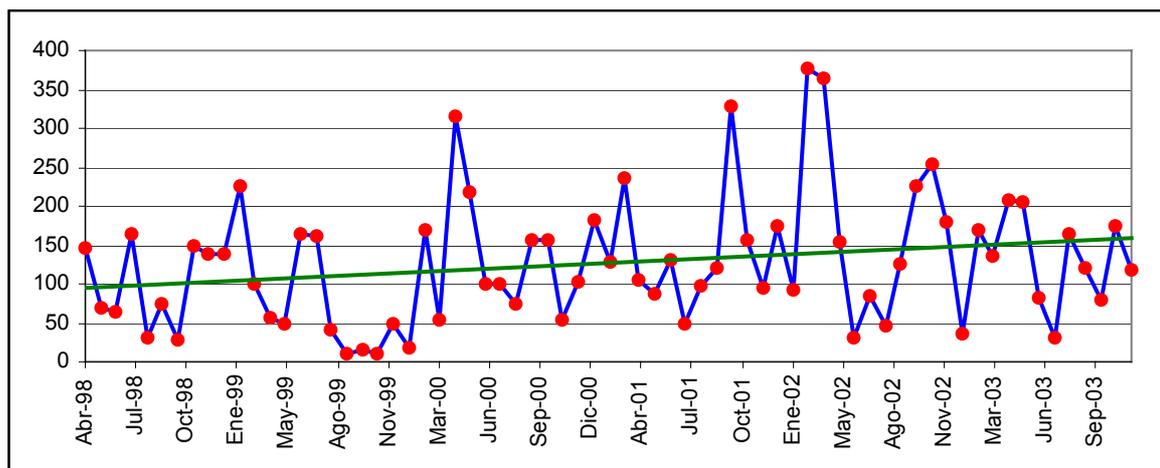
análisis de la ubicación de cada pixel en el espacio de los dos primeros componentes principales aporta nueva información sobre la heterogeneidad al interior de cada pixel.

### C) ANALISIS DIACRÓNICO

#### i) Comportamiento Temporal del NDVI de las USV

La metodología desarrollada para el tratamiento de IBR permite la asignación de cada pixel a una y solo una unidad suelo vegetación, generando una nueva base de datos. Con esta información fue posible la construcción de los gráficos del comportamiento del NDVI para cada año y para cada unidad en la cuenca. Los gráficos que se construyen corresponden a los valores medios de todos los pixeles que componen cada clase para cada una de las fechas de las imágenes SPOT – VGT presentadas para cada año y para el periodo total. En la figura 20 se presenta el gráfico de la evolución de las precipitaciones medias mensuales para el mismo periodo temporal.

**Figura 20: Evolución de la precipitación media mensual (4/1998 a 12/2003) en mm**



Fuente: Elaborado en base a datos de DNM (Estación Young)

El comportamiento de las precipitaciones en la cuenca (figura 20) sigue las tendencias generales registradas en el país (Nagy et. al. 2002) con un incremento sostenido (Panario y Bidegain, 1997). Este incremento se registra claramente en la serie de 68 meses del gráfico. Sin embargo, la variabilidad entre las situaciones de máxima y mínima mensuales mantiene las tendencias generales de la región con marcados periodos de sequía (agosto 1999 a marzo 2000) y picos de máximas precipitaciones. La evolución del NDVI para cada una de las unidades suelo-vegetación, está directamente vinculado a estas tendencias.

Figura 21: Unidad forestal evolución del NDVI 1998 - 2003

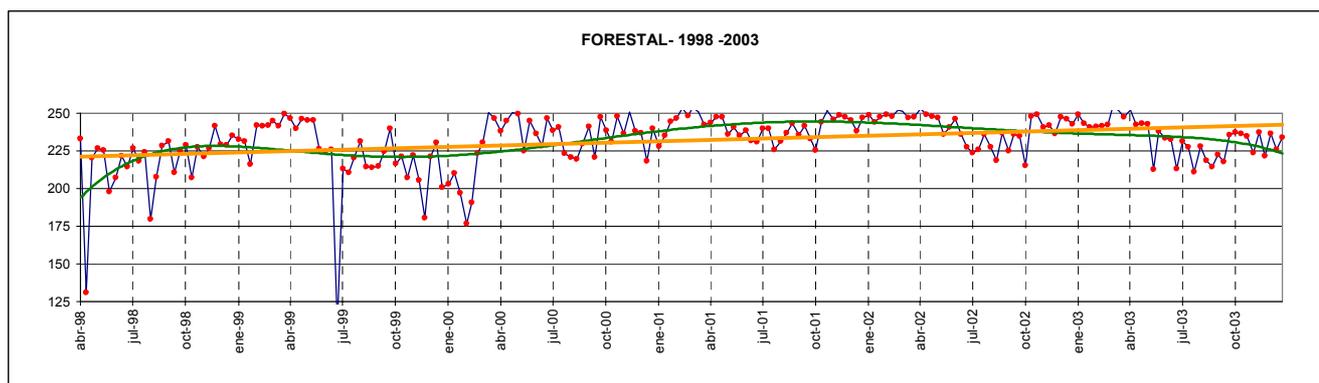
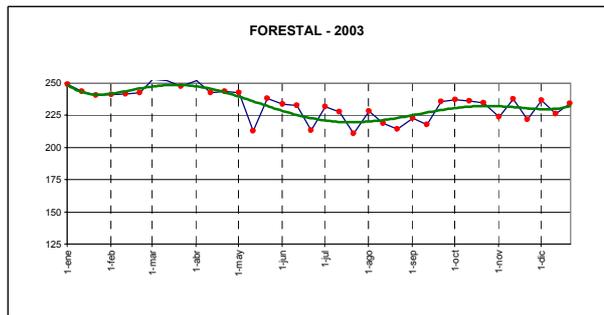
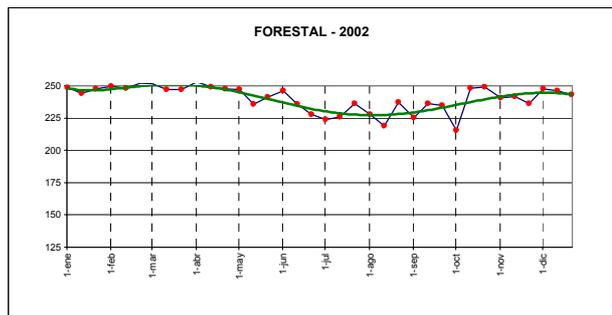
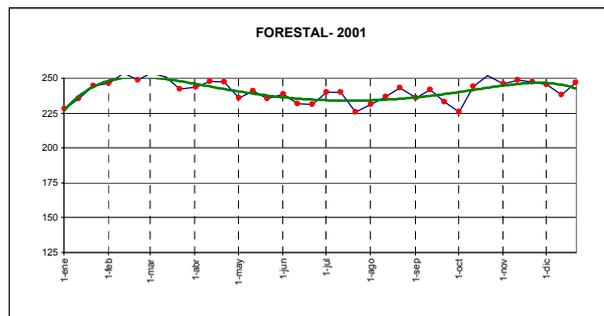
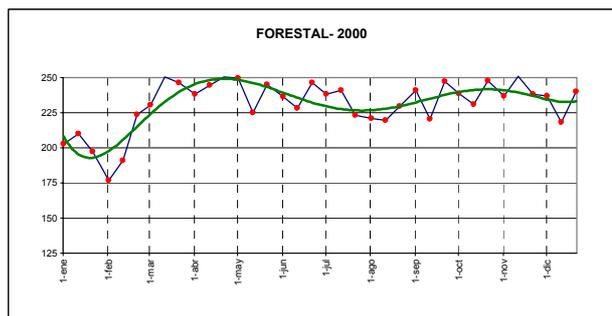
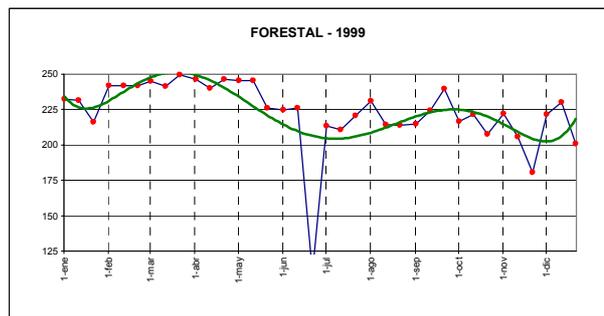
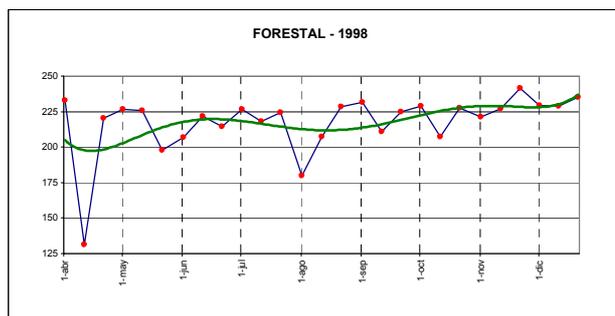


Figura 22: Unidad pastoril agrícola invernal evolución del NDVI 1998 - 2003

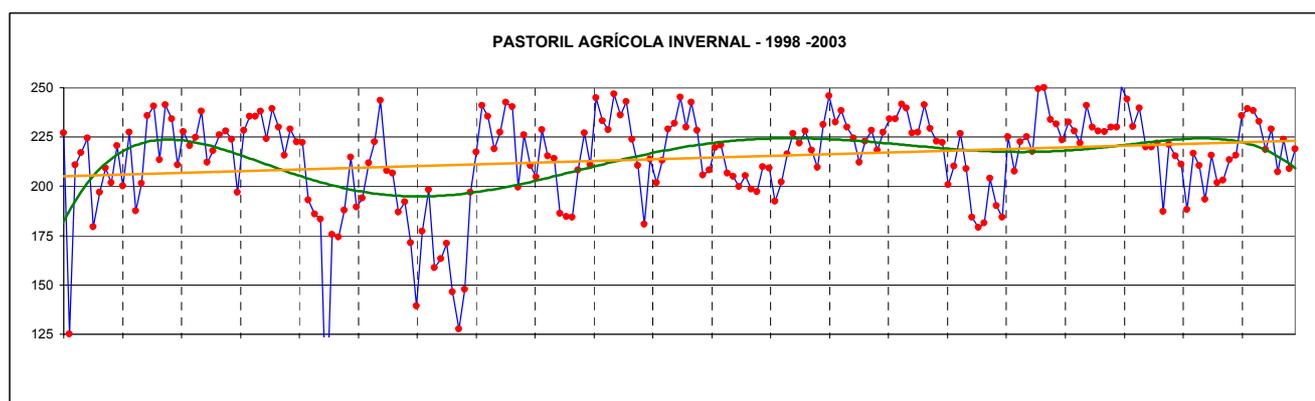
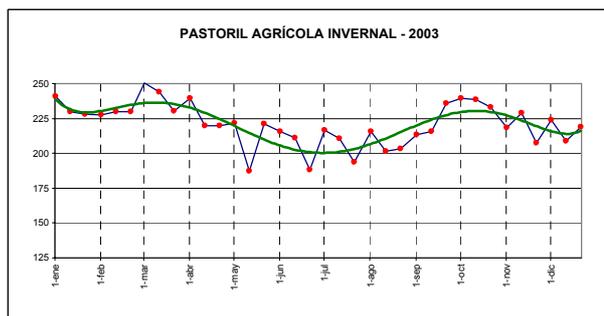
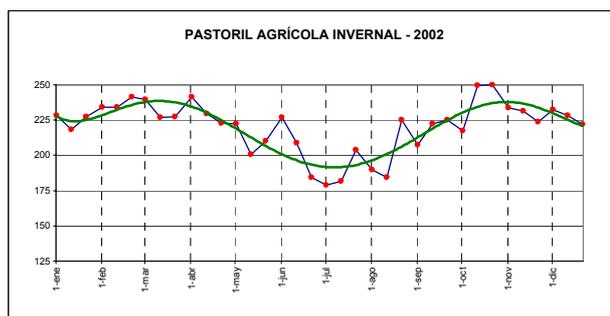
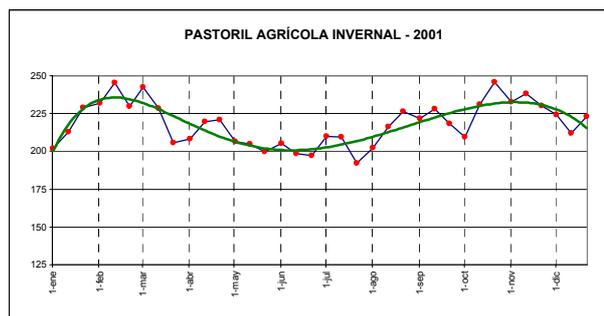
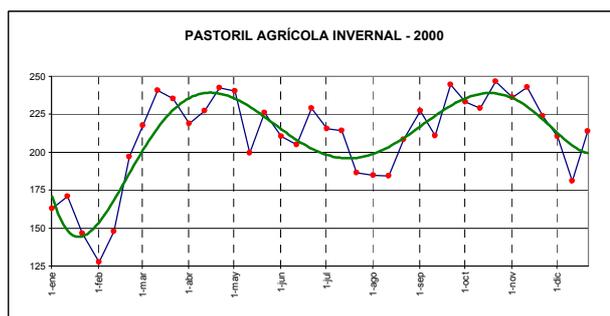
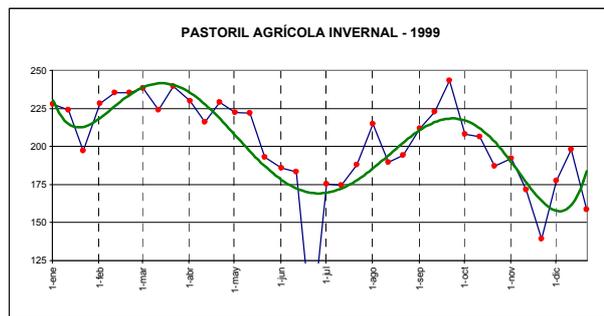
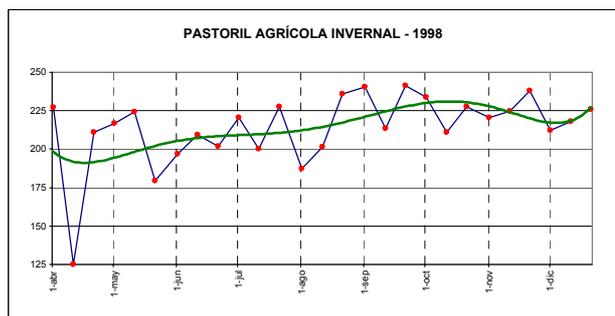


Figura 23: Unidad pastoril agrícola estival evolución del NDVI 1998 - 2003

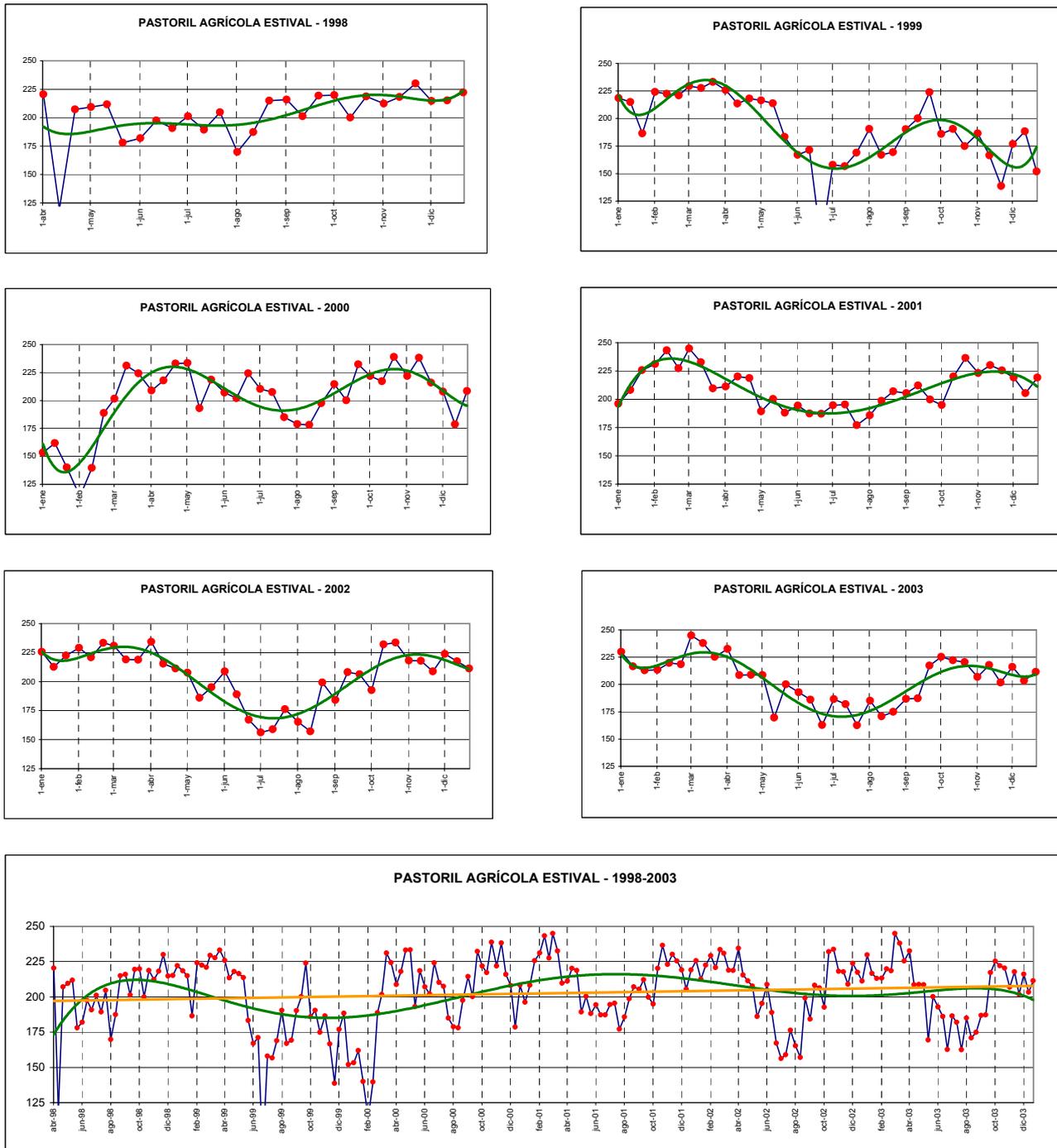


Figura 24: Unidad agrícola pastoril estival evolución del NDVI 1998 - 2003

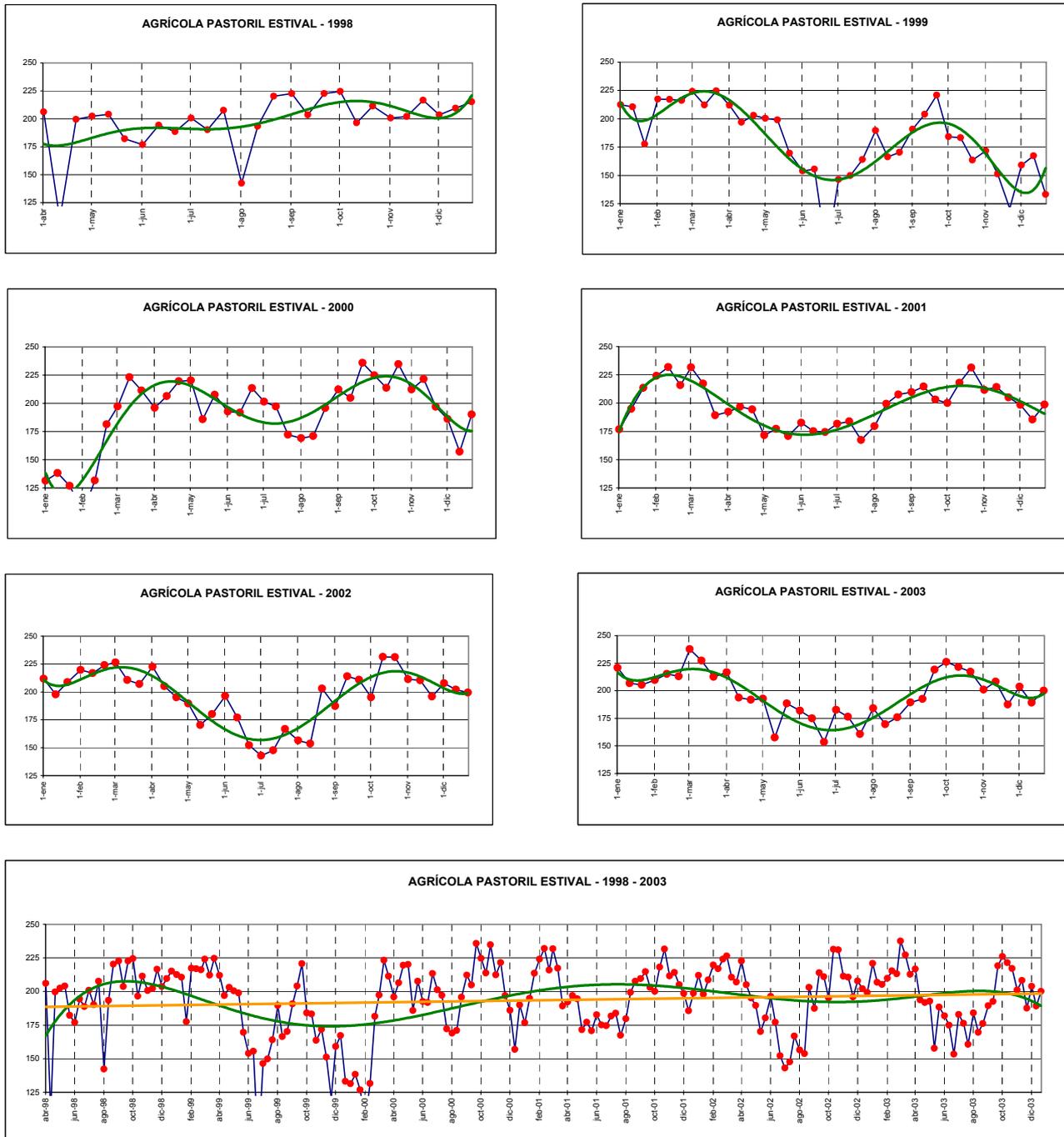


Figura 25: Unidad agrícola pastoril invernol evolución del NDVI 1998 - 2003

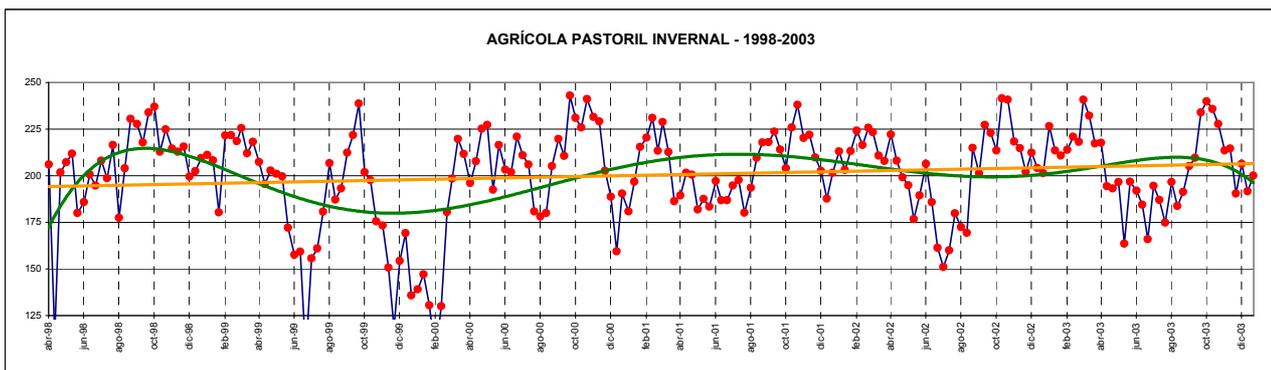
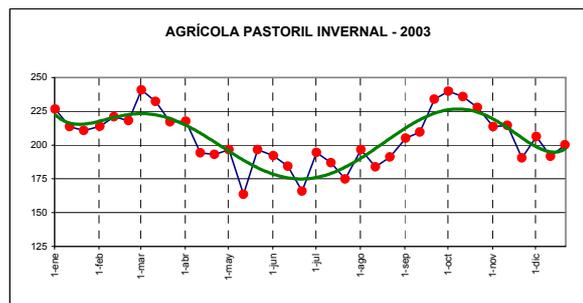
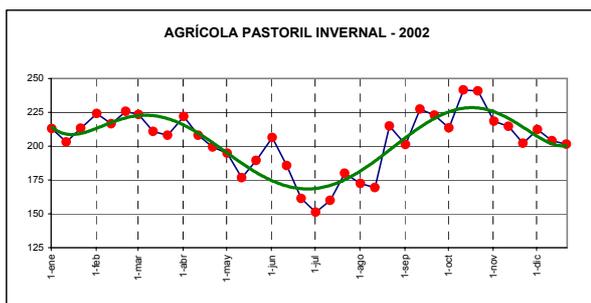
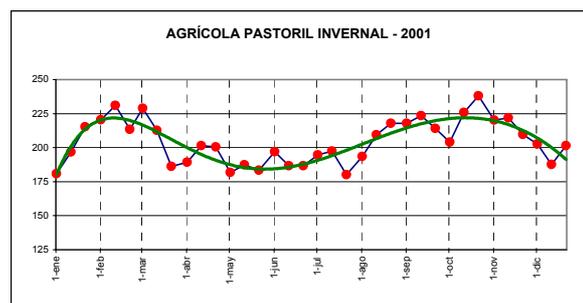
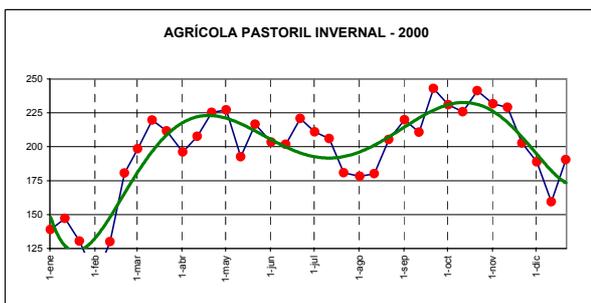
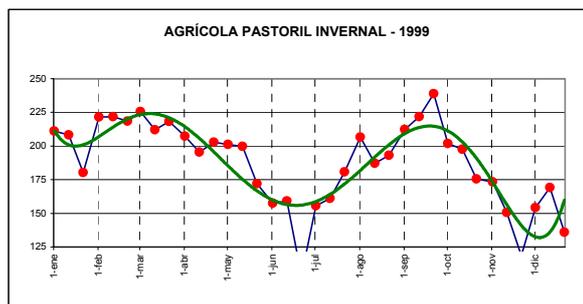
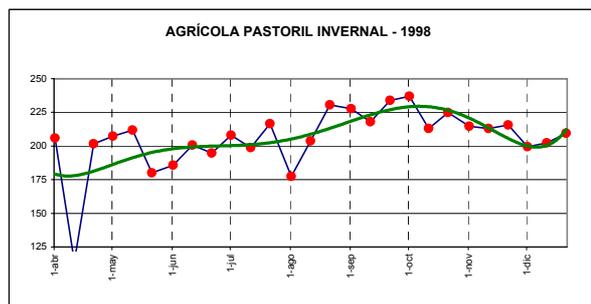
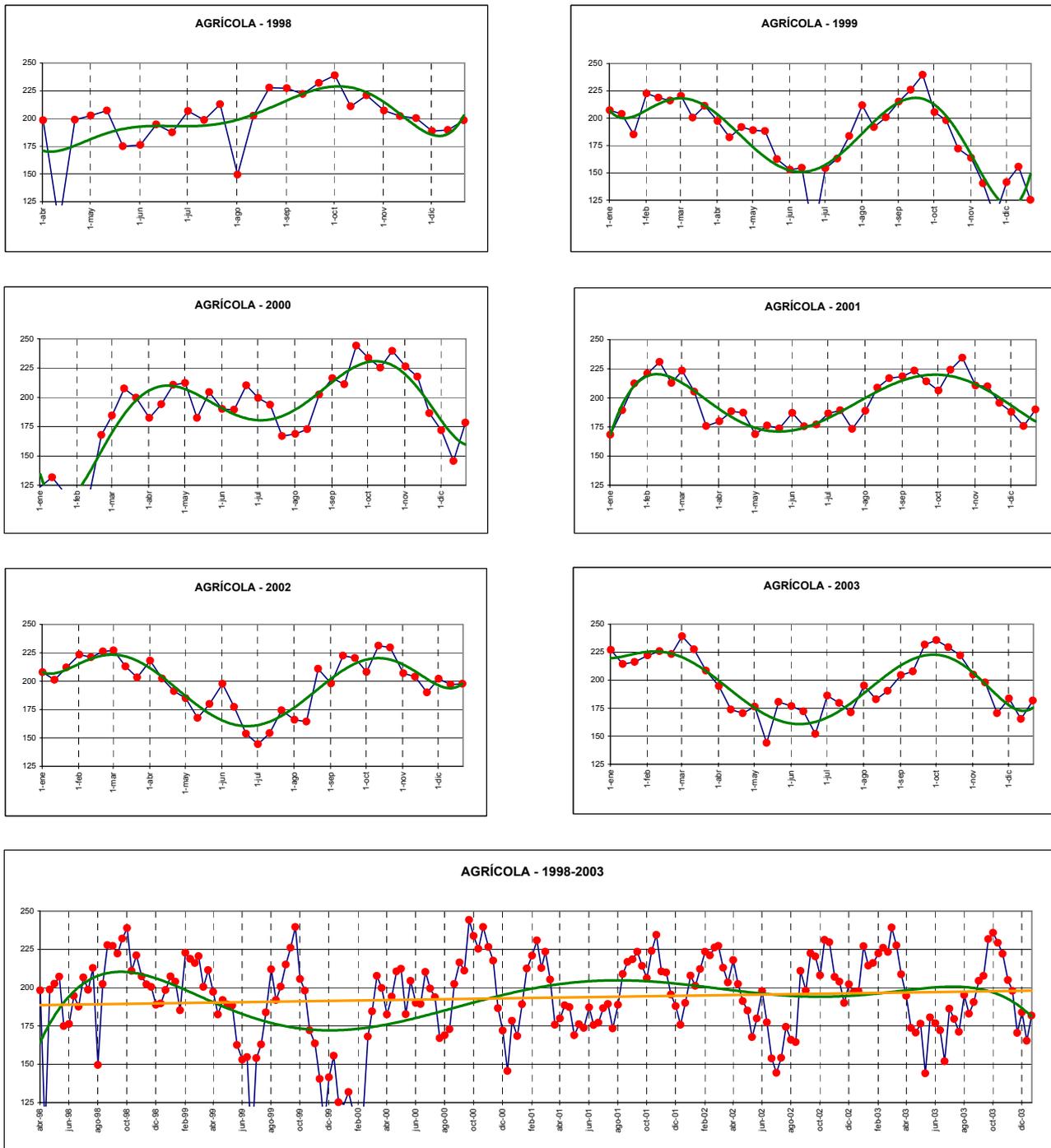


Figura 26: Unidad agrícola evolución del NDVI 1998 - 2003



## ii) **Discusión del análisis diacrónico en el periodo 1998 – 2003**

Las figuras 21 a 26 presentan el comportamiento anual del NDVI, según unidad suelo-vegetación, incluyendo además un gráfico que representa la variación en los 68 meses que abarca el estudio realizado. En general las seis unidades identificadas presentan algunos aspectos generales de comportamiento similares:

- Las seis unidades en el periodo 4/1998 a 12/2003 presentan una tendencia creciente en el NDVI, con valores muy bajos de crecimiento. La pendiente de la tendencia lineal presenta valores entre 1,1 y 0.5 %, inferiores a la tendencia de las precipitaciones (figura 21) que presenta una pendiente de 3%.
- La sequía de fines de 1999 y principio de 2000 afectó a todas las unidades, en diferente magnitud, pero todas presentan un descenso en el NDVI muy inferior a los mínimos de los ciclos anuales. El mínimo asignado al estrés hídrico se ubica en enero de 2000 en todas las unidades, pero el impacto es diferencial: La unidad forestación es la que presenta menor disminución (19 %) en relación a los valores medios de los otros años. En el otro extremo la unidad agrícola presenta la mayor disminución (55 %) en relación a los valores medios del mes de enero de los otros años.
- Todas las unidades presentan un mínimo principal en la distribución del NDVI en el entorno del mes de julio, coincidente con el mes de mínima temperatura, en este caso en todos los años relevados existe agua disponible para cubrir la demanda de la vegetación, en todas las unidades y en todos los tipos de suelos, incluso durante la sequía de 1999.
- Todas las clases presentan dos máximos relativos que se ubican en términos generales al final del verano y al final de la primavera, el predominio de especies de ciclo invernal o estival condiciona cual de los máximos relativos es más importante.
- Para facilitar la visualización de las tendencias se ajustó en todos los casos una curva polinomial de sexto grado. En todos los casos anuales el modelo es válido con un intervalo de confianza del 95% y  $R^2$  varía entre 0.6 y 0.9 . Este tipo de curva no presenta la misma bondad de ajuste cuando se trabaja con el periodo total.

Las figuras 21 a 26 muestran que si bien las seis unidades presentan elementos comunes durante los seis años analizados, cada curva presenta sus particularidades, que indican un comportamiento diferencial entre cada una de las unidades identificadas.

- La unidad forestación es la que presenta mayor tendencia de crecimiento en la recta asociada (pendiente = 1,1 %). Esta situación es lógica ya que es en este periodo que comienzan a implantarse y desarrollarse los cultivos forestales en la cuenca.
- La unidad forestación prácticamente no presenta variaciones en la distribución del NDVI, durante la sequía fue la unidad menos afectada y los máximos de verano y primavera forman casi un continuo. Por lo tanto, esto aporta evidencias en cuanto a que para el desarrollo de los cultivos de eucaliptos es más importante la eliofanía que la situación de estrés hídrico durante los meses de verano, resultados concordantes con los encontrados por Sarli (2004).
- La comparación entre las unidades con predominio de especies invernales o estivales indican la ubicación del máximo mayor en relación al máximo menor, en primavera o al fin del verano respectivamente.
- A nivel de pixel cuando aumenta el predominio de praderas naturales en relación a los cultivos agrícolas, tanto en las unidades estivales o invernales, se registra mayor estabilidad a la distribución anual del NDVI, suavizando las diferencias entre los máximos y los mínimos absolutos o relativos.
- La unidad con predominio del uso agrícola es la que presenta mayores niveles de contrastes entre los máximos y los mínimos y también es la unidad que presenta mayor descenso en los valores del NDVI durante la sequía de 1999 – 2000.

En síntesis, el comportamiento de las curvas de NDVI durante los años analizados se corresponde con lo esperado de acuerdo a la definición e integración de cada una de las unidades suelo-vegetación de acuerdo a los criterios de definición y a los criterios metodológicos de asignación de cada pixel.

## CONCLUSIÓN

A partir de la definición a priori de unidades de vegetación de acuerdo a las condiciones geoambientales de la cuenca se a desarrollado una metodología de integración de IBR e IAR en ambiente SIG que permite su definición espacial. Con los resultados obtenidos en un periodo de 6 años se evalúa el comportamiento temporal de cada una de las unidades. Los resultados obtenidos permiten evidenciar la complejidad espacio temporal del uso del suelo, y por tanto de la vegetación en la cuenca.

El análisis de la información generada indica una tendencia sostenida de aumento del NDVI, que con variaciones se registra en cada una de las unidades trabajadas. Este aumento de los valores del NDVI permite inferir un aumento en la biomasa verde fotosintéticamente activa y por tanto una cambio en el ingreso de residuos orgánicos al sistema suelo, situación que con diferencias se registra en todas las unidades analizadas, cambios que van acompañados por un aumento en la intensidad en el uso del suelo.

Estos cambios en los ingresos de residuos orgánicos al suelo se presentan conjuntamente con un aumento de las precipitaciones, lo que necesariamente va a generar cambios en el contenido de materia orgánica en los suelos y en el aporte de sustancias orgánicas hacia los cursos de agua.

Las evidencias de los cambios generados en la cobertura vegetal, imponen una serie de preguntas:

- ¿Cómo monitorear sistemáticamente el contenido de materia orgánica de los suelos?
- ¿Las técnicas de teledetección permiten generar la información necesaria para este control?
- ¿A partir de los sensores remotos se puede generar cartografía que permita evaluar los procesos de cambios de la materia orgánica del suelo?
- ¿Es posible generar cartografía a nivel de detalle para orientar la gestión del suelo y disminuir las pérdidas de materia orgánica del sistema?

El objetivo general de la tercera parte de este trabajo es responder a esta preguntas y proponer una metodología de trabajo a partir del trabajo con IAR (Landsat) para realizar cartografía del contenido de materia orgánica en el horizonte superficial del suelo.

**TERCERA PARTE**

**VARIACIÓN ESPACIAL DE  
LOS SUELOS  
EN LA  
CUENCA DEL ARROYO SÁNCHEZ**

## Introducción

El objetivo de esta parte del trabajo es evaluar la respuesta espectral del suelo descubierto a partir de información de imágenes Landsat. Para cumplir este objetivo es necesario primeramente conocer el comportamiento espectral de los suelos y definir patrones de firmas espectrales que permitan interpretar la información satelital. La determinación de los patrones espectrales de los suelos constituye una tarea compleja, ya que el suelo es un sistema complejo.

El suelo es un sistema natural, producto de la alteración, removilización y organización de la materia en la capa superficial de la corteza terrestre, por acción de la vida, los elementos climáticos y los intercambios de energía (Boulaine, 1969). Un volumen más o menos organizado situado en la superficie terrestre, constituido por elementos sólidos, líquidos y gaseosos (Morel, 1996). Un sistema complejo y dinámico, que evoluciona por la acción de factores externos: climáticos (intercambio de agua, energía y gases), bióticos (vegetación, micro y macro organismos, residuos), paisaje (relieve, material geológico), tiempo (acción de los procesos) y acción antrópica (usos del sistema).

En síntesis y para los efectos de este trabajo, los suelos pueden ser considerados como el producto organizado de la alteración de la superficie de la corteza terrestre bajo la acción de agentes climáticos y biológicos (Musy y Soutter, 1991), una estructura natural cuatridimensional que incluye el tiempo y el espacio (Lozet y Mathieu, 2002). Las actividades antrópicas en su diversidad de acciones productivas, generan alteraciones en el funcionamiento del sistema y por lo tanto en su estructura. El comportamiento espectral del suelo es resultante de las propiedades intrínsecas del sistema, pero también de las condiciones externas que condicionan el funcionamiento del sistema.

Numerosos trabajos desde la década de 1960 han aportado información sobre la reflectancia de los suelos, poniendo énfasis en algunos de sus materiales constituyentes o propiedades resultantes (Bowers y Hanks, 1965; Condit, 1970; Planet, 1970; Al-Abbas et al. 1971; Cipra et al. 1971; Matthews et al. 1973; May y Petersen, 1975; Daels y Antrop, 1977; Gerbermann y Neher, 1979; Storer y Baumgardner, 1981; Baumgardner et al. 1985, Canas y Barnet, 1985; Adams *et al.* 1986; Milton y Webb, 1987; Cierniewski, 1989; Crowley, 1991; Eshel *et al.* 2004;). Sin embargo, la reflectancia corresponde a un conjunto de factores que no son independientes y deben

ser integrados en la comprensión del balance de la energía radiante que llega a la superficie del suelo.

La necesidad impuesta por el crecimiento sostenido de la siembra de precisión impone nuevamente el desafío de resolver un nuevo impulso a resolver en la práctica el problema de la distribución espacial del contenido de materia orgánica del suelo como indicador de disponibilidad de nutrientes (Dehann y Taylor, 2004) y la teledetección aparece como la solución más económica.

Desde el punto de vista del trabajo con sensoramientos remotos, los suelos pueden ser considerados en una primera aproximación como un sistema sencillo, del que se analiza el balance en los flujos de energía (Cipra *et al.* 1980). La energía radiante incidente (se denomina energía radiante a la energía transportada por las ondas electromagnéticas y en el trabajo con imágenes satelitales tipo Landsat la fuente es la radiación emitida por el sol) en una superficie se distribuye en tres procesos diferentes:

- Reflexión: proporción de la energía radiante incidente reflejada, originando un flujo reflejado (reflectancia).
- Absorción: proporción de la energía radiante incidente que es absorbida por la superficie (absorbancia).
- Transmisión: proporción de la energía radiante incidente que es transmitida por el cuerpo receptor, en general bajo otras formas de energía (transmitancia).

La suma de estos tres procesos o factores en cualquier objeto que recibe energía radiante incidente es igual a 1, o sea al total de la radiación incidente. En el caso de los estudios de suelos se puede considerar a este como un material opaco y la transmisión se aproxima a cero (Bowers y Hank, 1965). Por lo tanto la relación de la radiación solar en la superficie es regulada por la relación entre la reflexión y la absorción. Al aumentar la reflexión disminuye la absorción en una relación de la forma  $y = 1 - x$ .

La metodología del análisis y evaluación de suelos mediante técnicas de teledetección es establecer relaciones esperables entre el factor de reflectancia de los suelos (razón entre el flujo radiante reflejado por una superficie y el flujo radiante incidente, para una longitud de onda determinada) y las propiedades de los suelos (Segura-Castruita *et al.* 2003). O sea, evaluar los factores que inciden en la variación de la reflectancia de los

suelos, para cada una de los rangos de longitudes de onda que registra el sensor del satélite (Huete *et al.* 1984; Chen *et al.* 2002). En la región óptica del espectro tienen su manifestación energética las rotaciones y vibraciones moleculares de la materia, como consecuencia de la incidencia de la radiación electromagnética (Pinilla, 1995).

Los principales elementos del sistema suelo que influyen en su reflectancia son: la materia orgánica, la humedad, el Fe, el tamaño de partículas, su estructura y rugosidad (Palacios Oureta *et al.*, 1999; Salisbury y D'Aria, 1992; Frazier y Cheng, 1989; Stoner y Baumgardner, 1981; Al- Abbas, 1971;; Bowers y Hank, 1965). Kristof *et al.* (1974) sostienen que la materia orgánica tiene el principal rol en las propiedades de reflectancia del suelo, cuando su contenido es superior al 2% pero también indica que resulta importante analizar el comportamiento por la presencia de óxidos de hierro y de manganeso. Al-Abbas (1971) indica que la correlación entre la materia orgánica y la reflectancia de los suelos es negativa, así como también el contenido de arcilla presenta el mismo comportamiento.

La primera acción desde la teledetección es la determinación de áreas o unidades con suelos que presentan diferencias en el comportamiento espectral. En esta identificación o separación de unidades, el suelo es considerado como un volumen indiferenciado y continuo que tiene un comportamiento en su respuesta espectral diferencial en el espacio. Estas unidades producto del análisis de la respuesta espectral, pueden ser definidas por aspectos vinculados al parcelado del territorio, usos diferenciales del suelo, niveles de erosión, etc. o por la segmentación del territorio de acuerdo a su nivel de respuesta en una o más bandas de la imagen trabajada. El comportamiento espectral del suelo, difícilmente puede ser evaluado linealmente como la variación de una de las propiedades o factores del suelo. Se debe considerar que el comportamiento espectral es la resultante de la interacción de varios procesos, factores y propiedades del suelo (Ishida y Ando, 1999; Frazier,1989;). Es a partir de la modelización de la interacción de estos elementos que se analiza la respuesta del comportamiento espectral del suelo, generando hipótesis sobre el comportamiento de uno de los componentes del suelo y las variaciones en la respuesta espectral, por ejemplo la materia orgánica.

## **A - COMPORTAMIENTO ESPECTRAL DEL SUELO**

### **i) Introducción**

Los elementos constituyentes del sistema suelo evolucionan con el tiempo, se organizan, se estructuran, se diferencian, se movilizan, etc. Existen dos aspectos en la organización y movilización continua de la materia del suelo: la fase vertical y la fase horizontal.

La fase vertical se vincula a la variación puntual en la dimensión horizontal y en profundidad se manifiesta en la diferenciación en horizontes. Desde el punto de vista de la teledetección es el límite entre el suelo y la atmósfera que presenta el mayor interés, pero esto sin desconocer que la interacción entre los horizontes de un suelo es dinámica y permanente. Toda manifestación externa que se presente en este límite es función del comportamiento global del suelo en tanto que sistema único, y por tanto la medición del límite suelo-atmósfera no se refiere nunca a una cobertura de espesor infinitesimal, pero tampoco puede ser considerada como una manifestación directa de todos los horizontes del suelo.

La fase horizontal, se refiere específicamente a la distribución espacial de las propiedades del suelo en el paisaje. Es en esta fase donde el trabajo con sensoramientos remotos aporta información significativa, para comprender las variaciones de la distribución espacial de los elementos constituyentes del suelo. La obtención de información en el dominio pedología - teledetección presenta en principio dos grandes características: la aproximación desde la teledetección hacia la ciencia del suelo y la aproximación desde la ciencia del suelo hacia la teledetección.

En la aproximación desde la teledetección hacia el sistema suelo, el suelo es considerado como un factor que interactúa en el balance energía incidente / energía reflejada desde una parte de la superficie de la Tierra. El factor suelo, por lo tanto, aporta un condicionamiento en el factor de reflectancia de energía (energía registrada en un sensor remoto). La aproximación desde los suelos hacia la teledetección, está constituida por los aportes del análisis conceptual, que contribuyen en la explicación de la variación espacial del comportamiento espectral. La estructura y funcionamiento del

sistema suelo pueden diferenciar espacialmente la reflectancia de energía desde la superficie de la tierra hacia el sensor remoto (Krishnan *et al.* 1980).

En la primera aproximación el suelo es considerado como un sistema de «caja negra», el análisis se centra en la información energética obtenida por el sensor remoto. En la segunda aproximación el suelo es considerado un sistema dinámico, cuya diferenciación cuantitativa y cualitativa condiciona el funcionamiento energético del sistema (temporal y espacialmente) y por lo tanto condiciona la información obtenida en el sensor remoto.

El objeto de análisis pedología - teledetección, consiste entonces en la integración de las dos aproximaciones presentadas. O sea, moverse en el espacio del conocimiento desde:

- La información obtenida por el sensor para establecer diferenciaciones espaciales en el sistema que condiciona el factor de reflectancia (sistema suelo) por diferencias en los registros obtenidos.
- El análisis puntual de muestras de suelo y sus respuestas energéticas en tanto que radiación con alto nivel de interpretación conceptual, pero sin posibilidades de extrapolar los resultados en el espacio entre las muestras.

La aproximación del análisis pedología - teledetección se presenta en un espacio de trabajo científico que se mueve entre cierto nivel de generalización y cierto nivel de detalle. Para acotar estos niveles de aproximación (generalización y nivel de detalle) al objeto de análisis, es prioritario definir la escala de trabajo y la escala de presentación de los resultados a los que se pretende arribar.

Por otra parte, es necesario comprender que el sistema de trabajo pedología – teledetección está constituido por aportes complementarios que permiten la retroalimentación entre ambos. También es importante destacar que ni la teledetección podrá aportar todas las informaciones necesarias para el estudio de la cobertura de suelos (es decir no podrá sustituir totalmente la obtención de información desde los estudios de terreno) ni la pedología solamente sobre la base de estudios de terreno podrá

aportar toda la información necesaria para analizar la variabilidad espacial continua de las propiedades del suelo en el paisaje.

La interacción entre la radiación solar incidente y la materia es una de las bases de la teledetección y por lo tanto de interpretación de las imágenes satelitales. Un objeto determinado en un momento preciso y ocupando una posición en el espacio de la superficie terrestre presenta un comportamiento espectral que le es propio y se denomina “firma espectral”.

La reflectancia de los suelos, independientemente del tipo de suelo y las condiciones de medición es una curva creciente entre los 400 y 1450 nm. (Girard, 1999). En este trabajo se avanzó en la determinación de la variabilidad de la reflectancia de acuerdo a los componentes del suelo y al funcionamiento del sistema, y obtener así su firma espectral.

Para la determinación de la firma espectral de los suelos se trabaja en forma conjunta con el Observatoire Midi-Pyrénées, OMP<sup>1</sup>.

## **ii) Materiales y métodos**

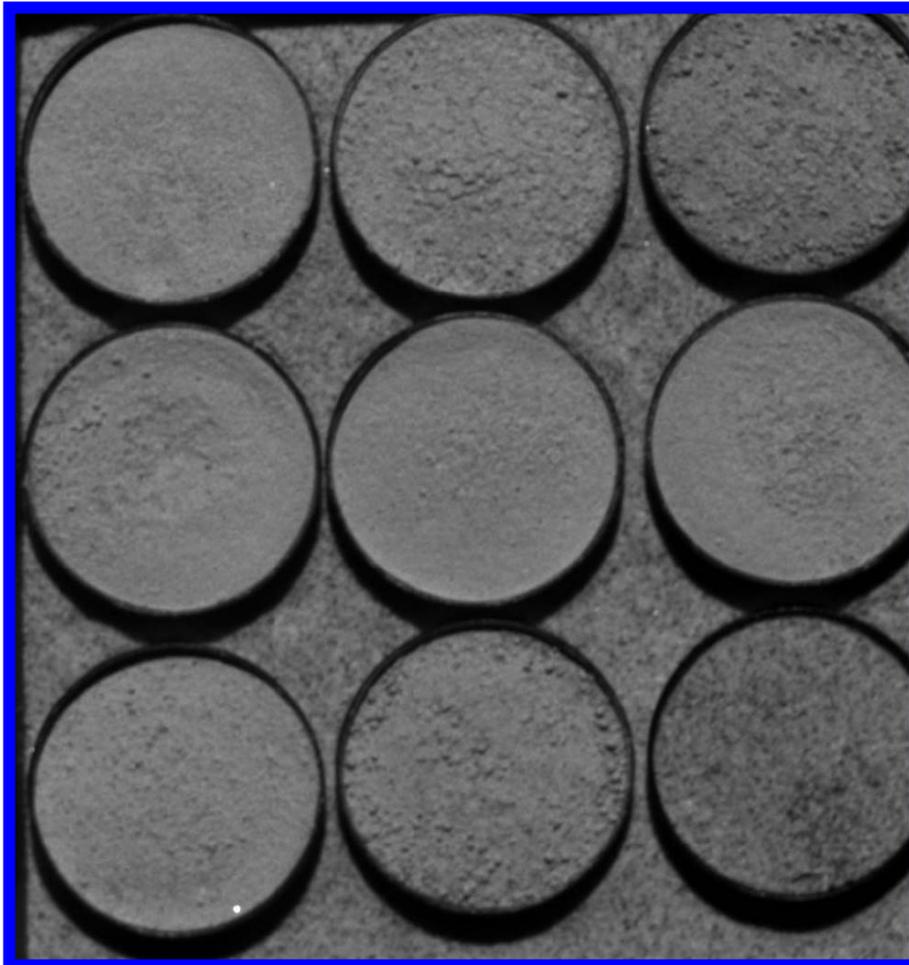
La metodología de trabajo consiste en la medición en los laboratorios del OMP de la reflectancia de distintas muestras, que se pueden separar en dos grandes grupos:

- a) muestras de mezclas de materiales constituyentes del suelo.
- b) muestras de suelos.

---

<sup>1</sup> El OMP es un componente de la Universidad Paul Sabatier (Toulouse III), que agrupa siete laboratorios de ciencias del universo de esta universidad, más una unidad de servicios e investigación. Es también el OMP un observatorio de ciencias del universo del CNRS/INSU. En el contexto del desarrollo de este programa se vinculó la UMR 5562 – DTP: “Dynamique Terrestre et Planétaire”.

**Figura 27: Imagen resultado del captor del OMP, Bandeja 1, (banda = 1,018 nm)**



Las muestras son de 30 a 40 gramos colocadas en cubetas (Caja de Petri) y acondicionadas en bandejas de 9 cubetas (figura 27), sobre un fondo de materiales conocidos.

Estas bandejas son la base para la medición de la reflectancia en los laboratorios del OMP en longitudes de onda desde 0.4020 a 1.0500 nm distribuidas en 19 bandas. Posteriormente por cambios técnicos en los laboratorios del OMP se trabaja en longitudes de onda desde 0.501 a 1.018 nm distribuida en 15 bandas, según los filtros utilizados en cada fecha de trabajo (tabla 31). Igualmente durante el periodo de realización de los trabajos de laboratorio (1/10/2001 al 6/5/2004) se realizó un cambio

---

en el sistema, que varió la fuente de luz incidente, pasando de trabajar con luz solar hacia luz artificial.

**Tabla 31: Fechas de la mediciones y bandas utilizadas.**

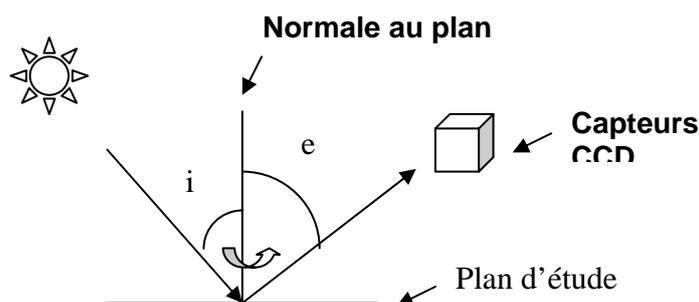
Luz Natural (1/10/2001 y 12/3/2003)			Luz Artificial (6/5/2004)	
Bandas	Longitud de onda (nm)		Bandas	Longitud de onda (nm)
1	0.420			
2	0.449			
3	0.501		1	0,501
4	0.559		2	0,559
5	0.601		3	0,601
6	0.650		4	0,65
7	0.699		5	0,699
8	0.791		6	0,791
9	0.859		7	0,859
10	0.880		8	0,88
11	0.902		9	0,902
12	0.907			
13	0.920		10	0,92
14	0.960		11	0,96
15	0.977		12	0,977
16	0.986		13	0,986
17	1.001		14	1,001
18	1.018		15	1,018
19	1.050			

El radiómetro del OMP permite almacenar la información en forma de imagen (formato .flt) y un header (formato .hdr) adjunto con la información de la imagen. Este producto puede ser trabajado con los mismos criterios y metodologías que una imagen satelital.

Los estudios espectrales se realizaron teniendo en cuenta las siguientes condiciones:

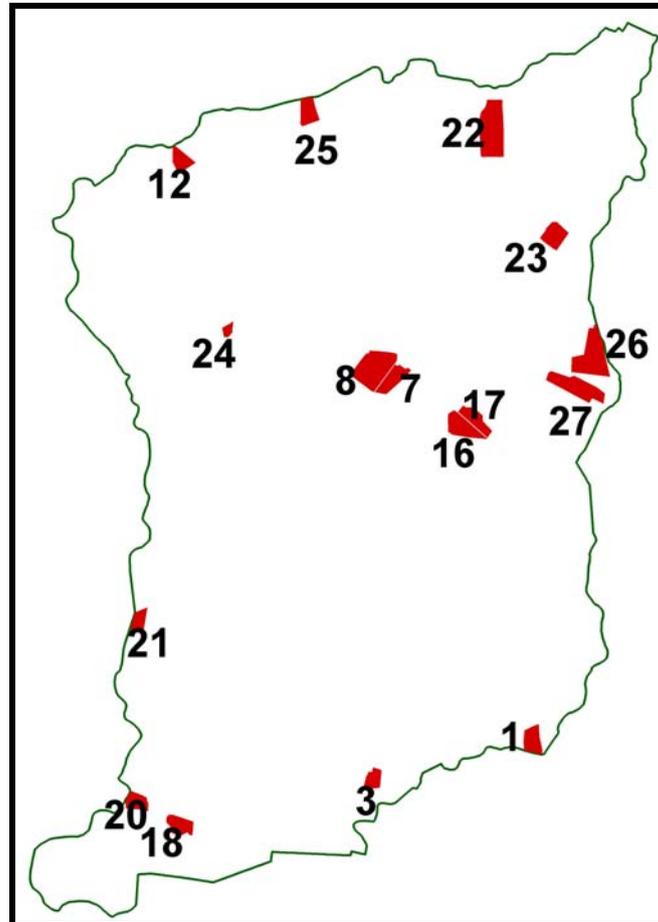
- las mediciones se realizan para cada bandeja conteniendo todas las cubetas.
- La imagen generada permite analizar un polígono al interior de cada cubeta sin perturbación de borde. Cada polígono fue definido de manera que contenga 30.000 píxeles.
- Las condiciones de laboratorio para la realización de la imagen corresponden a ángulo de emergencia: 0 grado y ángulo de incidencia: 30 grados. Según figura 28.

**Figura 28: Esquema de trabajo en los laboratorios del OMP.**



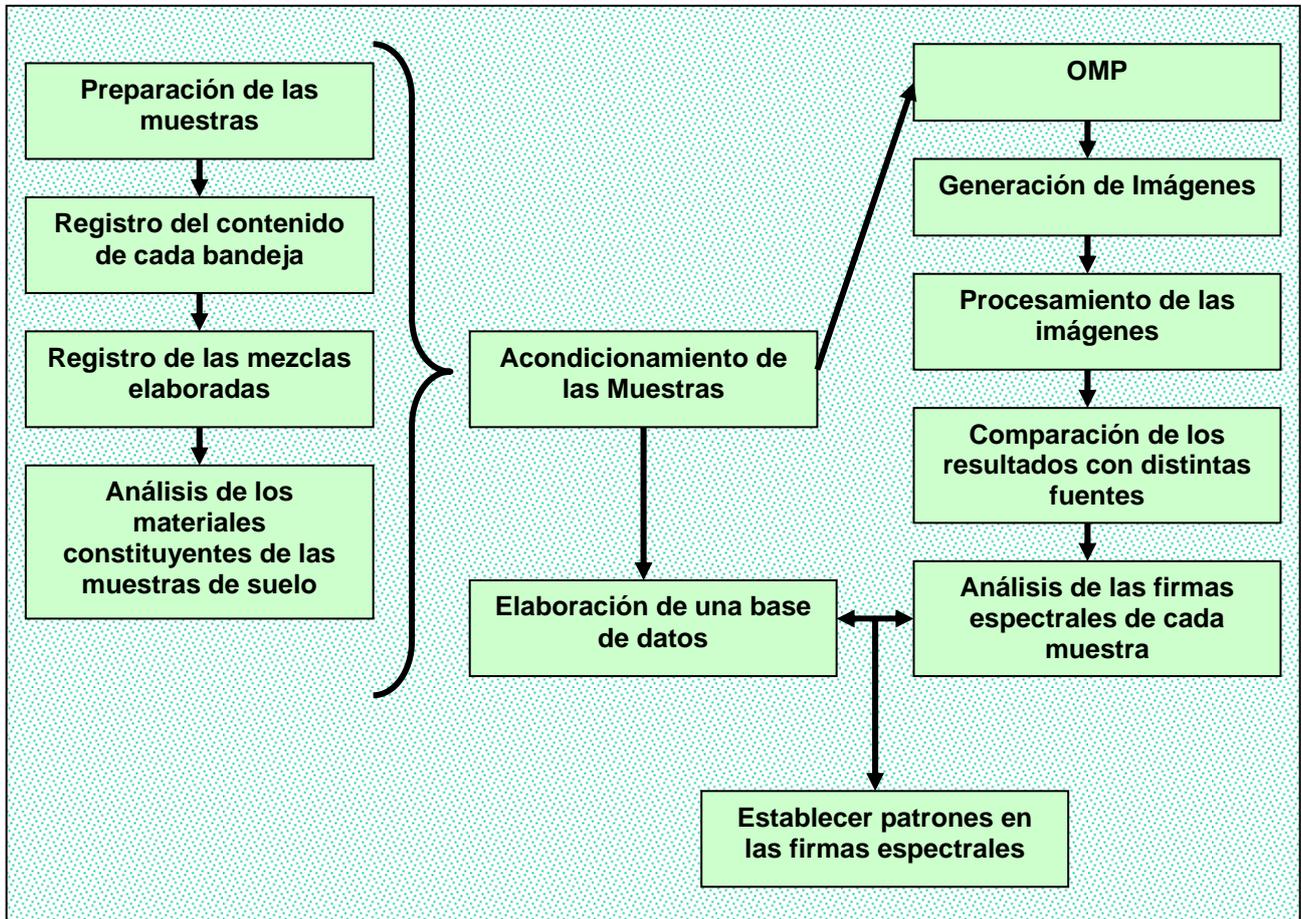
La distribución espacial de las muestras de suelo en la cuenca del A° Sánchez se presenta esquemáticamente en la figura 29.

**Figura 29: Distribución espacial de las parcelas de muestreo**



En la figura 30 se presenta un esquema con la estructura de trabajo seguida para la organización de la información y procesamiento de los resultados para la evaluación de la firma espectral de las muestras utilizadas en esta etapa.

**Figura 30: Esquema de trabajo para el tratamiento de las imágenes del OMP**



### **Comparación entre dos condiciones (luz natural, luz artificial) de registro de las imágenes en el OMP**

Se comparan los resultados a partir del análisis de las dos series de imágenes que contienen 26 muestras. El procedimiento consiste en la generación de una matriz de datos que contienen la información de las medias, para cada muestra y para cada imagen.

A partir de la matriz de datos elaborada, que contiene 26 pares por 15 bandas, se analiza si existen diferencias entre las dos muestras. Para la verificación se utiliza estadística no paramétrica realizando el test de Wilcoxon, que permite comparar dos muestras

relacionadas sin conocer su distribución. Se trata de las mismas muestras que son tratadas en dos condiciones diferentes: luz natural y luz artificial.

Para la realización del test se utilizó el programa SPSS 11.5.

La hipótesis nula en la aplicación del test es:

$H_0$  = no existe diferencia entre las dos muestras.

$H_a$  = las dos muestras presentan diferencias significativas.

A partir de esta formulación se realiza el test para las 26 muestras.

En todos los casos se encontró que para un nivel de confianza del 0.001 se debe rechazar la hipótesis nula y es posible aceptar la hipótesis alternativa.

Por lo tanto es posible afirmar que sí existen diferencias entre las dos condiciones de registro de las imágenes.

Posteriormente se realizan las correlaciones entre los dos procedimientos para determinar si las diferencias son sistemáticas. Esto es especialmente importante, ya que una alta correlación entre las dos condiciones en que se generaron las imágenes indica que las muestras siguen un patrón de comportamiento de reflectancia similar, independientemente de la fuente, variando solamente la magnitud de la reflectancia.

Para analizar las correlaciones entre los dos tratamientos se construye un modelo de regresión entre las dos muestras, ajustando un modelo lineal de correlación entre ambas variables formulando las siguientes hipótesis:

$H_0$  = no existe relación entre las variables.

$H_a$  = las variables están correlacionadas.

Para la realización del test se utilizó el programa SPSS 11.5.

A partir de esta formulación se valida el modelo con un intervalo de confianza del 99%, en todos los casos se debe rechazar la hipótesis nula y es posible aceptar que los valores en las 15 bandas en las dos condiciones de registro de las imágenes están correlacionadas. En la tabla 32 se presentan los coeficientes de correlación entre las dos series de valores para cada muestra. Del cual se desprende que solo en 2 de las 26

muestras las correlaciones son bajas (72 y 87 %). Por lo tanto, es posible afirmar que el comportamiento de las muestras bajo las dos condiciones de registro de las imágenes son similares.

**Tabla 32: Coeficientes de correlación por muestra**

Muestra	R <sup>2</sup>	Muestra	R <sup>2</sup>	Muestra	R <sup>2</sup>
1	0.93	10	0.99	19	0.99
2	0.92	11	0.99	20	0.99
3	0.98	12	0.99	21	0.99
4	0.87	13	0.99	22	0.99
5	0.94	14	0.99	23	0.99
6	0.72	15	0.99	24	0.99
7	0.94	16	0.99	25	0.99
8	0.95	17	0.99	26	0.99
9	0.99	18	0.99		

Por lo tanto el análisis del comportamiento espectral de las 50 muestras analizadas en el OMP se pueden realizar en conjunto independientemente de la fuente de luz utilizada para la creación de la imagen.

### **Síntesis de las muestras enviadas al OMP**

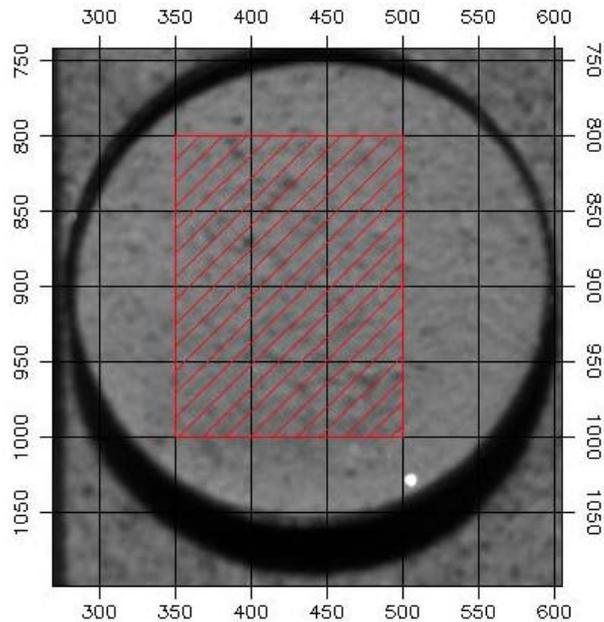
Se generaron imágenes para un total de 47 muestras, de las cuales:

- 20 corresponden a muestras de suelo, distribuidas en la cuenca según figura 29, las muestras fueron obtenidas en los primeros 5 cm de suelo.
- 5 son compost tamizado a 2 mm.
- 22 son mezclas de distintos materiales constituyentes de los suelos, pero que al ser mezclados en forma artificial no forman estructura, cuando se adjunta MO en estas mezclas se trata de compost tamizado a 2 mm.

Para cada muestra se generó una imagen que fue procesada con el programa ENVI 3.5. El procesamiento básico consistió en tres etapas:

- 1) Construcción de una máscara en cada una de las cubetas que cubre una superficie equivalente a 30.000 píxeles. La construcción de esta máscara se realizó con la construcción auxiliar de una grilla homogénea de 50 píxeles de lado, con lo cual

cada celda está compuesta por 2500 píxeles, la integración de 12 celdas permite obtener los 30.000 píxel por cubeta y trabajar sobre cantidades iguales de píxel por cubeta. Por otra parte esto permitió seleccionar aquellas celdas que no presentaran problemas de interferencia con los bordes de las cubetas, un ejemplo se presenta en la figura 31.



**Figura 31: Selección del área de muestreo en una imagen generada por el OMP**

- 2) Extracción de la información referida al área de trabajo seleccionada en la imagen, generando una tabla con los valores medios (de los 30.000 píxeles) por cada una de las bandas.
- 3) Construcción de gráficos por longitudes de onda de forma que permita interpretar las firmas espectrales de cada muestra.

### **iii) Resultados Obtenidos**

Los resultados obtenidos a partir de las imágenes generadas por el OMP son agrupadas en 4 conjuntos:

- 1) 11 muestras de mezclas de materiales donde varía el porcentaje de MO
- 2) 6 muestras de mezclas de materiales donde varía el porcentaje de arcilla y arena.
- 3) 12 muestras de suelos de la cuenca del A° Sánchez.
- 4) 4 muestras del mismo suelo donde varía el tamaño de tamizado

- 1) Variación de MO en mezclas de materiales constituyentes de una suelo, en las tablas 33 y 34 y la figura 32 se presentan los resultado de la reflectancia de 11 muestras. Los materiales constituyentes de la mezcla son: arena de cuarzo entre 0,2 y 0,6 mm; arcilla illita y compost tamizado a 2 mm.

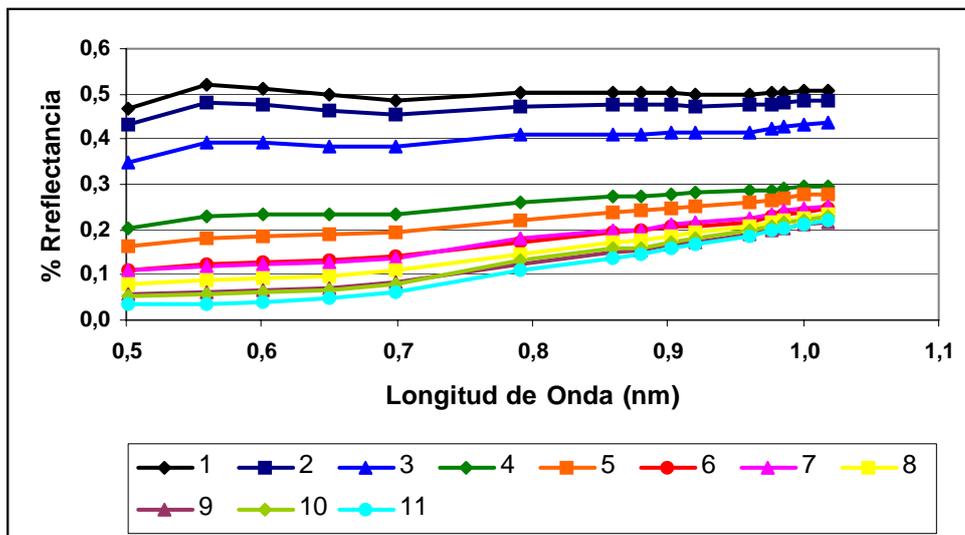
**Tabla 33: Variación de los materiales constituyentes en 11 muestras**

		% Compost	% Arena	% Arcilla	% MM
MO-0%	<b>1</b>	0	50	50	100
MO-10%	<b>2</b>	10	45	45	90
MO-20%	<b>3</b>	20	40	40	80
MO-30%	<b>4</b>	30	35	35	70
MO-40%	<b>5</b>	40	30	30	60
MO-50%	<b>6</b>	50	25	25	50
MO-60%	<b>7</b>	60	20	20	40
MO-70%	<b>8</b>	70	15	15	30
MO-80%	<b>9</b>	80	10	10	20
MO-90%	<b>10</b>	90	5	5	10
Compost	<b>11</b>	100	0	0	0

**Tabla 34: Valores de reflectancia media por muestra y por longitud de onda**

$\lambda$ (nm)	Porcentaje de reflectancia										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,501	0,47	0,43	0,35	0,20	0,16	0,11	0,11	0,08	0,06	0,05	0,04
0,559	0,52	0,48	0,39	0,23	0,18	0,12	0,12	0,09	0,06	0,06	0,04
0,601	0,51	0,48	0,39	0,23	0,19	0,13	0,13	0,09	0,06	0,06	0,04
0,65	0,50	0,46	0,38	0,23	0,19	0,13	0,13	0,10	0,07	0,07	0,05
0,699	0,49	0,46	0,38	0,24	0,19	0,14	0,14	0,11	0,08	0,08	0,06
0,791	0,50	0,47	0,41	0,26	0,22	0,17	0,18	0,15	0,13	0,13	0,11
0,859	0,50	0,48	0,41	0,27	0,24	0,19	0,20	0,17	0,15	0,16	0,14
0,88	0,50	0,48	0,41	0,27	0,24	0,20	0,20	0,18	0,16	0,16	0,15
0,902	0,50	0,47	0,42	0,28	0,25	0,21	0,21	0,19	0,17	0,17	0,16
0,92	0,50	0,47	0,41	0,28	0,25	0,21	0,22	0,19	0,17	0,18	0,17
0,96	0,50	0,47	0,42	0,29	0,26	0,22	0,23	0,21	0,19	0,20	0,19
0,977	0,50	0,48	0,42	0,29	0,27	0,23	0,24	0,21	0,20	0,21	0,20
0,986	0,50	0,48	0,43	0,29	0,27	0,23	0,24	0,22	0,20	0,22	0,20
1,001	0,51	0,49	0,43	0,30	0,28	0,24	0,25	0,22	0,21	0,22	0,21
1,018	0,51	0,48	0,44	0,30	0,28	0,25	0,25	0,23	0,22	0,23	0,22

Las 11 muestras seleccionadas constituyen la mezcla de materiales, pero en ningún caso se trata de un suelo real. El objetivo de este análisis es evaluar el comportamiento espectral en la medida que aumenta progresivamente el contenido de compost en la mezcla elaborada.



**Figura 32: Firmas espectrales variación de MO**

Los resultados obtenidos se agrupan en tres categorías:

- Una primera categoría donde el contenido de compost es menor o igual a 20% (muestras 1, 2 y 3) el comportamiento espectral de la mezcla corresponde a la respuesta espectral de la materia mineral, dando por resultado una curva de concavidad negativa, altamente correlacionadas entre ellas (más del 80%) y su ubicación es dependiente del contenido de compost.
- La segunda categoría muestras 4 y 5 (30 y 40 % de compost) el comportamiento es transicional, con la categoría siguiente donde domina el compost en la mezcla. Sin embargo se mantiene la ubicación de la curva de acuerdo a la proporción de compost en la mezcla.
- La tercera categoría incluye a las muestras con más de un 50 % de compost (muestras 6 a 11) la correlación entre las 6 curvas es superior al 99% y también mantienen la tendencia hacia una ubicación inferior en la reflectancia en la medida que aumenta el contenido de compost en la mezcla. Esta categoría presenta las características convencionales de la reflectancia de un suelo: una curva creciente en la medida que aumenta la longitud de onda, continua sin cambios bruscos y con concavidad positiva.

- 2) Variación de MM en mezclas de materiales constituyentes de una suelo, este conjunto esta formado por 6 muestras donde a partir de los mismos materiales usados en las muestras anteriores, se realizan mezclas donde varia la proporción de arena o arcilla, manteniendo la proporción de compost en 5% (tabla 35).

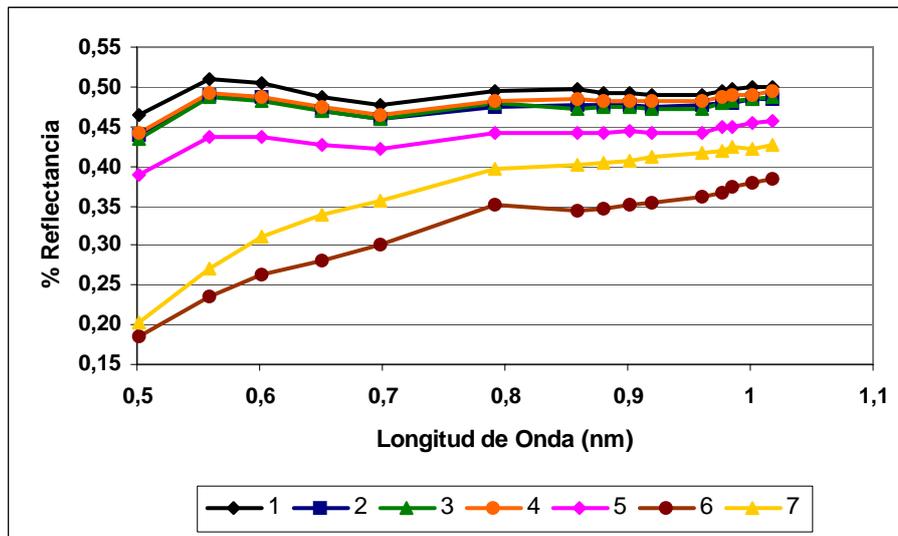
**Tabla 35: Variación de los materiales constituyentes en 6 muestras**

	% Arena	% Arcilla	% MM	% MO
<b>1</b>	0	95	95	5
<b>2</b>	19	76	95	5
<b>3</b>	38	57	95	5
<b>4</b>	57	38	95	5
<b>5</b>	76	19	95	5
<b>6</b>	95	0	95	5
<b>7</b>	100	0	100	0

**Tabla 36: Valores de reflectancia media por muestra y por longitud de onda**

$\lambda$ (nm)	Porcentaje de reflectancia						
	1	2	3	4	5	6	7
0,501	0,46	0,44	0,43	0,44	0,39	0,18	0,20
0,559	0,51	0,49	0,49	0,49	0,44	0,24	0,27
0,601	0,50	0,49	0,48	0,49	0,44	0,26	0,31
0,65	0,49	0,47	0,47	0,47	0,43	0,28	0,34
0,699	0,48	0,46	0,46	0,46	0,42	0,30	0,36
0,791	0,49	0,47	0,48	0,48	0,44	0,35	0,40
0,859	0,50	0,48	0,47	0,48	0,44	0,34	0,40
0,88	0,49	0,48	0,47	0,48	0,44	0,35	0,40
0,902	0,49	0,48	0,47	0,48	0,44	0,35	0,41
0,92	0,49	0,47	0,47	0,48	0,44	0,35	0,41
0,96	0,49	0,48	0,47	0,48	0,44	0,36	0,42
0,977	0,49	0,48	0,48	0,49	0,45	0,37	0,42
0,986	0,50	0,48	0,48	0,49	0,45	0,37	0,42
1,001	0,50	0,48	0,48	0,49	0,46	0,38	0,42
1,018	0,50	0,49	0,49	0,49	0,46	0,38	0,43

La posición de la curva en relación a la reflectancia disminuye en la medida que aumenta la proporción de arena en la mezcla (tabla 36 y figura 33). Sin embargo la importancia de la illita en el color de la mezcla se pone en manifiesto por la forma dominante de la curva con un pico correspondiente al visible en la longitud de onda equivalente al verde (550nm). En la muestra 6 con un 95 % de arena la forma de la curva corresponde a la de la muestra 7 (100%) arena, pero el contenido de un 5 % de compost la ubica en una posición de reflectancia inferior.



**Figura 33: Firmas espectrales variación de MM**

En la figura 33 se destaca la importancia de la illita en las muestras, aún en bajas proporciones. También comparando entre la curva 6 y 7, donde la diferencia es un contenido de 5% de compost en la curva 6, se destaca la importancia que presenta este material en la reflectancia, no solo en la ubicación de la curva sino especialmente en el salto que genera entre el rojo y el infrarrojo cercano, generando un importante cambio de pendiente y de forma en la curva.

- 3) Este conjunto esta formado por 12 muestras de suelos de la cuenca. En la tabla 37 se presentan los materiales constituyentes de estas muestras.

**Tabla 37: Variación de los materiales constituyentes en 12 muestras de suelos**

Muestra		% MO	% Arena	% Limo	% Arcilla
7.1	<b>1</b>	2.551	64.1	15.9	20
8.4	<b>2</b>	2.696	66.1	18.3	15.6
21.4	<b>3</b>	3.167	20.4	50.4	29.2
17.4	<b>4</b>	3.243	63.4	19.8	16.8
22.1	<b>5</b>	3.347	43.5	29.4	27.1
23.4	<b>6</b>	3.361	57.8	19.6	22.6
1.6	<b>7</b>	4.089	31.7	41.1	27.2
25.1	<b>8</b>	5.165	15.2	19.7	65.1
3.1	<b>9</b>	5.358	25.5	48.6	25.9
18.5	<b>10</b>	5.632	20.7	48.9	30.4
12.5	<b>11</b>	5.858	32.9	16.2	50.9
20.7	<b>12</b>	6.199	31.9	31	37.1

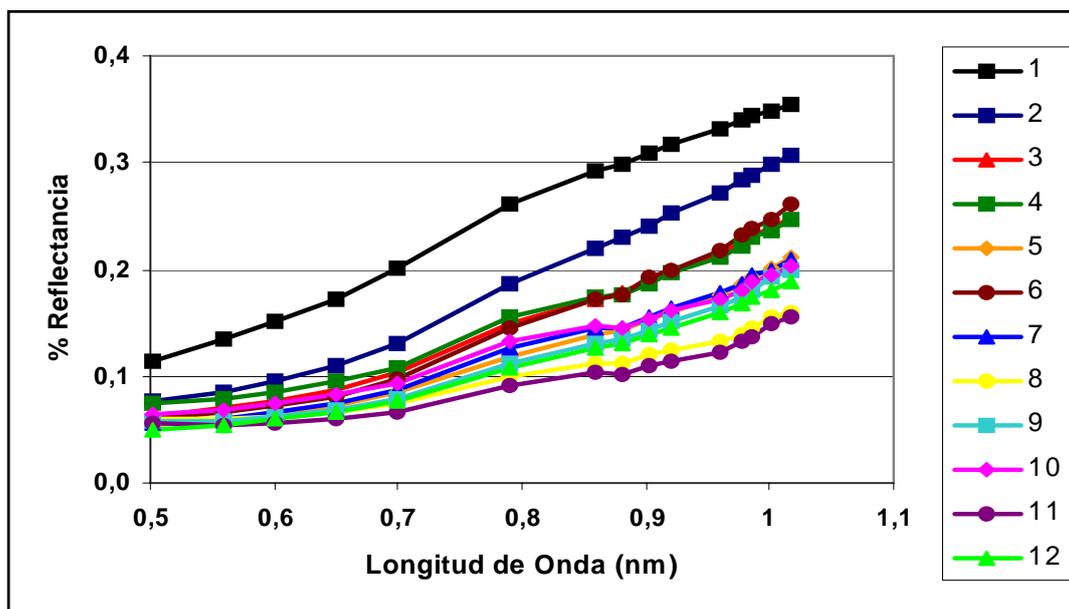
**Tabla 38: Valores de reflectancia media por muestra y por longitud de onda**

$\lambda$ (nm)	Porcentaje de reflectancia											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,501	0,11	0,08	0,06	0,07	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05
0,559	0,14	0,09	0,07	0,08	0,06	0,07	0,06	0,06	0,06	0,07	0,05	0,05
0,601	0,15	0,10	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,08	0,06	0,06
0,65	0,17	0,11	0,09	0,09	0,07	0,08	0,07	0,07	0,07	0,08	0,06	0,07
0,699	0,20	0,13	0,10	0,11	0,08	0,10	0,09	0,07	0,08	0,09	0,07	0,08
0,791	0,26	0,19	0,15	0,16	0,12	0,14	0,13	0,10	0,11	0,13	0,09	0,11
0,859	0,29	0,22	0,17	0,17	0,14	0,17	0,14	0,11	0,13	0,15	0,10	0,13
0,88	0,30	0,23	0,18	0,18	0,14	0,18	0,15	0,11	0,13	0,15	0,10	0,13
0,902	0,31	0,24	0,19	0,19	0,15	0,19	0,15	0,12	0,14	0,15	0,11	0,14
0,92	0,32	0,25	0,20	0,20	0,16	0,20	0,16	0,12	0,15	0,16	0,11	0,15
0,96	0,33	0,27	0,21	0,21	0,18	0,22	0,18	0,13	0,17	0,17	0,12	0,16
0,977	0,34	0,28	0,23	0,22	0,19	0,23	0,19	0,14	0,18	0,18	0,13	0,17
0,986	0,34	0,29	0,23	0,23	0,19	0,24	0,19	0,14	0,18	0,19	0,14	0,17
1,001	0,35	0,30	0,24	0,24	0,20	0,25	0,20	0,16	0,19	0,19	0,15	0,18
1,018	0,35	0,31	0,25	0,25	0,21	0,26	0,21	0,16	0,20	0,20	0,15	0,19

**Tabla 39: Correlaciones %MO - % Reflectancia según longitud de onda**

$\lambda$ (nm)	$R^2$	$\lambda$ (nm)	$R^2$
0,501	0.4599	0,902	0.6912
0,559	0.5170	0,92	0.6937
0,601	0.5295	0,96	0.7065
0,65	0.5577	0,977	0.7137
0,699	0.5872	0,986	0.7192
0,791	0.6381	1,001	0.7183
0,859	0.6685	1,018	0.7232
0,88	0.6772		

Figura 34: Firmas espectrales 12 muestras de suelos



En las 12 muestras se registra una correlación negativa entre el porcentaje de reflectancia y el porcentaje de contenido de materia orgánica. En la tabla 39 se presentan los valores e correlación en un modelo de regresión lineal ( $P < 0.01$ ). Un elemento importante a destacar es que la correlación negativa aumenta en forma sostenida en la medida que aumenta la longitud de onda (tabla 39 y 38). O sea, la importancia del contenido de MO en el suelo en la ubicación de la curva de reflectancia aumenta cuanto mayor es la longitud de onda.

El segundo elemento importante a destacar es el cambio de pendiente pronunciado, presente en las 12 curvas, entre las longitudes de onda correspondientes al rojo e infrarrojo cercano.

Por último destacar que la disminución de la reflectancia en el espectro es diferencial, las posiciones de las curvas en la figura 34 permite concluir que la proporción de MO en las muestras de suelo tiene mayor importancia en la medida que aumenta la longitud de onda, la amplitud de la diferencia en la menor longitud de onda es 6% y en la mayor longitud de onda es 17 %.

4) Reflectancia de 4 muestras de suelos con diferentes tamizados  
 Muestra de suelo 16.1 (% MO = 4,089) según diferentes tamizado

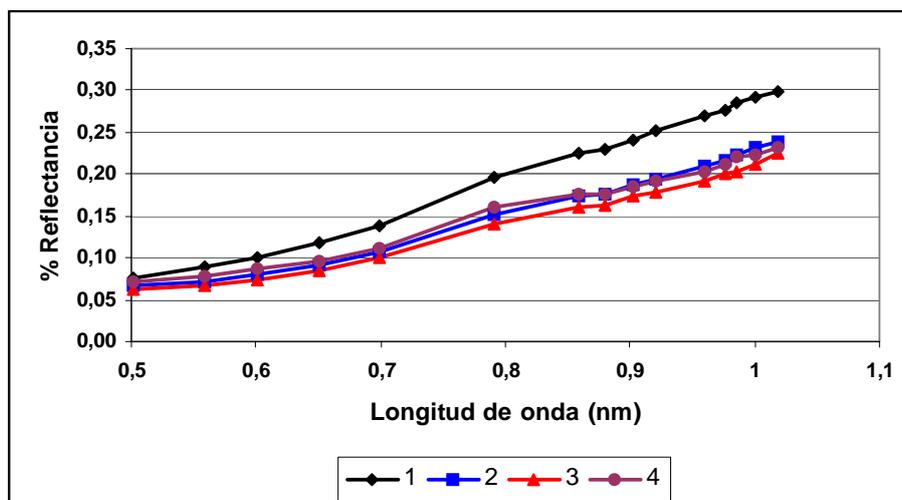
**Tabla 40: Tamaño de Tamizado**

	Tamiz
1	0<M<0.5
2	0.5<M<1
3	1<M<2
4	M>2

**Tabla 41: Valores de reflectancia media por muestra y por longitud de onda**

$\Lambda$ (nm)	Porcentaje de Reflectancia			
	1	2	3	4
0,501	0,08	0,07	0,06	0,07
0,559	0,09	0,07	0,07	0,08
0,601	0,10	0,08	0,07	0,09
0,65	0,12	0,09	0,08	0,10
0,699	0,14	0,11	0,10	0,11
0,791	0,20	0,15	0,14	0,16
0,859	0,22	0,17	0,16	0,18
0,88	0,23	0,18	0,16	0,18
0,902	0,24	0,19	0,17	0,18
0,92	0,25	0,19	0,18	0,19
0,96	0,27	0,21	0,19	0,20
0,977	0,28	0,22	0,20	0,21
0,986	0,28	0,22	0,20	0,22
1,001	0,29	0,23	0,21	0,22
1,018	0,30	0,24	0,23	0,23

**Figura 35: Firmas espectrales 4 muestras de suelos**



El tamaño de las partículas es especialmente significativo con un tamizado menor a 0,5 mm, sin embargo para los tres tamaños entre 0,5 y 2 mm (tabla 40 y 41, figura 35) no se detectan diferencias significativas. Para las curvas 2, 3 y 4 se determinó que presentan diferencias significativas (test de Wilcoxon,  $p < 0.001$ ) y la correlación en un modelo de regresión es de 99% ( $p < 0.01$ ). Por tanto es, posible afirmar que el tamaño de las partículas es el factor que incide en la reflectancia de los suelos, sin embargo con los datos disponibles existe un importante de confusión entre los tamaños superiores a 0.5 mm.

#### **iv) Discusión de los resultados**

El trabajo conjunto con el OMP, permitió disponer de imágenes de excelente calidad para evaluar los comportamientos espectrales de diferentes materiales y tipos de suelos. Las curvas de reflectancia obtenidas permiten avanzar en la comprensión del comportamiento radiométrico de los píxeles que componen una imagen.

- La reflectancia de los suelos no se corresponde a la sumatoria ponderada de las reflectancias de sus elementos constitutivos.

Se debe rechazar la idea de comprender el comportamiento radiométrico de un suelo por la integración del comportamiento de sus elementos constituyentes. Las mezclas elaboradas generaron firmas espectrales totalmente diferentes a los patrones correspondientes a los suelos.

- El patrón de comportamiento espectral de los suelos es función de la organización de sus materiales constituyentes.

La importancia de la estructura de las muestras de suelos al nivel de condiciones controladas surge como resultado de las firmas espectrales generadas. La reflectancia disminuye en la medida que aumenta el nivel de organización de la materia.

- Las curvas de reflectancia de los suelos son continuas.

Esta observación concordante con los resultados citados en la literatura (Krishnan et al. 1980; King, 1984; Frazier, 1989) resulta la propiedad de la firma espectral de los suelos más importante desde el punto de vista de la teledetección.

- La variación de la reflectancia varía en sentido inverso al contenido de MO del suelo

Como se muestra en la figura 32, la reflectancia de los suelos es controlada principalmente por el contenido de MO. Lo cual es lógico en el espectro correspondiente al visible (por la variación de color) y en el infrarrojo por la capacidad de contener mayor cantidad de agua en su matriz.

- Cuando varía el contenido de MO la mayor diferencia se registra entre las bandas correspondientes al rojo e infrarrojo cercano.

Este resultado empírico que se registra en todas las muestras analizadas, constituye un factor importante para interpretar los datos generados por los sensores remotos.

- El tamaño de las partículas es un factor que condiciona la reflectancia de las muestras.

Los análisis realizados permitieron evidenciar la importancia del tamaño de las partículas. Sin embargo la escala de trabajo no permitió evaluar la magnitud de este factor.

- La extrapolación de los resultados obtenidos a partir de muestras en laboratorio permite una aproximación a las condiciones de campo.

Pero es importante asumir que no se puede considerar una extrapolación mecánica de resultados, solamente una guía que orienta la interpretación de datos que estarán afectados por nuevas variables.

Los datos espectrales que usan numerosas bandas tendientes a un espectro continuo se han utilizado extensamente para la detección de la estructura del suelo (Hoffbeck y Landgrebe 1996, Palacios-Orueta y Ustin 1998, Galvao et al. 2001). Este uso amplio es debido al potencial de detectar cambios en alguna longitud de onda. Sin embargo, esta metodología presenta una importante limitación, la generación de la información. La plataforma AVIRIS aerotransportada, requiere un vuelo especial, lo que dificulta su utilización en comparación con la observación regular por sensores basados en los satélites.

Por otra parte la firma espectral continua de los suelos es una característica fundamental para interpretar la información de los sensores remotos. Por una parte el no presentar picos de absorción y reflectancia máxima dificulta la generación de índices a partir de las bandas correspondientes (Ej: NDVI). Por otra parte, el comportamiento regular de la

firma espectral presenta el potencial de utilizar todas las bandas disponibles en el espectro visible e infrarrojo cercano y medio.

El trabajo de campo y los espectrómetros de laboratorio con espectros de alta resolución aumentan las potencialidades de interpretar la respuesta espectral de los objetos de la superficie de la tierra (Milton et al. 1995, Palacios-Orueta y Ustin 1998, Clark 1999, Leone y Sommer 2000). La interpretación de las imágenes de los sensores remotos en plataformas de satélites, que generan información en bandas discretas que abarcan un amplio espectro, puede mejorar mucho integrando estas dos metodologías de trabajo.

Recientemente, la agricultura de la precisión ha generado un nuevo interés por los datos de suelos basados en los satélites, con una tendencia permanente por mejorar las resoluciones espaciales, temporales y espectrales (Mulla 1995, Strachan et al. 2002). La construcción de cartas de suelos a nivel de detalle con información satelital constituye un importante desafío.

## **B - EVALUACIÓN DE LA REFLECTANCIA DE SUELOS DESCUBIERTOS UTILIZANDO IMÁGENES LANDSAT**

### **i) Introducción**

La evaluación de suelos usando información satelital de sensores pasivos de alta resolución (Landsat TM) y con frecuencia temporal media, constituye un insumo necesario para la agricultura. La MO del suelo es considerada un indicador fuerte de la calidad del suelo (Mielniczuk, 1999), pero es altamente variable y reacciona rápidamente a los cambios externos, presentando patrones espaciales de comportamiento en el horizonte superficial del suelo difícil de monitorear (Daniel, 2002).

El objetivo de esta parte del trabajo es: Evaluar la respuesta espectral del suelo descubierto a partir de la información de imágenes Landsat e instrumentar un modelo de evaluación espacial de la materia orgánica de los suelos a partir de la información de imágenes Landsat y la distribución de factores ambientales conocidos, pendientes y posición en el paisaje.

Utilizando los resultados obtenidos en el análisis de la reflectancia de muestras de suelos en laboratorio como insumos para interpretar las informaciones de las imágenes Landsat, se generan algunos supuestos.

- El aumento de MO en el suelo disminuye la reflectancia en todas las longitudes de onda del espectro trabajado.
- La disminución en el espectro es diferencial.
- Las diferencias en las pendientes de las curvas es mayor entre el rojo y el infrarrojo cercano.
- La importancia de la MO en la reflectancia está relacionada a la forma y la posición de la curva, más que a los valores absolutos que se registran en cada longitud de onda.

Diversas estrategias se han desarrollado para estimar el contenido de MO del suelo a partir de información satelital. En particular los antecedentes en la utilización de imágenes Landsat tienden a emplear un número reducido de las bandas disponibles,

buscando establecer índices o combinaciones que presenten alta correlación con el contenido de MO del suelo.

Krishnan et al. (1980) determina a partir de análisis de laboratorio que las mejores longitudes de onda para predecir el contenido de MO de un suelo se ubica en la relación entre las longitudes de onda correspondientes a 0.6236 nm y 0.5644 nm. Trabajando en la región del espectro correspondiente al visible.

Satterwhite y Henley (1987) analizan el comportamiento de distintas proporciones entre bandas TM: 2/1, 3/1, 4/1, 3/2, 4/2 y 4/3 determinando la importancia del incremento entre las bandas 3 y 4 entre los diferentes tipos de suelos.

Frazier y Cheng (1989) evalúan una serie de proporciones entre bandas TM: 1/4, 3/4, 5/4, 4/5, 3/1, 5/3; estableciendo a partir de análisis de cluster. Señalando la potencialidad de las proporciones entre las bandas 1/4, 3/4, 5/4, para evaluar la MO del suelo. Destacando la importancia de la banda 4. Los algoritmos trabajados se realizan directamente sobre los DN, lo que permite solamente indicar tendencias pero no generalizar los resultados.

Palacios-Orueta y Ustin (1998) trabajando con sensor AVIRIS aerotransportado determinan que la variación del contenido de MO del suelo se representa adecuadamente en la zona del espectro entre el visible y el infrarrojo cercano. En un nuevo trabajo (Palacios-Orueta et al. 1999) destaca la importancia de las longitudes de onda correspondientes al rojo como la mejor longitud de onda que permite modelar la variación de la MO del suelo.

Ishida y Ando (1999) utilizan las tres bandas TM correspondientes al visible para predecir el contenido de MO del suelo, asumiendo que al aumentar la MO disminuye notoriamente los valores de DN en la banda 3.

A partir de los supuestos generados con los análisis de reflectancia de las muestras conocidas de suelos y la disponibilidad de información en las imágenes Landsat es que se propone la integración de las 6 bandas TM correspondientes al visible e infrarrojo cercano y medio en un solo algoritmo que refleje el comportamiento de la firma espectral del suelo según el contenido de MO.

## **ii) Materiales y métodos**

En la figura 36 se presenta un esquema general de la metodología desarrollada para evaluar las variaciones de la reflectancia en parcelas con suelo descubierto.

Para la evaluación de las firmas espectrales de suelos descubiertos a partir de las imágenes Landsat se seleccionaron, 69 puntos de muestreo en 16 parcelas piloto. La selección de las parcelas se realizó en base a cuatro criterios:

- 1) La distribución espacial de las parcelas piloto deberían abarcar la diversidad de ambientes de la cuenca, en especial la diversidad de suelos registrada en la cartografía existente.
- 2) Que estuvieran representados los diversos usos del suelo que se desarrollan en la cuenca.
- 3) Accesibilidad a las parcelas de muestreo.
- 4) Que en noviembre de 1998 estuvieran con suelo descubierto.

La selección de los puntos de muestreo al interior de cada parcela se realizó de acuerdo a la factibilidad de identificar elementos en el terreno que permitieran una medición precisa de la correspondencia del punto de muestreo con un pixel de la imagen satelital. A tales efectos se trabajó con apoyo de campo de cartas topográficas, fotografías aéreas escala 1:20.000 (S.G.M. 1967) y GPS Magellan 315.

En la tabla 42 se presenta una breve síntesis descriptiva de las características generales de cada una de las parcelas de muestreo.

Las campañas de terreno para la recolección de las muestras de suelo y los trabajos preparatorios se realizaron en varias etapas:

- 1) Enero de 2002, selección de las parcelas piloto, trabajando a partir del SIG y las imágenes satelitales.
- 2) 1 y 2 de febrero de 2002, identificación en campo de las parcelas y las líneas de muestreo, pixel de comienzo y orientación.
- 3) Verificación en el sistema de la correspondencia entre las líneas de muestreo y los pixeles de las imágenes.
- 4) 18 y 19 de febrero de 2002, extracción de muestras. Se extraen aproximadamente 200 gr. correspondientes a los primeros 5 cm. de suelo.

Figura 36: Esquema metodológico

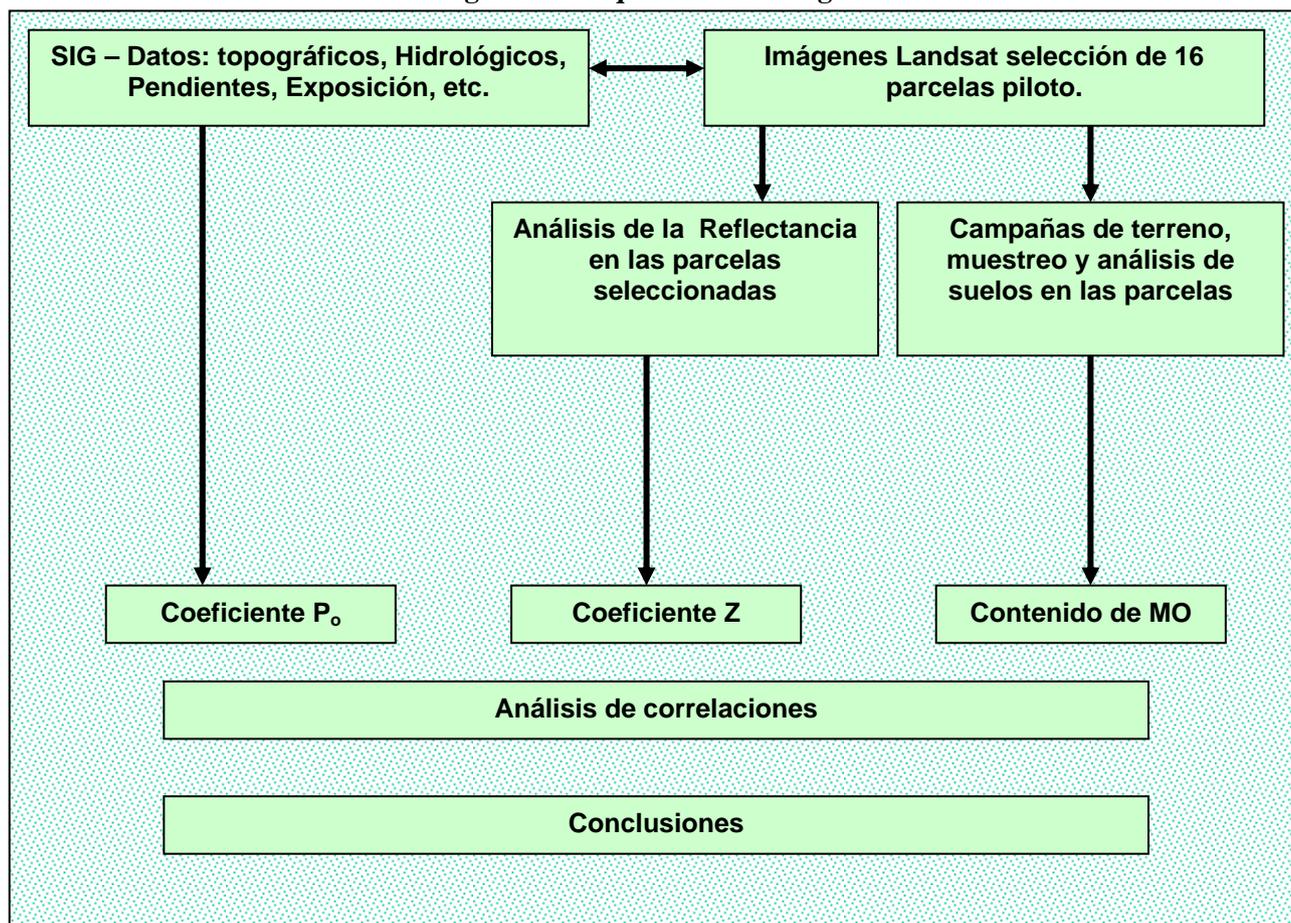


Tabla 42: Síntesis descriptiva de las parcelas piloto.

Parcela	Superficie	Uso del suelo	Erosión	Muestras
1	71	Campo de cultivos de verano en rotación con praderas	ligera	7
3	48	Cultivo de girasol	moderada	1
7	79	Cultivo de girasol	moderada	1
8	189	Campo de cultivos en rotación con praderas	ligera	6
12	58	Campo de cultivos de invierno en rotación con praderas	ligera	7
17	96	Campo de cultivos de verano en rotación con praderas	moderada	4
18	67	Campo de cultivos de verano en rotación con praderas	moderada	7
20	55	Campo de cultivos de verano en rotación con praderas	ligera	7
21	43	Campo de cultivos de verano en rotación con praderas	moderada	7
22	213	Cultivo de soja	ligera	3
23	77	Campo de cultivos verano – invierno en rotación.	ligera	7
24	18	Praderas permanentes en planicie de inundación	nula	1
25	145	Campo de cultivos de invierno en rotación con praderas	ligera	1
26		Campo de cultivo forestal (eucaliptos)		1
27		Campo de cultivo forestal (eucaliptos)		1

En las parcelas 26 y 27 solamente se tomaron muestras que fueron referenciadas en la parcela, pero no asignadas a un pixel ya que actualmente están forestadas con eucaliptos y por lo tanto no presenta interés para este trabajo.

### Muestras de suelo

La determinación de la materia orgánica presente en las muestras de suelo se realiza en el INRA de Toulouse. Los resultados globales por muestra son presentados en la tabla 43.

**Tabla 43: Porcentaje de materia orgánica según muestra**

<i>Muestra</i>	<i>% MO</i>						
<b>1,1</b>	4,776	<b>12,3</b>	4,28	<b>18,3</b>	5,909	<b>21,7</b>	3,78
<b>1,2</b>	5,094	<b>12,4</b>	5,463	<b>18,4</b>	5,392	<b>22,1</b>	3,347
<b>1,3</b>	4,583	<b>12,5</b>	5,858	<b>18,5</b>	5,632	<b>22,2</b>	3,907
<b>1,4</b>	5,234	<b>12,6</b>	6,676	<b>18,6</b>	4,616	<b>22,3</b>	4,838
<b>1,5</b>	4,592	<b>12,7</b>	5,334	<b>18,7</b>	4,963	<b>23,1</b>	3,852
<b>1,6</b>	4,089	<b>16,1</b>	2,454	<b>20,1</b>	7,797	<b>23,2</b>	3,227
<b>1,7</b>	3,429	<b>16,2</b>	2,587	<b>20,2</b>	6,634	<b>23,3</b>	4,97
<b>3,1</b>	5,358	<b>16,3</b>	3,64	<b>20,3</b>	8,306	<b>23,4</b>	3,361
<b>7,1</b>	2,551	<b>16,4</b>	2,331	<b>20,4</b>	7,75	<b>23,5</b>	4,078
<b>8,1</b>	4,034	<b>17,1</b>	2,476	<b>20,5</b>	5,907	<b>23,6</b>	3,707
<b>8,2</b>	2,365	<b>17,2</b>	4,327	<b>20,6</b>	5,559	<b>23,7</b>	3,418
<b>8,3</b>	2,88	<b>17,3</b>	4,465	<b>20,7</b>	6,199	<b>24</b>	22,98
<b>8,4</b>	2,696	<b>17,4</b>	3,243	<b>21,1</b>	4,909	<b>25</b>	5,165
<b>8,5</b>	3,089	<b>17,5</b>	4,698	<b>21,2</b>	5,003	<b>26</b>	3,725
<b>8,6</b>	3,785	<b>17,6</b>	3,425	<b>21,3</b>	4,827	<b>27</b>	0,257
<b>8,7</b>	4,761	<b>17,7</b>	4,012	<b>21,4</b>	3,167		
<b>12,1</b>	5,359	<b>18,1</b>	6,49	<b>21,5</b>	3,778		
<b>12,2</b>	9,079	<b>18,2</b>	5,905	<b>21,6</b>	3,78		

### iii) Evaluación del comportamiento espectral de las muestras seleccionadas

Para la evaluación del comportamiento espectral de las muestras seleccionadas se parte de la cobertura vectorial del SIG con la grilla correspondiente a las imágenes Landsat que integra la información de la reflectancia de las bandas 1 a 5 y 7, como campos de información. La matriz de datos así generada permite establecer las operaciones necesarias entre los distintos valores.

El algoritmo que se generó, sobre la base de la información generada y el análisis del comportamiento espectral de las parcelas con suelo descubierto representa los siguientes aspectos destacables en la firma espectral del sistema suelo:

- 1) El aumento en la proporción de materia orgánica del suelo disminuye la reflectancia en todas las longitudes de onda que componen el espectro de trabajo.
- 2) La disminución en el espectro es diferencial: en la medida que la proporción de materia orgánica es mayor la pendiente (curva de representación de la firma espectral) aumenta. En la medida que la proporción de materia orgánica es menor la pendiente de la firma espectral disminuye.
- 3) Las diferencias entre las pendientes de las curvas de las firmas espectrales, resultan especialmente significativas en el sector del espectro entre el rojo y el infrarrojo cercano, bandas 3 y 4 de Landsat.
- 4) La importancia de la MO en la reflectancia y firma espectral del suelo está relacionada a la forma y posición de la curva, más que a los valores absolutos que se registran en cada longitud de onda.

Como se desprende de las firmas espectrales generadas para las muestras seleccionadas al no existir discontinuidades marcadas en las curvas de reflectancia de los suelos, resulta interesante trabajar con todas las bandas disponibles para registrar las diferencias.

En base a estos principios y asumiendo que esta metodología permitirá superar las limitaciones de los modelos generados a partir de un número reducido de bandas, se construye la siguiente combinación de bandas (Z) para analizar su potencialidad en la estimación del contenido de MO de los suelos.

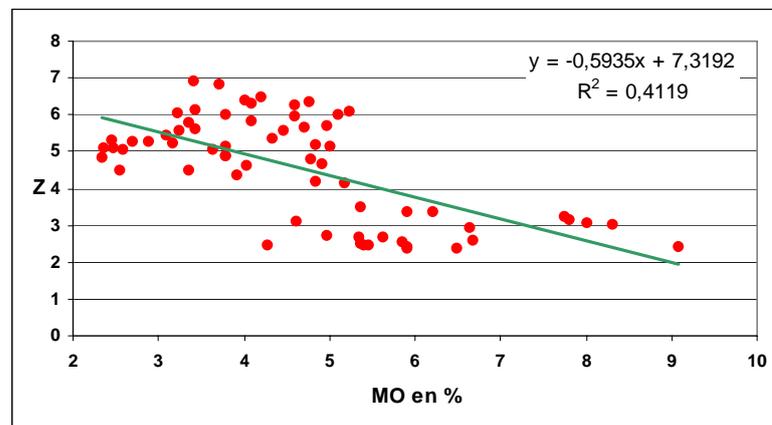
$$Z = \{(R_5 * R_7) / (R_1 * R_2)\} + (R_4 / R_3)$$

Siendo  $R_n$  = reflectancia en la banda n.

El valor del índice Z, asigna especial importancia a las diferencias entre los extremos de la firma espectral, el cociente entre el extremo de las mayores longitudes de onda con el extremo inferior de las longitudes de onda. También se integra en la construcción de **Z** el comportamiento particular de las curvas entre las bandas 3 y 4, donde se presenta un incremento importante en la pendiente en la medida que aumenta el contenido de materia orgánica. La correlación entre este índice **Z** y el contenido de materia orgánica del suelo debe ser negativa. Por supuesto, como se está trabajando con los valores de una imagen Landsat sobre un territorio concreto, donde existen otros elementos del paisaje que condicionan también la reflectancia, en las distintas bandas, ésta construcción solamente permitirá explicar una proporción de la variabilidad total del sistema en estudio.

La figura 37 muestra un modelo de regresión lineal, entre los contenidos de materia orgánica y los valores del índice Z correspondiente a cada una de las 69 muestras, construido a partir de los datos de la imagen de 1998. El modelo es válido con un intervalo de confianza del 99%. Por tanto es posible afirmar que la variación de la materia orgánica explica el 41% de la variabilidad del índice Z.

**Figura 37: Modelo de regresión entre el % de MO y el índice Z**



El modelo propuesto se comporta de acuerdo a los supuestos establecidos en su construcción. Sin embargo, la materia orgánica de los suelos es un factor entre varios que condiciona la firma espectral de los suelos. Es en este sentido que debe ser interpretada la figura 37, la evaluación de uno de los factores en relación a la respuesta espectral del suelo.

**iv) Evaluación de la relación entre el comportamiento espectral y la posición en el paisaje.**

Otro elemento importante a considerar es la posición del pixel en el paisaje, es decir la pendiente del terreno y la orientación de la pendiente respecto a la fuente de energía (la ubicación del sol). En este sentido, se asignó a cada pixel un valor que es la resultante de la pendiente por su orientación ( $P_o$ ).

$$P_o = P * O$$

P = pendiente (medida en porcentaje)

O = orientación de la pendiente (tabla 44)

**Tabla 44: Asignación de valor a la orientación de la pendiente**

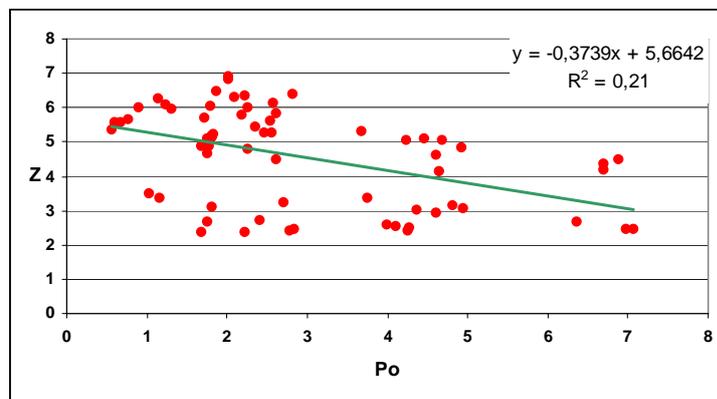
<b>Orientación</b>	<b>Valor</b>
Este	0.2
Noreste	0.4
Sureste	0.4
Norte	0.6
Sur	0.6
Sudoeste	0.8
Noroeste	0.8
Oeste	1

El criterio para la construcción de la tabla 44 consistió en partir de que la pendiente condiciona la variación de la reflectancia, y esto es más importante de acuerdo a su orientación. Por tanto, como la imagen sobre la cual se está trabajando es de noviembre y la hora de pasaje del satélite es las 9 AM., la orientación de la ladera disminuye su reflectancia de este a oeste. Con este criterio se asignó un factor de corrección al valor de la pendiente de acuerdo a la orientación del pixel en el cuadrante. Los valores para la realización de esta corrección fueron generados utilizando el MNT de la cuenca construido a partir de una grilla derivada de la imagen Landsat y las curvas de nivel de las cartas topográficas.

De acuerdo a los criterios de construcción del valor asignado por la posición en el paisaje del pixel ( $P_o$ ), se espera que a mayor valor en la posición en el paisaje el valor del índice Z tienda a disminuir.

En la figura 38 se presenta un modelo de regresión lineal entre los valores del índice Z y los valores de  $P_o$ . El modelo es válido con un intervalo de confianza del 99%. Entonces es posible afirmar que la posición en el paisaje del pixel explica una proporción de la variabilidad del índice Z del orden del 21%. La escasa pendiente del área de trabajo así como la altura del sol para esta época del año en el pasaje del satélite (fin de la primavera), explican la baja importancia de este factor en la reflectancia total de cada pixel.

**Figura 38: Modelo de regresión entre la posición en el paisaje y el índice Z**



### v) Relación entre el comportamiento espectral y el contenido de materia orgánica integrado a la posición en el paisaje

A partir de los resultados obtenidos se analizan los aportes conjuntos para cada pixel del contenido de materia orgánica del suelo y la posición que ocupa en el paisaje.

Como el aporte de la materia orgánica es más significativo se le asigna mayor importancia a este factor que al valor de la posición en el paisaje. Así se construye un modelo de correlación lineal entre el índice Z propuesto y un índice compuesto entre la proporción de materia orgánica del suelo integrada con la posición en el paisaje que ocupa el pixel: ( $W_o$ ).

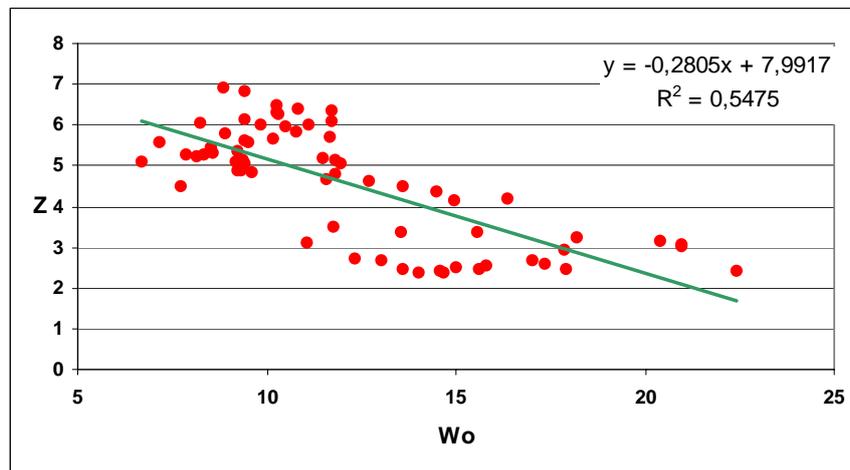
Siendo  $W_o$ ,

$$W_o = 2*(\text{Porcentaje de materia orgánica}) + P_o$$

De esta forma  $W_o$  integra el contenido de materia orgánica del suelo, la pendiente y la orientación del terreno.

El resultado del modelo de correlación válido en un intervalo de confianza del 99%, se presenta en la figura 39. El resultado del modelo indica que es posible afirmar que el contenido de materia orgánica del suelo ajustada por la posición en el paisaje del pixel explica prácticamente el 55% de la variabilidad del índice Z.

**Figura 39: Modelo de regresión entre los índices  $W_o$  y Z**



En las figuras 40 y 41 se presenta dos ejemplos de la distribución espacial de los resultados obtenidos para las parcelas con suelo descubierto, para los años 1998 y 2001 respectivamente.

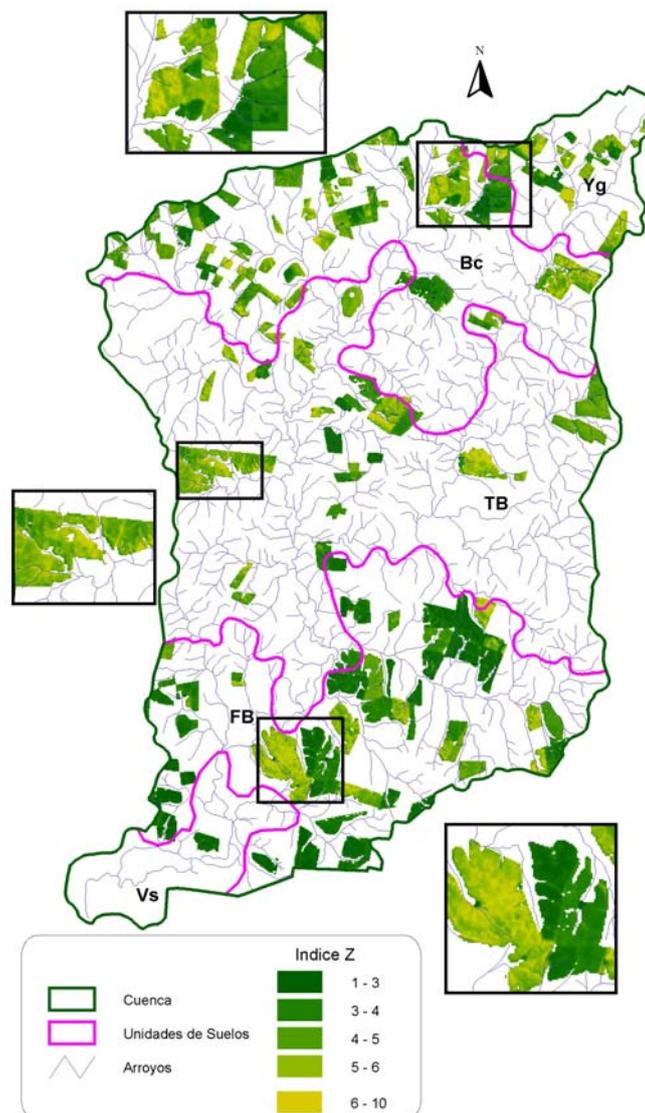
En la figura 40 se destacan tres ejemplos que muestran la distribución de Z al interior de las parcelas, destacando la potencialidad para diferenciar la diversidad intra parcelaria.

También resulta interesante destacar las diferencias que se registran (especialmente al norte de la cuenca) entre parcelas vecinas, la historia de uso y las técnicas de manejo del suelo inter parcelas explican estas diferencias.

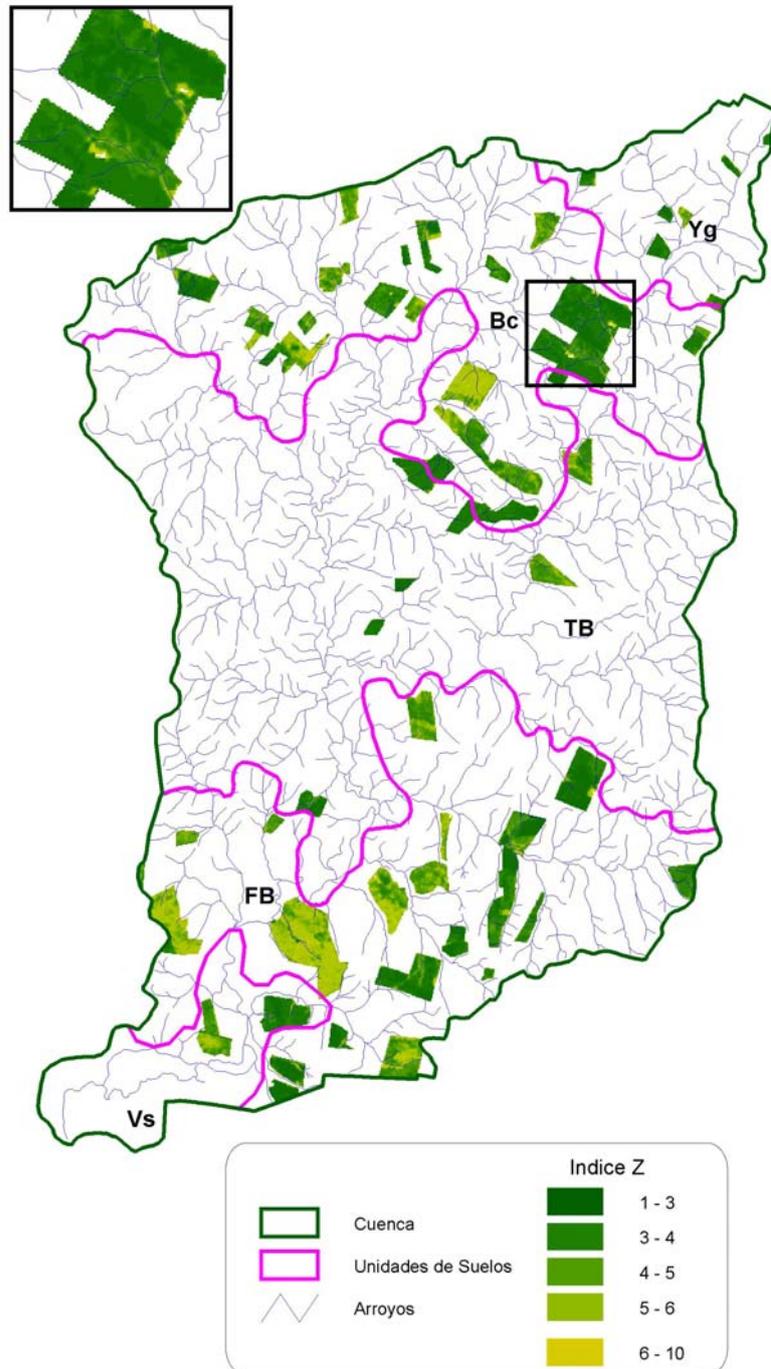
En el ejemplo sur de la figura 40 se puede apreciar la intensidad de la variabilidad de Z en una misma parcela y su potencialidad para orientar el manejo predial, la parcela de la izquierda tiene una superficie de 485 hectáreas.

La figura 41 muestra la situación en el otoño del 2001, donde hay menor número de parcelas con suelo descubierto, pero se repite la parcela destacada al sur en la figura 40 y presenta una situación similar. Al norte se destacan una serie de parcelas que durante los primeros meses del año permanecieron sin cultivo con tratamiento de herbicidas y en abril son aradas para implantar cultivos de invierno. Se refleja en la distribución de Z y sus bajos valores la importancia de la incorporación de MO parcial o totalmente descompuesta.

**FIGURA 40: DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL INDICE Z EN PARCELAS CON SUELO DESCUBIERTO 21/11/98**



**FIGURA 41: DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL INDICE Z EN PARCELAS CON SUELO DESCUBIERTO 11/4/2001**



## CONCLUSIÓN

El objetivo de esta parte del trabajo consiste en cuantificar la predicción del contenido de MO del suelo a partir de la información de los satélites Landsat. Para ello se partió de las características de las firmas espectrales del suelo y se construyó un índice Z que integra la información contenida en la imagen a partir de su integración total en una cobertura vectorial del SIG.

Los primeros resultados obtenidos tomando a la MO como único factor resultó débil, explica solamente el 41% de la variabilidad del índice Z.

La integración de una nueva variable “posición en el paisaje” mejoró la capacidad del estimador, pasando a explicar el 55% de la variabilidad de Z.

Este estudio mostró que trabajando con la variabilidad de todas las bandas disponibles en una imagen Landsat se logran mejores resultados que al utilizar bandas diagnóstico para estimar MO. Esto se debe a la característica principal de la firma espectral del suelo, que genera una curva continua sin máximos ni mínimos significativos.

En segundo lugar la excelente respuesta al ingresar un nuevo factor invariable como es la posición del pixel en el paisaje y su afectación a la reflectancia mejorando la eficiencia explicativa del índice Z de 41% a 55%, demuestra la correcta integración de las bandas en el algoritmo construido.

El modelo empírico construido presenta alta potencialidad en el desarrollo de trabajos de análisis regionales de la distribución espacial de suelos. Las escenas Landsat permiten un buen nivel de representación cartográfica en escalas entre 1:50.000 y 1:100.000. También permitirá avanzar hacia la resolución de un problema práctico, generar cartografía detallada de suelos a nivel de parcela, principal limitante en las técnicas de siembra de precisión.

Cuatro nuevas variables deben ser incorporadas en el futuro al modelo, lo que permitirá mejorar sustancialmente su capacidad de predicción de la materia orgánica, estas son:

- Variabilidad de la materia mineral (MM) del suelo. Este factor, que también presenta su distribución diferencial en el espacio, constituye un elemento importante en la reflectancia ya que condiciona la estructura del suelo.
- Variabilidad de la humedad. Este factor esta condicionado por la MO, la MM y la posición en el paisaje, pero presenta su propia lógica de distribución espacial que puede ser integrado al modelo.

- Rugosidad del suelo. Microrrelieve y rugosidad son factores que condicionan la reflectancia, y dependen de la posición en el paisaje y de las prácticas de cultivo.
- Caracterización de las sustancias húmicas. Las evaluaciones que se realizaron en este trabajo se refieren a la MO total del suelo, sin embargo la caracterización de las diversas sustancias húmicas en el suelo permitirá mejorar el comportamiento del índice Z.

La investigación de la distribución espacial de la materia orgánica vinculada con la dinámica del paisaje, constituye un elemento importante en la distribución de las propiedades de los suelos. Los factores que condicionan la distribución del stock orgánico en los suelos varían de forma compleja. La influencia del régimen y comportamiento hídrico de los suelos constituye un elemento esencial para comprender estos procesos. Así las características de la vegetación y su variabilidad en la productividad primaria ejerce una influencia determinante en el sistema.

Numerosos trabajos han desarrollado metodologías de evaluación de la humedad de la superficie a partir de imágenes alta resolución, trabajando fundamentalmente con las bandas de infrarrojo medio donde se ubican las zonas de absorción correspondientes al agua. Pero estas metodologías son dependientes de la disponibilidad de imágenes por tanto solo aportan datos puntuales. Desde el punto de vista de la comprensión de la dinámica de la MO en la cuenca resulta necesario avanzar hacia la integración temporal de la información en forma continua. Poniendo en práctica un modelo de monitoreo de la variabilidad del régimen hídrico en la cuenca. En la siguiente parte del trabajo se desarrolla una metodología que partiendo de la información disponible propone un método de monitoreo continuo del funcionamiento del régimen hídrico en la cuenca asignando especial interés a su diversidad espacial al interior de la cuenca.

**CUARTA PARTE****FUNCIONAMIENTO****DE LA****CUENCA DEL ARROYO SÁNCHEZ**

## Introducción

Para evaluar la dinámica de la migración de MO hacia las vías de drenaje es necesario conocer el funcionamiento hídrico de las unidades de paisaje. Por ello se trabaja en una cuenca hidrográfica representativa, la cuenca del Arroyo Sánchez.

Esta parte del trabajo presenta primeramente un modelo empírico para la evaluación del funcionamiento hídrico de la cuenca utilizando el SIG con la información descriptiva y de organización de la cuenca y la información generada en la evaluación del comportamiento espacio temporal de las USV.

Posteriormente con los resultados obtenidos se determinan puntos de muestreo de agua en los cursos para evaluar los contenidos de MO, y analizar la dinámica de la distribución espacial de los diferentes contenidos de carbono y su relación con las USV y el funcionamiento hídrico de las microcuencas que drenan hacia cada uno de los puntos de muestreo.

La evaluación del comportamiento dinámico del contenido de carbono según los puntos de muestreo tiene un carácter exploratorio ya que las muestras son tomadas en único momento del año y la concentración de las sustancias orgánicas en las aguas superficiales son dependientes de las variaciones estacionales (Taboada, *et al.* 1987).

Sin embargo, la integración de esta información en el SIG permitirá elaborar correlaciones espaciales entre los valores obtenidos y las características de funcionamiento de las diversas microcuencas definidas por la ubicación de los puntos de muestreo. Los resultados obtenidos permitirán comprender mejor la dinámica de la cuenca, así como definir la mejor ubicación de puntos de muestreo para futuros monitoreos.

## **A) EVALUACIÓN DEL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL**

### **i) Introducción**

La principal limitante en la evaluación del régimen hídrico superficial en general y del escurrimiento superficial en particular es la escasa información sobre la evapotranspiración real, en un área específica de la superficie de la tierra. En general existen coeficientes tabulados para el ajuste de la evapotranspiración potencial, pero sin un debido ajuste en relación a la realidad terreno. Para ajustar estos coeficientes debe ser considerados la variabilidad espacial de la vegetación, su estado de desarrollo y las condiciones ambientales en sus variabilidad espacio temporal (Smith et al. 1992).

Las técnicas de teledetección pueden aportar una solución frente a esta limitación, especialmente en aquellas áreas donde no se dispone de medidas de campo sistemáticas, a partir del comportamiento de la vegetación (Martini et al. 2004).

En condiciones donde la frecuencia de las lluvias y la capacidad de almacenaje de agua en el suelo es suficiente para abastecer la demanda por evapotranspiración, el problema se simplifica ya que siempre existe agua disponible para asegurar la intensidad del crecimiento de la vegetación. Sin embargo cuando la disponibilidad de agua comienza a presentar restricciones la evapotranspiración comienza a disminuir rápidamente por efecto de la superficie seca del suelo y la disminución en la producción de biomasa. La interpretación del comportamiento del NDVI, en correlación con el comportamiento estacional de la vegetación vinculado al régimen de precipitaciones es ampliamente utilizada en la caracterización de la intensidad en el crecimiento de la vegetación (Kogan, 1987; Martini et al. 2004).

El objetivo en esta parte del trabajo es modelar el balance hídrico en la cuenca, a partir del comportamiento multitemporal de las unidades suelo vegetación. La metodología seguida para modelar la distribución espacial del escurrimiento superficial en la cuenca es una modificación de la metodología propuesta por Lefevre *et al.* (1993). Se trabaja sobre la base de los resultados obtenidos en la segunda parte del trabajo: la distribución por año de las unidades suelo-vegetación y a partir de los mismos se construye un modelo de evapotranspiración máxima por unidad suelo-vegetación.

El método usualmente utilizado para corregir la evapotranspiración potencial parte de un factor tabulado teórico según la ubicación del área y la época del año, factor K (UNESCO, 1982). Sin embargo resulta necesario integrar la transpiración desde la cobertura vegetal con la evaporación desde la tierra en un solo factor. El factor Kc incorpora las características de la vegetación y los efectos de la evaporación desde el

suelo (Doorenbos y Pruitt, 1977; Katerji et al. 1983; Wallace et al. 1990; Grattan et al. 1998). Este coeficiente puede ser encontrado en tablas por cultivos específicos, que estiman la evapotranspiración de cultivos para las diferentes fases de crecimiento y las diferentes condiciones ecológicas (Fao, 1990). Sin embargo estas estimaciones no pueden tener en cuenta las condiciones reales en que se desarrolla la vegetación.

Básicamente el coeficiente  $K_c$  representa las características de la vegetación, en determinadas condiciones ambientales, lo cual determina el comportamiento de la evapotranspiración real.

A partir del reconocimiento de que el NDVI representa el comportamiento de la vegetación en condiciones ambientales reales (Chuvienco, 2001; Braun y Hense, 2004; Guissard, 2004; Quaipe et al. 2004). Se utiliza el NDVI por unidad de vegetación (información elaborada en la segunda parte del trabajo) para derivar un factor de corrección al coeficiente  $K$ .

## ii) Materiales y Métodos

Para la construcción del modelo se utiliza la serie temporal de precipitación y temperatura, que permite estimar la evapotranspiración no corregida. Con estos valores y el comportamiento mensual de las unidades de suelo-vegetación se elabora un factor de corrección para obtener la evapotranspiración corregida. Utilizando la estimación de acumulación total de agua por unidades de suelo de la carta 1:1.000.000 realizada por Molfino y Califra (2001), tabla 37, se evalúa la capacidad de infiltración y de escurrimiento superficial, por UVS en el periodo de trabajo 1998 – 2003.

**Tabla 45: Capacidad de almacenaje de agua por unidad de suelo**

Unidad de suelo	Agua potencialmente disponible neta (mm)
Bellaco	146.2
Fray Bentos	115.4
Tres Bocas	110.8
Villa Soriano	173.3
Young	145

Fuente: Molfino y Califra, 2001.

La metodología de trabajo consiste en:

- 1) Cálculo de la evapotranspiración potencial no corregida para cada mes. Para resolver este problema se aplica la fórmula de Thornthwaite y Mather (1955), el modelo planteado por los autores permite calcular para cada mes la

evapotranspiración utilizando la temperatura media mensual. Se obtiene el valor ETP'm.

$$\mathbf{ETP'm = c 2^a}$$

Siendo:

$$c = 16 (10 / I)^a$$

2 = Temperatura media mensual en °C

a = función de I

I = sumatoria anual del índice térmico mensual i

$$i = (2 / 5)^{1.514}$$

- 2) Primer factor de corrección de la evapotranspiración. Se utiliza un factor de corrección K, que toma en cuenta la latitud, la duración de la insolación teórica y del número de días de cada mes (UNESCO, 1982). Este factor tiene la limitación de no considerar, la humedad atmosférica, nubosidad y viento, tres elementos importantes en la evapotranspiración real.
  
- 3) Segundo factor de corrección. Se construye a partir de los resultados de la evaluación del NDVI trabajado en el capítulo 7. Se consideran las seis unidades suelo vegetación, para cada unidad se calcula el NDVI medio anual, y el NDVI medio mensual y a partir de ellos se elabora el factor de corrección K<sub>1</sub>.

$$\mathbf{K_1 = NDVI_{mm1} / NDVI_{ma1}}$$

Siendo:

NDVI<sub>mm1</sub> el NDVI medio mensual para la clase 1, y

NDVI<sub>ma1</sub> el NDVI medio anual para la clase 1.

- 4) A partir de estos valores se construye el factor de corrección (K<sub>c</sub>) de la ETP<sub>m</sub>, obteniendo así la evapotranspiración potencial media mensual máxima corregida ETPM.

Siendo:

$$\mathbf{K_c = K * K_1}$$

$$\mathbf{ETPM = ETP * K_c}$$

Los resultados obtenidos permiten evaluar el desempeño de la evapotranspiración potencial de la vegetación en las condiciones reales de productividad primaria para el año y para cada mes en particular.

Este método de cálculo del factor de corrección vincula las potencialidades máximas mensuales de evapotranspiración con las condiciones reales de productividad de cada unidad suelo-vegetación. Los valores estandarizados, en tablas son construidos para condiciones medias de vegetación, situación que difícilmente ocurre en condiciones reales. Además cuando se trabaja con un tamaño de pixel que integra mezclas de distintos usos del suelo, que resulta dificultoso de diferenciar, los estándares difieren de la realidad.

A partir de esta resolución del pasaje de la evapotranspiración máxima potencial sin corrección para las condiciones reales de la vegetación hacia la evapotranspiración máxima corregida, se continua con la metodología de trabajo propuesto por Lefevre *et al.* (1983), para evaluar el balance hídrico de la cuenca. En la tabla 38 se presentan a modo de ejemplo los resultados de los cálculos efectuados para el año 1998, los valores comienzan a partir del mes de abril que es desde cuando se dispone de la información del NDVI construido con la información de las imágenes de baja resolución.

Este esquema propuesto, presenta los resultados síntesis a nivel de unidades suelo-vegetación, pero la construcción de la base de datos permite realizar un análisis detallado a nivel del comportamiento de cada uno de los pixeles de 1 km<sup>2</sup> de resolución. La metodología de organización de la información primaria elaborado en el ambiente SIG se realizó tomando el pixel de baja resolución como unidad básica espacial, con lo cual este modelo puede ser realizado con este nivel de resolución.

Sin embargo, a los efectos de este trabajo se presentan los resultados a nivel general por unidad suelo-vegetación lo que permite realizar una síntesis global del funcionamiento hídrico de la cuenca, con información mensual.

## iii) Resultados obtenidos

Tabla 46: Distribución mensual de la variabilidad de la evapotranspiración real

Meses	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>1998 FORESTACION</b>												
ETP'm	118,254	107,892	97,081	66,224	45,206	29,419	27,327	37,618	43,375	63,939	81,408	102,706
K	1,217	1,036	1,06	0,944	0,903	0,833	0,883	0,949	1	1,126	1,157	1,233
K <sub>1</sub>				0,998	1,106	1,103	1,138	1,064	1,124	1,131	1,168	1,170
Kc				0,942	0,998	0,919	1,005	1,010	1,124	1,273	1,351	1,442
ETPM				62,390	45,132	27,025	27,467	37,984	48,767	81,412	109,966	148,139
<b>1998 PASTORIL AGRICOLA INVERNAL</b>												
ETP'm	118,254	107,892	97,081	66,224	45,206	29,419	27,327	37,618	43,375	63,939	81,408	102,706
K	1,217	1,036	1,06	0,944	0,903	0,833	0,883	0,949	1	1,126	1,157	1,233
K <sub>1</sub>				0,8861	1,0154	0,9877	1,0531	1,0128	1,1101	1,0966	1,0927	1,0639
Kc				0,836	0,917	0,823	0,930	0,961	1,110	1,235	1,264	1,312
ETPM				55,395	41,450	24,205	25,411	36,156	48,151	78,950	102,920	134,729
<b>1998 PASTORIL AGRICOLA ESTIVAL</b>												
ETP'm	118,254	107,892	97,081	66,224	45,206	29,419	27,327	37,618	43,375	63,939	81,408	102,706
K	1,217	1,036	1,06	0,944	0,903	0,833	0,883	0,949	1	1,126	1,157	1,233
K <sub>1</sub>				0,8951	0,9799	0,9347	0,9747	0,9175	1,0297	1,0261	1,0667	1,0707
Kc				0,845	0,885	0,779	0,861	0,871	1,030	1,155	1,234	1,320
ETPM				55,958	40,001	22,906	23,519	32,754	44,664	73,874	100,471	135,590
<b>1998 AGRICOLA PASTORIL ESTIVAL</b>												
ETP'm	118,254	107,892	97,081	66,224	45,206	29,419	27,327	37,618	43,375	63,939	81,408	102,706
K	1,217	1,036	1,06	0,944	0,903	0,833	0,883	0,949	1	1,126	1,157	1,233
K <sub>1</sub>				0,8270	0,9452	0,8990	0,9554	0,8867	1,0354	1,0082	0,9982	1,0057
Kc				0,781	0,854	0,749	0,844	0,841	1,035	1,135	1,155	1,240
ETPM				51,700	38,584	22,031	23,053	31,655	44,911	72,585	94,020	127,358
<b>1998 AGRICOLA PASTORIL INVERNAL</b>												
ETP'm	118,254	107,892	97,081	66,224	45,206	29,419	27,327	37,618	43,375	63,939	81,408	102,706
K	1,217	1,036	1,06	0,944	0,903	0,833	0,883	0,949	1	1,126	1,157	1,233
K <sub>1</sub>				0,8565	0,9740	0,9443	1,0154	0,9942	1,1055	1,1012	1,0436	0,9872
Kc				0,809	0,880	0,787	0,897	0,943	1,106	1,240	1,207	1,217
ETPM				53,544	39,760	23,141	24,501	35,492	47,952	79,281	98,296	125,016
<b>1998 AGRICOLA</b>												
ETP'm	118,254	107,892	97,081	66,224	45,206	29,419	27,327	37,618	43,375	63,939	81,408	102,706
K	1,217	1,036	1,06	0,944	0,903	0,833	0,883	0,949	1	1,126	1,157	1,233
K <sub>1</sub>				0,7850	0,9210	0,8753	0,9761	0,9237	1,1066	1,0796	0,9783	0,9221
Kc				0,741	0,832	0,729	0,862	0,877	1,107	1,216	1,132	1,137
ETPM				49,075	37,596	21,450	23,553	32,976	47,999	77,726	92,145	116,772

Esta misma metodología se aplicó para todos los años en el periodo 1998 – 2003, generando una matriz de información que contiene la información de la evapotranspiración real por unidad suelo-vegetación en escala temporal mensual. Con estos resultados, y utilizando los valores de reserva de agua en el suelo y las tablas de precipitaciones mensuales se construye el balance hídrico por unidad suelo-vegetación, modelo que permite su representación espacial.

En la tabla 47 se presentan los resultados obtenidos para la clase pastoril agrícola estival según su distribución en las distintas unidades de suelo de la cuenca, para el año 1999.

Siendo:

**RU** = Reserva útil de agua en el suelo (información por unidad de suelo)

**ETP'<sub>m (n)</sub>** = Evapotranspiración potencial media mensual para el mes n, no corregida calculada según la fórmula de Thornthwaite.

**ETPM<sub>(n)</sub>** = Evapotranspiración potencial media mensual, corregida para el mes n.

**RR<sub>(n-1)</sub>** = Reserva de agua en el suelo desde el mes anterior

**P<sub>(n)</sub>** = Precipitación total mensual del mes n

**Rd<sub>(n)</sub> = P<sub>(n)</sub> + RR<sub>(n-1)</sub>** Cantidad de agua total en el mes n.

**ETR<sub>(n)</sub>** = Evapotranspiración real, para el cálculo se diferencian dos situaciones

a) Si  $ETPM_{(n)} < Rd_{(n)}$ , por lo tanto  $ETPM_{(n)} = ETR_{(n)}$

b) Si  $ETPM_{(n)} > Rd_{(n)}$ , por lo tanto  $ETPM_{(n)} = Rd_{(n)}$

**RR<sub>(n)</sub> = Rd<sub>(n)</sub> - ETR<sub>(n)</sub>** Cantidad de agua disponible en el mes n

**RUR<sub>(n)</sub>** = Reserva útil de agua en el suelo en el mes n, para el cálculo se diferencian dos casos:

a) Si  $RR_{(n)} < RU$ , por lo tanto  $RUR_{(n)} = RR_{(n)}$

b) Si  $RR_{(n)} > RU$ , por lo tanto  $RUR_{(n)} = RU_{(n)}$

**Ec<sub>(n)</sub> = P<sub>(n)</sub> + RR<sub>(n-1)</sub> - ETR<sub>(n)</sub> - RUR<sub>(n)</sub>**, agua disponible que potencialmente puede escurrir hacia los cursos de agua, asumiendo que no existe pérdida por percolación.

**Ces<sub>(n)</sub>** = Coeficiente de escurrimiento

**Tabla 47: Distribución mensual del balance hídrico para la clase pastoril agrícola estival, según unidad de suelo. 1999**

UNIDAD TRES BOCAS RU = 110.8 (36% de la superficie)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>ETP<sub>(n)</sub></b>	118,254	107,892	97,081	66,224	45,206	29,419	27,327	37,618	43,375	63,939	81,408	102,706
<b>ETPM<sub>(n)</sub></b>	<b>159,818</b>	<b>133,673</b>	<b>124,145</b>	<b>71,980</b>	<b>44,385</b>	<b>19,259</b>	<b>22,342</b>	<b>37,210</b>	<b>50,671</b>	<b>74,414</b>	<b>81,389</b>	<b>115,581</b>
<b>RR<sub>(n-1)</sub></b>	110,40	88,88	110,80	86,16	71,48	77,00	110,80	110,80	110,80	69,23	10,12	0,00
<b>P<sub>(n)</sub></b>	138,3	225,5	99,5	57,3	49,9	163,5	160,8	41,9	9,1	15,3	9,7	48,4
<b>Rd<sub>(n)</sub></b>	248,70	314,38	210,30	143,46	121,38	240,50	271,60	152,70	119,90	84,53	19,82	48,40
<b>ETR<sub>(n)</sub></b>	<b>159,82</b>	<b>133,67</b>	<b>124,15</b>	<b>71,98</b>	<b>44,38</b>	<b>19,26</b>	<b>22,34</b>	<b>37,21</b>	<b>50,67</b>	<b>74,41</b>	<b>19,82</b>	<b>48,40</b>
<b>RR<sub>(n)</sub></b>	88,88	180,71	86,16	71,48	77,00	221,24	249,26	115,49	69,23	10,12	0,00	0,00
<b>RUR<sub>(n)</sub></b>	88,88	110,80	86,16	71,48	77,00	110,80	110,80	110,80	69,23	10,12	0,00	0,00
<b>Ec<sub>(n)</sub></b>	0,00	69,91	0,00	0,00	0,00	110,44	138,46	4,69	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Ces<sub>(n)</sub></b>	0,00	0,31	0,00	0,00	0,00	0,68	0,86	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00
UNIDAD FRAY BENTOS RU = 115.3 (23% de la superficie)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>ETP<sub>(n)</sub></b>	118,254	107,892	97,081	66,224	45,206	29,419	27,327	37,618	43,375	63,939	81,408	102,706
<b>ETPM<sub>(n)</sub></b>	<b>159,818</b>	<b>133,673</b>	<b>124,145</b>	<b>71,980</b>	<b>44,385</b>	<b>19,259</b>	<b>22,342</b>	<b>37,210</b>	<b>50,671</b>	<b>74,414</b>	<b>81,389</b>	<b>115,581</b>
<b>RR<sub>(n-1)</sub></b>	114,90	93,38	115,30	90,66	75,98	81,50	115,30	115,30	115,30	73,73	14,62	0,00
<b>P<sub>(n)</sub></b>	138,3	225,5	99,5	57,3	49,9	163,5	160,8	41,9	9,1	15,3	9,7	48,4
<b>Rd<sub>(n)</sub></b>	253,20	318,88	214,80	147,96	125,88	245,00	276,10	157,20	124,40	89,03	24,32	48,40
<b>ETR<sub>(n)</sub></b>	<b>159,82</b>	<b>133,67</b>	<b>124,15</b>	<b>71,98</b>	<b>44,38</b>	<b>19,26</b>	<b>22,34</b>	<b>37,21</b>	<b>50,67</b>	<b>74,41</b>	<b>24,32</b>	<b>48,40</b>
<b>RR<sub>(n)</sub></b>	93,38	185,21	90,66	75,98	81,50	225,74	253,76	119,99	73,73	14,62	0,00	0,00
<b>RUR<sub>(n)</sub></b>	93,38	115,30	90,66	75,98	81,50	115,30	115,30	115,30	73,73	14,62	0,00	0,00
<b>Ec<sub>(n)</sub></b>	0,00	69,91	0,00	0,00	0,00	110,44	138,46	4,69	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Ces<sub>(n)</sub></b>	0,00	0,31	0,00	0,00	0,00	0,68	0,86	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00
UNIDAD BELLACO RU = 146.2 (41% de la superficie)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>ETP<sub>(n)</sub></b>	118,254	107,892	97,081	66,224	45,206	29,419	27,327	37,618	43,375	63,939	81,408	102,706
<b>ETPM<sub>(n)</sub></b>	<b>159,818</b>	<b>133,673</b>	<b>124,145</b>	<b>71,980</b>	<b>44,385</b>	<b>19,259</b>	<b>22,342</b>	<b>37,210</b>	<b>50,671</b>	<b>74,414</b>	<b>81,389</b>	<b>115,581</b>
<b>RR<sub>(n-1)</sub></b>	145,80	124,28	146,20	121,56	106,87	112,39	146,20	146,20	150,89	109,32	50,21	0,00
<b>P<sub>(n)</sub></b>	138,3	225,5	99,5	57,3	49,9	163,5	160,8	41,9	9,1	15,3	9,7	48,4
<b>Rd<sub>(n)</sub></b>	284,10	349,78	245,70	178,86	156,77	275,89	307,00	188,10	159,99	124,62	59,91	48,40
<b>ETR<sub>(n)</sub></b>	<b>159,82</b>	<b>133,67</b>	<b>124,15</b>	<b>71,98</b>	<b>44,38</b>	<b>19,26</b>	<b>22,34</b>	<b>37,21</b>	<b>50,67</b>	<b>74,41</b>	<b>59,91</b>	<b>48,40</b>
<b>RR<sub>(n)</sub></b>	124,28	216,11	121,555	106,87	112,39	256,63	284,66	150,89	109,32	50,21	0,00	0,00
<b>RUR<sub>(n)</sub></b>	124,28	146,20	121,555	106,87	112,39	146,20	146,20	150,89	109,32	50,21	0,00	0,00
<b>Ec<sub>(n)</sub></b>	0,00	69,91	0,00	0,00	0,00	110,43	138,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Ces<sub>(n)</sub></b>	0,00	0,31	0,00	0,00	0,00	0,68	0,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

En síntesis, mediante esta metodología es posible espacializar, la distribución del balance hídrico, según el tipo de suelo y la unidad suelo-vegetación. Así un resumen de la tabla 47 asociada a la información generada en el capítulo 7 permite determinar que:

La clase pastoril agrícola estival en el año 1999 ocupó 14.918 hectáreas, que se distribuyen en tres unidades de suelos, en la tabla 48 se resume el balance hídrico anual, la precipitación fue de 1019,2 mm.

**Tabla 48: Balance hídrico anual en la clase pastoril agrícola estival 1999**

Suelos	%	Hectáreas	RR <sub>(n-1)</sub>	ETR	Ec	Ces	RUR
Tres Bocas	22	3282	110,8	785.26	344.74	0.34	0
Fray Bentos	23	3431,1	115.8	789.76	344.74	0.34	0
Bellaco	41	6116,4	146.2	820.66	344.74	0.34	0
Villa Soriano	14	2088,5	173.3	847.76	371.5	0.36	0
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>14.918</b>	<b>135.21</b>	<b>809.56</b>	<b>348.47</b>	<b>0.343</b>	<b>0</b>

Para el año 1999, en estas 14.918 hectáreas, precipitaron 1019,2 mm y existían reservas de agua acumuladas en el suelo al comenzar el año de 135.21 mm, lo que hace un total de 1154.41 mm disponibles. De los cuales 809.56 mm evapotranspiraron (70.1 %) y 348.47 mm escurrieron superficialmente o subsuperficialmente (29.9 %).

Para los cálculos totales del balance anual se ponderan los valores parciales por unidad de suelo según la proporción de la superficie ocupada.

Un elemento importante que destaca en la tabla 48, es que las reservas de agua en el suelo al finalizar el año 1999 son cero, es decir que toda el agua precipitada en el mes de diciembre fue consumida por la vegetación. Esta situación es razonable ya que es el momento más crítico de la sequía (figura 20), también se ajusta al comportamiento de las unidades suelo-vegetación, que en general presentan valores muy bajos de NDVI en estas fechas, siendo la disponibilidad de agua en esta situación el factor limitante para el desarrollo de la vegetación.

La unidad forestación es la única que presenta en el pico mínimo de la sequía un descenso menos pronunciado en los valores del NDVI, esto sugiere una hipótesis de trabajo que deberá ser estudiada con profundidad. Como la unidad forestación presenta los valores más altos de NDVI en todo el periodo y también los valores más altos de evapotranspiración (tablas 49 a 54), es posible que tenga como fuente alternativa de alimentación de agua, napas subsuperficiales a las profundidades que su desarrollo radicular le permita acceder.

**Tabla 49: Balance hídrico resumen en la cuenca del A° Sánchez - año 1998**

1998 (4 a 12 - 865 mm, anual 1342.5 mm)							
Unidad	Suelos	%	RR <sub>(n-1)</sub>	ETR	Ec	Ces	RUR
1	TB	100	110.8	582.28	300.04	0.35	87.48
2	TB	37	110.8	547.37	318.03	0.37	110.4
	FB	42	115.3	547.37	318.03	0.37	114.9
	Bc	15	146.2	547.37	318.03	0.37	145.8
3	TB	63	110.8	529.74	335.26	0.39	110.8
	FB	8	115.3	529.74	335.26	0.39	115.3
	Bc	14	146.2	529.74	335.26	0.39	146.2
	VS	14	173.3	529.74	335.26	0.39	173.3
4	TB	43	110.8	505.9	359.1	0.42	110.8
	FB	8	115.3	505.9	359.1	0.42	115.3
	Bc	33	146.2	505.9	359.1	0.42	146.2
	Yg	14	145	505.9	359.1	0.42	145
5	TB	6	110.8	526.98	338.02	0.39	110.8
	FB	59	115.8	526.98	338.02	0.39	115.8
	Bc	29	146.2	526.98	338.02	0.39	146.2
	VS	6	173.3	526.98	338.02	0.39	173.3
6	Yg	23	145	499.29	365.71	0.42	145
	FB	39	115.3	499.29	365.71	0.42	115.3
	Bc	38	146.2	499.29	365.71	0.42	146.2

**Tabla 50: Balance hídrico resumen en la cuenca del A° Sánchez - año 1999**

1999 (1019.2 mm)							
Unidad	Suelos	%	RR <sub>(n-1)</sub>	ETR	Ec	Ces	RUR
1	TB	100	87.48	856.2	245.72	0.24	0
2	TB	36	110.8	806.12	323.48	0.32	0
	FB	23	115.3	810.62	323.48	0.32	0
	Bc	41	146.2	846.21	318.79	0.31	0
3	TB	22	110.8	785.26	344.74	0.34	0
	FB	23	115.8	789.76	344.74	0.34	0
	Bc	41	146.2	820.66	344.74	0.34	0
	Vs	14	173.3	847.76	371.5	0.36	0
4	TB	29	110.8	758.5	365.8	0.36	0
	FB	20	115.3	768.7	371.5	0.36	0
	Bc	34	146.2	793.9	399.8	0.39	0
	Vs	17	173.3	792.7	359.56	0.35	0
5	TB	7	110.8	770.44	359.56	0.35	0
	FB	58	115.3	774.94	359.56	0.35	0
	Bc	35	146.2	805.84	359.56	0.35	0
6	Yg	16	145	787.29	376.91	0.37	0
	FB	45	115.3	757.59	376.91	0.37	0
	Bc	39	146.2	788.49	376.91	0.37	0

En las tablas 49 a 54 se presenta un resumen anual del balance hídrico de la cuenca del arroyo Sánchez, según las clases suelo-vegetación y las unidades de suelo. Al comienzo del periodo de estudio (abril de 1998) se asumió de acuerdo a las tendencias de las precipitaciones que los suelos contenían su capacidad máxima de almacenaje de agua.

Una limitación que debe ser incorporada en estos esquemas de aproximación al balance hídrico, es la interceptación diferencial según las distintas coberturas vegetales.

Sin embargo, no se tomaron los valores sugeridos en la bibliografía por varios motivos:

- a) No existen información generada en el territorio del litoral del Uruguay.
- b) La información de campo generada para condiciones “similares”, (Lima, 1993) son trabajos realizados en el sur de Brasil, con resultados medios anuales.
- c) La información sobre interceptación es muy dependiente de la intensidad y duración de la precipitación, temperatura, estado y condición de la vegetación.

Es por estos motivos y ante la imposibilidad de disponer de datos confiables, que se optó por no considerar esta variable, reconociendo su importancia y la necesidad de incorporar este factor como un elemento de corrección de los valores obtenidos.

**Tabla 51: Balance hídrico resumen en la cuenca del A° Sánchez - año 2000**

2000 (1520.5 mm)							
Unidad	Suelos	%	RR <sub>(n-1)</sub>	ETR	Ec	Ces	RUR
1	TB	100	0	864.59	649.69	0.43	6.22
2	TB	53	0	784.06	699.36	0.46	37.08
	FB	27	0	784.06	694.86	0.46	41.58
	Bc	20	0	784.06	663.86	0.44	72.48
3	TB	52	0	763.55	719.76	0.47	37.19
	FB	26	0	763.55	715.26	0.47	41.69
	Bc	6	0	763.55	684.36	0.45	72.59
	Vs	16	0	763.55	657.26	0.43	99.69
4	TB	28	0	721.08	742.39	0.49	57.03
	FB	19	0	721.08	737.89	0.48	61.53
	Bc	37	0	721.08	706.43	0.46	92.43
	Yg	16	0	721.08	708.19	0.46	91.23
5	FB	55	0	737.66	724.74	0.48	58.10
	Bc	45	0	737.66	693.84	0.46	89
6	Yg	15	0	701.32	716.72	0.47	102.46
	FB	28	0	701.32	746.42	0.49	72.76
	Bc	57	0	701.32	715.52	0.47	103.66

Los resultados presentados en estas tablas, son el resumen de la información que fue generada a nivel espacial tomando el pixel de baja resolución (1 km<sup>2</sup>) como unidad mínima. A nivel temporal se tomó el mes como unidad mínima, por ser el menor nivel de desagregación de la información que se logró obtener.

Se identifican, dos caminos para ajustar los resultados obtenidos, trabajar con información de precipitación cada 10 días, de tal forma de utilizar todo el potencial de las imágenes satelitales de baja resolución. Avanzar en la diferenciación espacial al interior de las píxeles de baja resolución.

**Tabla 52: Balance hídrico resumen en la cuenca del A° Sánchez - año 2001**

2001 (1718.3 mm)							
Unidad	Suelos	%	RR <sub>(n-1)</sub>	ETR	Ec	Ces	RUR
1	TB	100	6.22	989.36	671.42	0.38	63.74
2	TB	79	37.08	939.40	742.97	0.42	73.01
	Bc	21	72.48	939.40	742.97	0.42	108.41
3	TB	54	37.19	893.1	781.43	0.44	80.96
	FB	22	41.69	893.1	781.43	0.44	85.46
	Bc	12	72.59	893.1	781.43	0.44	116.36
	Vs	12	99.69	893.1	781.43	0.44	143.46
4	TB	17	57.03	851.3	834.09	0.47	89.94
	FB	33	61.53	851.3	834.09	0.47	94.44
	Bc	28	92.43	851.3	834.09	0.47	125.34
	Yg	22	91.23	851.3	834.09	0.47	124.14
5	FB	58	58.1	870.91	814.54	0.46	90.95
	Bc	42	89	870.91	814.54	0.46	121.85
6	Yg	11	102.46	832.8	858.84	0.48	129.12
	FB	42	72.76	832.8	858.84	0.48	91.42
	Bc	47	103.66	832.8	858.84	0.48	130.32

**Tabla 53: Balance hídrico resumen en la cuenca del A° Sánchez - año 2002**

2002 (2105.3 mm)							
Unidad	Suelos	%	RR <sub>(n-1)</sub>	ETR	Ec	Ces	RUR
1	TB	100	63.74	1018.23	1040.01	0.49	110.8
2	TB	76	73.01	950.01	1117.5	0.53	110.8
	Bc	24	108.41	950.01	1117.5	0.53	146.2
3	TB	63	80.96	896.06	1179.4	0.56	110.8
	FB	15	85.46	896.06	1179.4	0.56	115.3
	Bc	15	116.36	896.06	1179.4	0.56	146.2
	Vs	7	143.46	896.06	1179.4	0.56	173.3
4	TB	26	89.94	871.39	1213.05	0.58	110.8
	FB	36	94.44	871.39	1213.05	0.58	115.3
	Bc	26	125.34	871.39	1213.05	0.58	146.2
	Yg	12	124.14	871.39	1213.05	0.58	145
5	FB	57	90.95	893.38	1187.57	0.56	115.3
	Bc	43	121.85	893.38	1187.57	0.56	146.2
6	Yg	22	129.12	853.43	1235.96	0.59	145
	FB	42	99.42	853.43	1235.96	0.59	115.3
	Bc	36	130.32	853.43	1235.96	0.59	146.2

**Tabla 54: Balance hídrico resumen en la cuenca del A° Sánchez - año 2003**

2003 (1523.2 mm)							
Unidad	Suelos	%	RR <sub>(n-1)</sub>	ETR	Ec	Ces	RUR
1	TB	100	110.8	1028.33	525.08	0.34	80.59
2	TB	56	110.8	982.67	561.09	0.37	90.24
	Bc	36	146.2	905.34	617.3	0.40	125.64
	FB	4	115.3	987.17	556.59	0.37	94.74
3	TB	62	110.8	938.84	600.49	0.39	94.67
	FB	30	115.3	943.34	595.98	0.39	99.17
	Bc	4	146.2	953.07	586.26	0.38	130.07
	Vs	4	173.3	953.07	586.26	0.38	157.17
4	TB	29	110.8	908.27	622.88	0.41	102.85
	FB	28	115.3	912.77	618.38	0.40	107.35
	Bc	35	146.2	916.05	615.1	0.40	138.25
	Yg	8	145	916.05	615.1	0.40	137.27
5	FB	53	115.3	934.84	597.39	0.39	106.27
	Bc	39	146.2	942.48	589.75	0.39	137.17
	Yg	4	145	942.48	589.75	0.39	135.97
6	Yg	47	145	906.61	616.59	0.40	145
	FB	25	115.3	897.36	625.84	0.41	115.3
	Bc	28	146.2	906.61	616.59	0.40	146.2

#### iv) Discusión de los resultados

Las tablas 49 a 54, presentan una aproximación de la tendencia del comportamiento del balance hídrico en la cuenca según la vegetación y los suelos.

Según la serie de datos de precipitación para la estación Young 1981 – 2003 (23 años) la precipitación media anual es de 1244 mm. En el periodo de trabajo considerado solamente el año 1999 se ubica por debajo de este valor medio (82%), el resto de los años presentan valores de precipitación superiores destacando el año 2002 (169%).

Es en el año de menor precipitación que la vegetación y la capacidad de almacenaje de agua en el suelo, presentan mayor importancia y por tanto se presentan las mayores diferencias entre los niveles mínimos y máximos del coeficiente de escurrimiento. Para el año 1999 el coeficiente de escurrimiento es 39 % mayor en la unidad agrícola pastoril estival sobre suelos de la unidad Bellaco que en la unidad forestal sobre suelos de la unidad Tres Bocas.

En los otros años con abundantes precipitaciones, las diferencias son menores, tabla 55. En todos los años la clase forestación es la que presenta menores coeficientes de escurrimiento y las clases con predominio de la actividad agrícola los mayores coeficientes.

Este modelo del balance hídrico por unidad suelo vegetación, es global y constituye una primera aproximación en la comprensión del funcionamiento del sistema. Sin embargo, resulta necesario incorporar nuevos elementos en la dinámica del sistema. El primero de

estos elementos refiere a que posiblemente los eucaliptos utilizan otra fuente de agua (napas de mediana profundidad). El segundo elemento es el efecto de “water repellent” (Musto, 1991; Ferreira *et al.* 2000), la diferencia entre el agua que llega al suelo y la que efectivamente ingresa al sistema. Por tanto esta metodología de trabajo genera los valores esperables de salida de agua del sistema, que deberán ser contrastados con valores reales medidos en el terreno, incorporando nuevas variables.

**Tabla 55: Diferencias entre los valores extremos del coeficiente de escurrimiento**

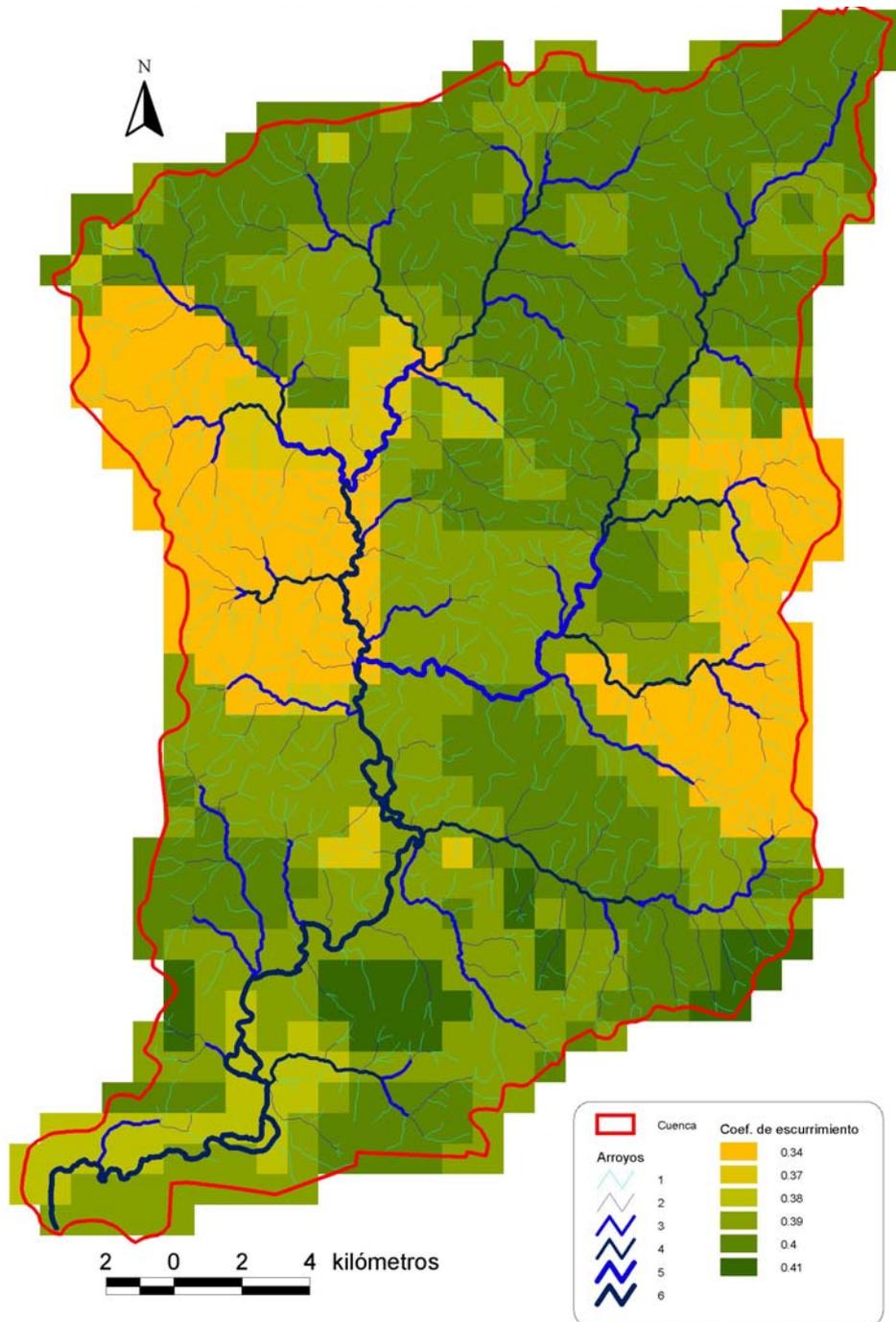
Precipitación anual	Año	Mayor Ces.	Menor Ces.	Porcentaje
1342.5	<b>1998</b>	4 y 6	1 - TB	17
1019.2	<b>1999</b>	4 - Bc	1 - TB	39
1520.5	<b>2000</b>	4 - TB y 6 - FB	1 - TB	12
1718.3	<b>2001</b>	6	1 - TB	21
2105.3	<b>2002</b>	6	1 - TB	17
1523.2	<b>2003</b>	4 - TB y 6 - FB	1 - TB	19

En los casos que solo se presenta la unidad suelo-vegetación para todas las unidades de suelo el coeficiente de escurrimiento presenta los mismos valores.

En la figura 42 se presenta como ejemplo la distribución espacial de los coeficientes de escurrimiento para el año 2003. En este ejemplo la distribución del coeficiente de escurrimiento, permite su comparación en cuanto a flujos teóricos de comportamiento del agua de lluvia. Un elemento que también debe ser considerado es el estado y condición de los suelos para permitir la infiltración o favorecer el escurrimiento superficial, factor éste que también está condicionado por la vegetación. A nivel de cuenca y considerando las restricciones que presenta este modelo, las áreas con mayor coeficiente de escurrimiento superficial de las aguas de lluvia son coincidentes con las zonas donde el uso del suelo se vincula principalmente a cultivo agrícolas estivales o invernales.

Los suelos de la zona central de la cuenca con uso forestal o ganadero sobre praderas naturales de ciclo estival, son los que presentan menor coeficiente de escurrimiento. La dinámica de la movilidad de la materia orgánica desde los suelos hacia los cursos de agua, debe comprenderse de acuerdo a la variabilidad espacial del coeficiente de escurrimiento y al contenido de materia orgánica de los suelos.

**FIGURA 42: DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL  
COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO – 2003  
CURSOS JERARQUIZADOS SEGÚN STRAHLER**



## **B) LA MATERIA ORGÁNICA EN EL AGUA**

### **i) Introducción**

Las aguas de la cuenca del Arroyo Sánchez y en general de toda la cuenca del Río Negro se caracterizan por su color oscuro. Color atribuido al contenido de materia orgánica presente en las aguas. En general todos los cursos de agua superficial transportan MO en suspensión y en disolución (Taboada *et al.* 1987). La variabilidad del Carbono Orgánico Total (COT) en las aguas depende fundamentalmente de la contribución de carbono a las aguas de escurrimiento superficial y subsuperficial de los suelos (Urban *et al.* 1989). El uso y manejo de los suelos es uno de los principales factores que condiciona los aportes de carbono en las aguas de drenaje (Dillon y Molot, 1997). A partir de la información generada en este trabajo se determinan 8 puntos de muestreo en la cuenca, tabla 56, buscando puntos que reciben aguas desde áreas representativas de la diversidad de ambientes presentes en la cuenca.

En cada uno de los 8 puntos se determinó el COT que refiere a la sumatoria de las diversas fracciones del carbono que puede estar contenido en las aguas: carbono orgánico disuelto, carbono orgánico no disuelto, carbono orgánico volátil y el carbono orgánico no volátil.

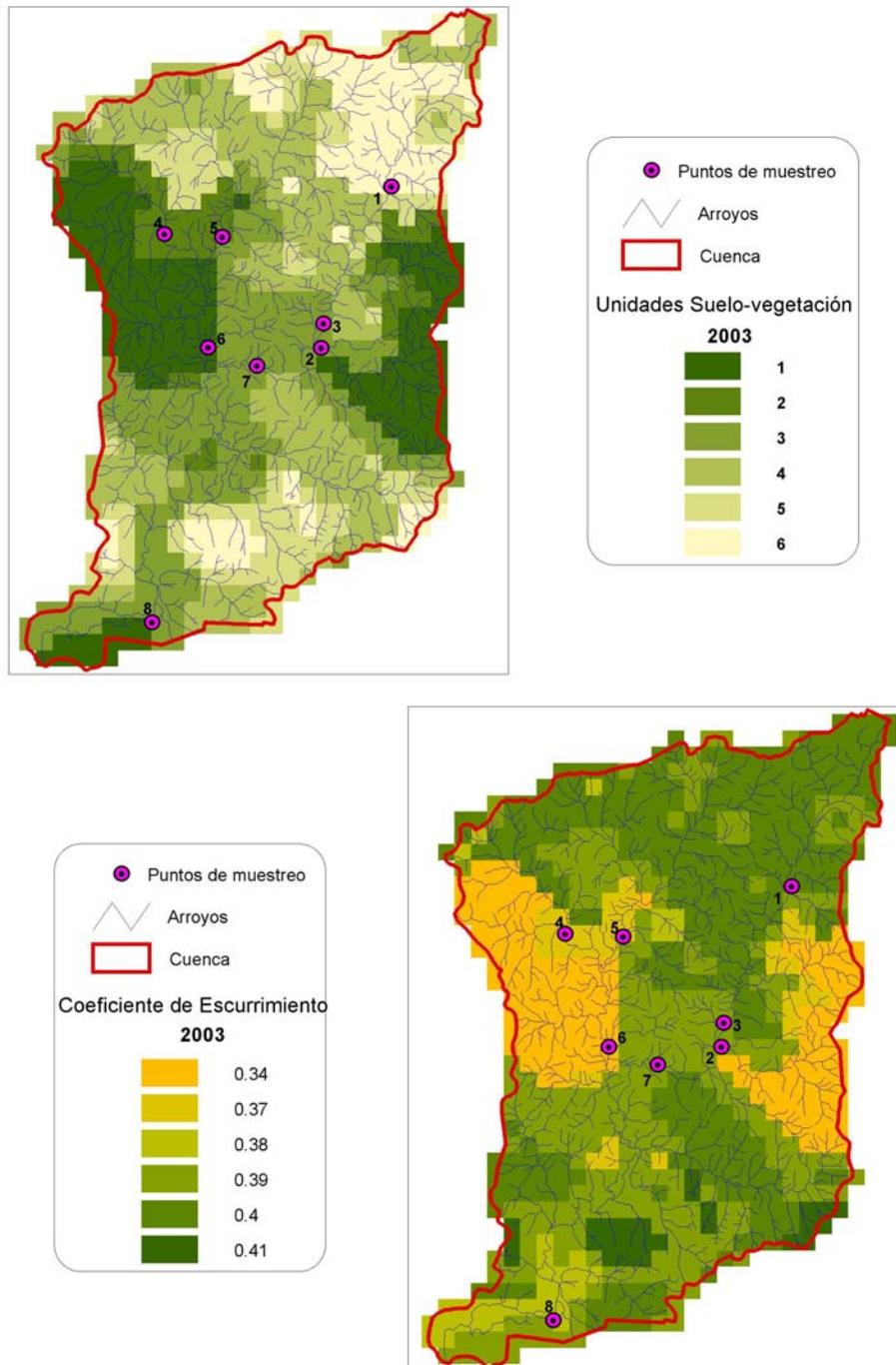
### **ii) Materiales y Métodos**

Para la determinación de la importancia de la materia orgánica presente en las aguas de la cuenca del Arroyo Sánchez se contó con la colaboración del Laboratoire Chimie de l'Eau et de l'Environnement UMR CNRS 6008 - École Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers – Université de Poitiers.

Los trabajos para la evaluación del COT y de la distribución del carbono, se realizaron durante la primer semana del mes de noviembre de 2004 en Uruguay, y posteriormente se finalizaron los análisis en la Universidad de Poitiers.

En la figura 43 se presenta la distribución espacial de las ocho muestras de agua, en relación a la distribución espacial de las unidades suelo-vegetación (2003) y el coeficiente de escurrimiento (2003). La distribución de las muestras intentó cubrir la diversidad de situaciones presentes en la cuenca de tal forma que permita con el menor número de muestras aportar el mínimo de información necesaria para avanzar en la comprensión de la dinámica de la materia orgánica en la cuenca.

**FIGURA 43: DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS PUNTOS DE MUESTREO DE AGUA (2/11/2004)**



### **Características de los puntos de muestreo**

A partir de la información de la figura 43 y analizando el uso del suelo a nivel de microcuencas se obtiene la siguiente caracterización de cada uno de los puntos de muestreo de aguas.

**Punto 1** - El curso recibe aguas de la zona de la cuenca donde se realizan actividades agrícolas con mayor intensidad. El punto donde se extrae el agua está ubicado a 10 km aguas abajo de la ciudad de Young, donde nace el Arroyo Sánchez. El área total que drena hacia éste punto es de 4600 hectáreas.

**Punto 2** – El punto donde se extrae el agua se localiza en un pequeño curso de agua que drena dos pequeñas microcuencas de uso forestal (2700 hectáreas).

**Punto 3** - Se ubica en el mismo curso que el punto 1, a una distancia de 9 km aguas abajo. Al área que drena hacia el punto 1 se suman 5800 hectáreas, de las cuales cerca de 2400 están bajo uso forestal.

**Punto 4** - Se ubica al oeste de la cuenca, es un curso de agua que drena un área de 5200 hectáreas, de las cuales unas 2200 son forestales, en el resto se realizan cultivos agrícolas principalmente estivales con ganadería extensiva.

**Punto 5** - Drena un área de 11500 hectáreas dedicadas principalmente a cultivos invernales y estivales integrados con ganadería, y es en esta zona donde se ubica la mayor parte de la lechería que se desarrolla en la cuenca. Es importante destacar que aguas arriba del punto de muestreo el curso pasa por un área forestal de 600 hectáreas.

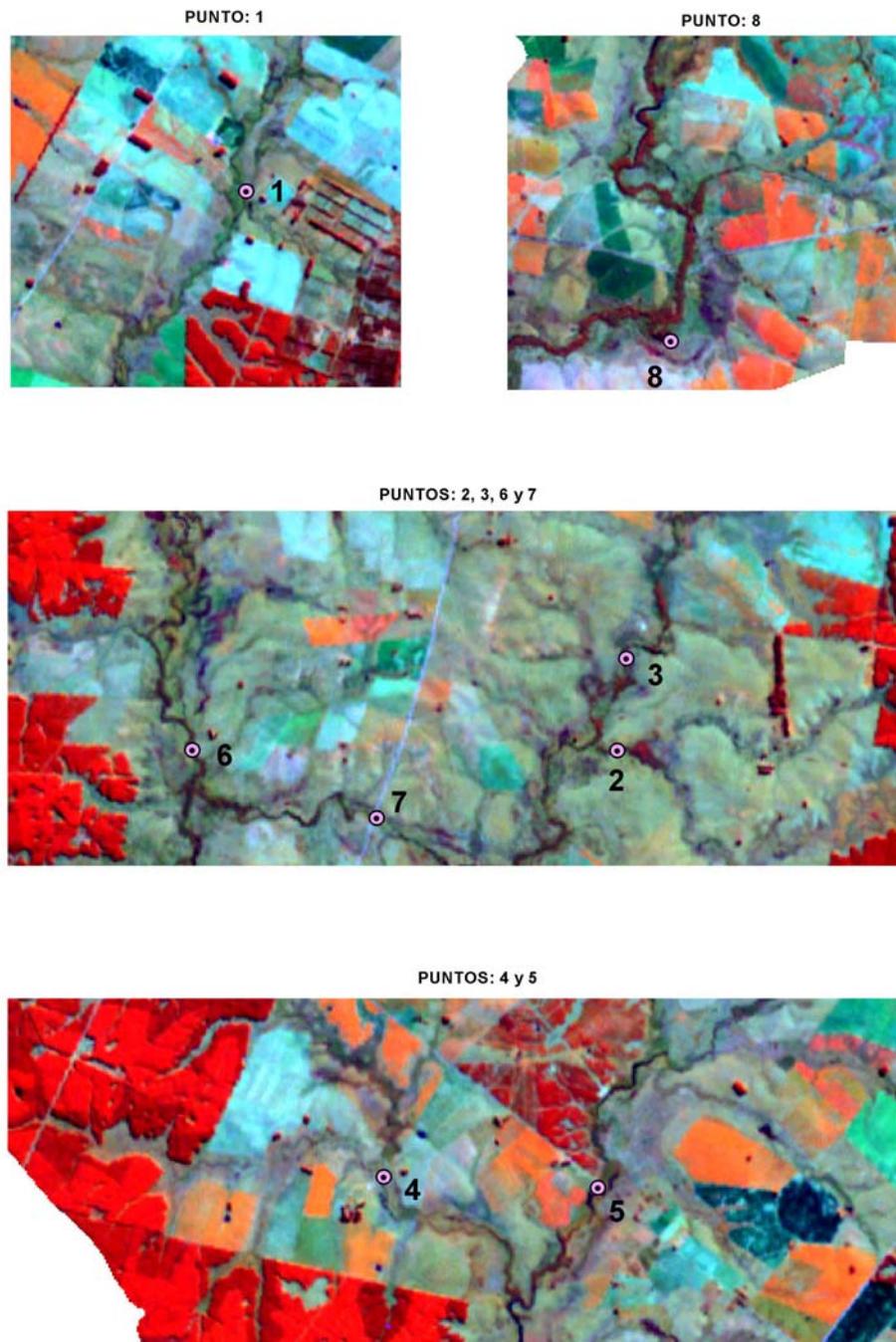
**Punto 6** - En este punto llegan las aguas que se juntan del punto 4 y 5 más los aportes desde un área forestal hacia el oeste y un área pastoril hacia el este. En resumen recibe las aguas del curso Sánchez Grande, de la zona noroeste de la cuenca.

**Punto 7** - Se ubica aguas debajo de los puntos 1, 2 y 3 y recibe las aguas del curso Sánchez Chico, la zona noreste de la cuenca. Desde los puntos 2 y 3 recibe únicamente aguas de campos de praderas naturales dedicadas a la ganadería extensiva.

**Punto 8** - Se ubica cerca de la desembocadura del Arroyo Sánchez en el Río Negro, antes de la entrada a la zona monte fluvial denso y humedales.

Los detalles de la ubicación de los puntos sobre la imagen satelital de 2002 se presentan en la figura 44.

**FIGURA 44: UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO DE AGUA, IMAGEN LANDSAT 30/06/2001**



### iii) Resultados Obtenidos

En la tabla 56, se presentan los resultados de los análisis de agua realizados en los distintos puntos de muestreo y las características de las microcuencas de drenaje hacia estos puntos. Los Puntos 4, 5 y 2 son los que presentan mayores valores de COT son los más vinculados a las áreas forestales. Resulta interesante el enriquecimiento entre el punto 1 y 3, que están tomados sobre el mismo curso y pasan de 7,5 a 10,01, pero incluye un área importante (2400 hectáreas) bajo uso forestal. También es notorio el descenso entre los valores de COT de los puntos 2 y 3 hacia el punto 7, que se encuentra a menos de 3 km de ellos pero en este tramo solo recibe aguas de áreas con praderas naturales.

Un segundo elemento interesante es que los puntos 4, 2 y 5 reciben agua desde una cuenca mayoritariamente con coeficiente de escurrimiento bajo (figura 43).

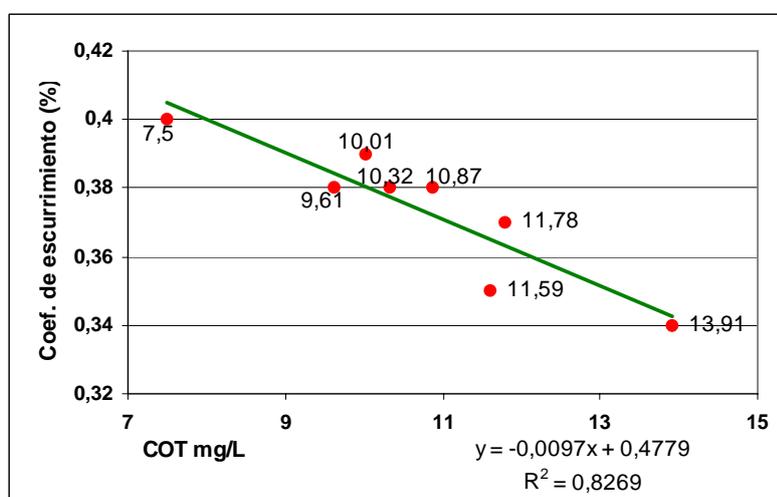
La relación C/N es similar a los valores encontrados en las muestras de suelo, que presentan valores entre 12 y 17.

**Tabla 56: Distribución de las características de las microcuencas por punto de muestreo**

Muestra	COT mg/L	C/N	% Area	Esc. 2003	USV % área						Suelo % área				
					1	2	3	4	5	6	Bc	FB	TB	Yg	Vs
1	7,50	13,0	0,08	0,4	0	0	0	0,2	0,2	0,6	0,3	0	0	0,7	0
2	11,59	11,3	0,04	0,35	0,8	0	0,2	0	0	0	0	0	1	0	0
3	10,01	14,9	0,09	0,39	0,3	0,2	0,1	0,3	0,1	0	0,3	0	0,7	0	0
4	13,91	16,4	0,03	0,34	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
5	11,78	17,0	0,18	0,37	0,1	0	0,1	0,4	0,2	0,2	0,8	0	0,2	0	0
6	10,32	15,6	0,08	0,38	0,5	0,1	0,3	0,2	0	0	0	0	1	0	0
7	9,61	10,6	0,04	0,38	0,1	0	0,6	0,3	0	0	0	0,4	0,6	0	0
8	10,87	12,7	0,34	0,38	0,1	0	0,3	0,3	0,2	0,1	0	0,7	0,2	0	0,1

Elaborado a partir de la información contenida en el SIG.

**Figura 45: Correlación entre el COT y el Ces. del área de drenaje por punto de muestreo**



Elaborado a partir de la información contenida en el SIG. (Ces.-2003)

#### iv) Discusión de los resultados

En este nivel exploratorio se constata que existe una fuerte correlación entre los valores de COT encontrados en las muestras de agua (11/2004) y el coeficiente de escurrimiento del año 2003 (figura 45). El valor del coeficiente de escurrimiento es el medio ponderado para el área que drena hacia el punto donde se obtuvo la muestra.

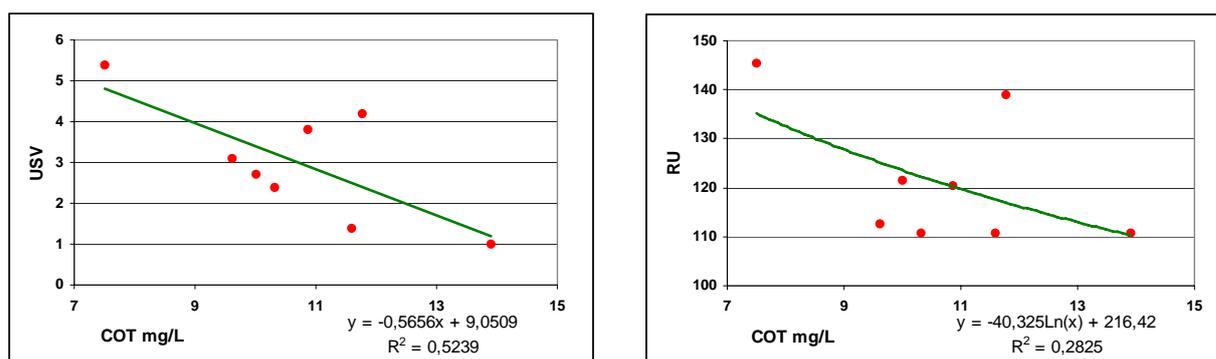
El coeficiente de escurrimiento se construyó a partir de la corrección de la evapotranspiración por el comportamiento de la vegetación y el tipo de suelo a partir de su capacidad de almacenamiento – retención de agua. En la tabla 57 se presentan la integración de la vegetación y la RU para cada una de las microcuencas, según las superficies relativas del tipo de vegetación y de suelos.

**Tabla 57: Síntesis de las características de las microcuencas por punto de muestreo**

Muestra	COT	USV	RU
1	7,5	5,4	145,4
2	11,59	1,4	110,8
3	10,01	2,7	121,4
4	13,91	1	110,8
5	11,78	4,2	139,1
6	10,32	2,4	110,8
7	9,61	3,1	112,6
8	10,87	3,8	120,3

Elaborado a partir de la información contenida en el SIG.

**Figura 46: Correlaciones entre el COT y USV – RU del área de drenaje.**



Elaborado a partir de la información contenida en el SIG.

La figura 46 presenta las correlaciones para los puntos de muestreo de los valores representados en la tabla 57. La vegetación dominante en el área que drena hacia el punto de muestreo tiene mayor importancia en la variabilidad del COT, que la capacidad de almacenaje de agua del suelo. Por otra parte en los modelos de

correlaciones presentados se destaca un elemento especialmente significativo la anomalía del punto 5. Con uso del suelo predominante agrícola ganadero presenta un área forestal importante aguas arriba, eso explica que su comportamiento en las dos gráficas de la figura 46 sea discordante con el resto. Si no se considera la muestra 5 los modelos de correlación mejoran significativamente su nivel de explicación, COT – USV  $R^2 = 79,85$  y COT – UR  $R^2 = 64,53$ .

## CONCLUSIÓN

Las zonas que presentan un uso del suelo más intensivo, con predominio de actividades agrícolas, sobre suelos predominantemente arcillosos, son las que presentan valores de COT más bajos. En estas áreas se presentan los mayores valores de escurrimiento superficial (tabla 55), durante los 69 meses del periodo de estudio con valores de COT más elevados y por tanto mayor variación estacional en el escurrimiento superficial.

Mientras que en los suelos arenosos bajo uso forestal se registra un aumento importante en el aporte de materia orgánica hacia los cursos de agua. De acuerdo a los valores obtenidos y considerando que se trata de un análisis exploratorio, es posible concluir que:

- La disminución del escurrimiento de agua desde las áreas forestales hacia los cursos de agua generan una mayor concentración del COT en los cursos de agua.
- Las áreas de uso agrícola o pastoril tradicional, han alcanzado un nivel de equilibrio que lleva a estabilizar las pérdidas de carbono hacia los cursos de agua, en tanto los recientes cultivos forestales generan un cambio en las condiciones ambientales anteriores al cultivo forestal, alterando esos niveles de estabilidad y produciendo la movilización de importantes cantidades de materia orgánica.
- Las nuevas condiciones ambientales generadas por los cultivos forestales favorece la disolución de la materia orgánica del suelo permitiendo su lixiviación hacia los cursos de agua.

## CONCLUSIÓN GENERAL

Este trabajo tuvo por objetivos la exploración metodológica de integración de técnicas de teledetección en la generación de información y su gestión en ambiente SIG, para evaluar la distribución espacial de la materia orgánica del horizonte superficial del suelo en la cuenca del Arroyo Sánchez.

La aproximación metodológica a partir del conocimiento de la reflectancia del suelo y la interpretación de la información generada a partir de imágenes Landsat, permitió construir un método de monitoreo espacial de la distribución espacial de la materia orgánica superficial del suelo.

El avance en esta línea de investigación conduce a la incorporación de nuevos parámetros ambientales que están directamente vinculados con la reflectancia del suelo y la distribución de la materia orgánica: a) el comportamiento espacio temporal de las unidades suelo-vegetación; b) el balance hídrico de la cuenca diferenciado espacialmente; c) la transferencia de MO desde los suelos hacia los cursos de agua; d) la distribución espacial de la matriz mineral del suelo; y d) la microrugosidad del suelo.

La aproximación metodológica desarrollada parte de las particularidades del sistema territorial analizado: la cuenca el Arroyo Sánchez. Esta aproximación integra los componentes generales de la cuenca y utilizando información satelital multiresolución y multitemporal, permitió generar cartografía detallada (a nivel de parcela) de la distribución espacial de la MO del suelo, monitorear el comportamiento de las unidades suelo-vegetación, evaluar la evapotranspiración y el balance hídrico por unidad de superficie. Permitido el desarrollo de cartografía temática a diversas escalas.

Esta metodología basada en los atributos espaciales de los elementos del paisaje es construida a partir de rutinas de generalización, extrapolación y continuos cambios de escala de aproximación al sistema, integrando la información en ambiente SIG.

Los resultados obtenidos constituyen un avance en la generación y gestión de parte de la información necesaria para la gestión del territorio que tienda a minimizar los procesos de degradación del potencial productivo de la cuenca.

Los principales resultados obtenidos pueden ser agrupados en tres líneas principales.

i) La primera se basa en la definición de unidades suelo-vegetación. Desarrollando una metodología de integración de imágenes de baja resolución y alta frecuencia temporal, con imágenes de alta resolución y baja frecuencia temporal. Permitiendo monitorear espacial y temporalmente el comportamiento de las unidades suelo-vegetación. Esta línea de trabajo se descompone en cuatro fases:

- Elaboración de una tipología suelo-vegetación en seis unidades que integran la vegetación, las características de los suelos y los usos del suelo.
- Construcción de un SIG operativo que permitiera integrar el conjunto de la información generada y existente, minimizando los tiempos de procesamiento.
- Utilización de las técnicas tradicionales de clasificación de imágenes alta resolución (Landsat), que permite conocer la distribución espacial de la vegetación en la cuenca.
- Análisis multitemporal de imágenes baja resolución SPOT-VGT, para el monitoreo espacial y temporal del comportamiento de las unidades suelo-vegetación.

Para cumplir este objetivo fue necesario resolver problemas de interpretación y manejo técnico de grandes volúmenes de información. La metodología desarrollada permitió conocer el comportamiento de los principales factores ambientales que interactúan en la cuenca, la evolución de las unidades suelo-vegetación en el tiempo y en el espacio.

ii) La segunda línea de trabajo consistió en la evaluación de la distribución de la materia orgánica del horizonte superficial del suelo mediante el uso de técnicas de teledetección. En esta línea de trabajo se desarrollaron tres fases:

- Un trabajo a nivel de detalle analizando en laboratorio la respuesta espectral de los materiales constituyentes del suelo y de muestras de suelo conocidas, generando los

supuestos conceptuales que permitieran definir firmas espectrales e interpretar los valores de reflectancia registrados en las imágenes.

- Procesamiento e interpretación de la reflectancia de suelos descubiertos asociado al contenido de materia orgánica en el horizonte superficial del suelo. Para ello se generó un índice que integra la información de la imagen en seis bandas correspondientes al visible, infrarrojo cercano y medio.
- Construcción de un segundo índice que integra la información de la posición en el paisaje (pendiente y orientación de la pendiente) de cada pixel.

El modelo propuesto de interpretación de la información de reflectancia del suelo descubierto generado a nivel de resolución del pixel (30 metros), permitió un ajuste del 41.2%. La construcción de un nuevo modelo integrando elementos invariantes del paisaje (pendiente y orientación) permitió mejorar el ajuste al 54.8%.

iii) La tercera línea de trabajo consistió en modelar la dinámica del agua en la cuenca, en especial avanzar en la construcción de cartografía de la distribución espacial del balance hídrico con un nivel de resolución del pixel de las imágenes de baja resolución (1 km.). El trabajo se desarrollo en tres fases:

- Calcular la evapotranspiración real en la cuenca, Para ello se trabaja con el calculo de la evapotranspiración potencial teórica, corregida por un factor que toma en cuenta la latitud y la insolación teórica. En segundo lugar se construye un nuevo factor de corrección derivado del comportamiento por unidad suelo-vegetación construido anteriormente y que se corresponde con el desempeño real de la vegetación.
- A partir de la evapotranspiración corregida, las reservas de agua del suelo y la precipitación se realiza el balance hídrico mensual por unidad de superficie en la cuenca.
- La información generada por unidad de superficie (pixel de 1 km) permite la representación cartográfica, de los distintos elementos parámetros utilizados: evapotranspiración, escurrimiento superficial, almacenamiento de agua en el suelo; y su seguimiento mensual.

El modelo propuesto, presenta una gran potencialidad para la gestión del territorio y mejorar el manejo de los recursos naturales en función de usos diversos del agua, ya que permite el cambio de escala desde la cuenca o microcuenca hacia el nivel territorial detallado.

El modelo propuesto se elabora a partir de la información generada en la primer línea de trabajo y su extrapolación al funcionamiento de las unidades suelo-vegetación como elemento principal que condiciona la evapotranspiración – balance hídrico por unidad de superficie. Llegando finalmente a desarrollar cartografía de 1 km<sup>2</sup> de resolución espacial.

Finalmente se avanzó a nivel exploratorio en el contenido de MO en las aguas de la cuenca. Para ello se tomaron 8 puntos de muestreo y se realizaron extracciones de sustancias húmicas de las muestras de agua. El posterior análisis de las muestras de agua, permitió generar algunas interpretaciones preliminares sobre el comportamiento de la movilidad de la MO desde el suelo hacia los cursos de agua, utilizando la información generada sobre las unidades suelo vegetación y la distribución espacio temporal del balance hídrico.

El trabajo realizado, coloca en evidencia el potencial de las técnicas de integración de imágenes alta y baja resolución en ambiente SIG para la generación de la información georreferenciada que permita avanzar en la comprensión del funcionamiento de sistemas naturales y tecnosistemas ensamblados como es una cuenca hidrográfica.

Las aproximaciones metodológicas desarrolladas, han permitido responder a las preguntas formuladas inicialmente:

- a) La resolución de la gestión del volumen de información disponible a partir de las imágenes SPOT-VGT, permitió definir unidades suelo-vegetación en una cuenca, donde la variedad de suelos, vegetación y usos del suelo generan condiciones de paisajes complejos. La metodología elaborada a permitido resolver la definición espacial de las unidades, e identificar como limitación principal la mezcla de tipos de vegetación al interior de un pixel de 1 km<sup>2</sup>. Se avanzó en el análisis de este problema a nivel geométrico del problema. La resolución analítica de este problema constituye un elemento que debe ser profundizado.

- b) La metodología de integración de la información de un gran número de imágenes SPOT-VGT, generando un banco único de datos permite un seguimiento continuo y actualizado del comportamiento de las unidades suelo-vegetación. La aplicación de esta metodología de trabajo en otras zonas del país permitirá su validación definitiva. En el desarrollo de este trabajo se generó la base de datos para el periodo (1/4/1998 al 21/12/2003) para todo el territorio nacional. La extrapolación metodológica propuesta debe estar integrada en un programa nacional de evaluación y gestión de los recursos naturales, donde la participación de la población rural aportando el conocimiento de sus territorios constituye un elemento imprescindible para realizar dicha generalización.
- c) Los índices elaborados a partir de la información de las imágenes Landsat, permiten generar cartografía detallada (con resolución a nivel de pixel) por parcela, sobre la distribución de la materia orgánica del suelo. Obteniendo un insumo imprescindible para el desarrollo de programas de gestión del suelo predial y de técnicas de siembra de precisión. Estos índices aún deben ser mejorados integrando nuevas variables que deben ser desarrolladas: variación espacial de la humedad del suelo, microrugosidad y variación espacial de la matriz mineral del suelo.
- d) La información generada a partir de las imágenes SPOT-VGT han permitido modelizar la evapotranspiración real por unidad de superficie. La generación de campañas de medición sistemática en campo permitirán la validación de esta aproximación metodológica.
- e) La construcción de un modelo de balance hídrico por unidad de superficie, ha permitido desarrollar cartografía del comportamiento del balance hídrico y de sus componentes. Se han identificado una serie de restricciones que se vinculan a la limitaciones en la disponibilidad de información que permitiría mejorar el ajuste del modelo: según los resultados obtenidos la forestación utilizaría fuentes alternativas de agua para su desarrollo (napas subsuperficiales) es necesario conocer el balance espacial de los volúmenes utilizados; conocer el efecto de “water repellent” generado en las áreas forestales; mejorar el conocimiento de la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo según su estado de conservación; evaluar la importancia de la interceptación según unidades de vegetación. Finalmente es necesario extrapolar la metodología propuesta en una cuenca aforada para validar el modelo desarrollado.

- f) Los altos valores indicadores de lignina sugieren que los cambios ambientales introducidos en la cuenca por la implantación de cultivos forestales favorece la lixiviación de MO hacia los cursos de agua. Los valores de nitrógeno y en general el carbono orgánico total, constituyen elementos destacables que indican la correspondencia eventual entre la transferencia de MO hacia los cursos de agua y el uso del territorio en la cuenca. Sin embargo los valores tomados no pueden ser considerado una evidencia de la magnitud del proceso, pero si indican la necesidad de un monitoreo sistemático de las sustancias húmicas en el agua, que permitan comprender los procesos involucrados.

Los aportes metodológicos desarrollados en este trabajo constituyen una batería de instrumentos con un alto potencial para la generación y gestión de información, que permitirá un doble propósito: a) contribuir a la comprensión de sistemas ambientales complejos como es una cuenca hidrográfica con usos diversos del suelo y b) potencializar los planes de gestión ambiental del territorio tanto a nivel de cuenca como a nivel predial.

La extrapolación hacia otras áreas del territorio permitirá su validación, asimismo se identificaron una serie de restricciones sobre las cuales es necesario profundizar para mejorar los modelos propuestos.

Uno de los principales resultados obtenidos a partir de este trabajo es la necesidad de un programa de escala nacional de evaluación y gestión de los recursos naturales. Destacando que la mayor parte de los proyectos de desarrollo no consideran como insumo inicial fundamental el conocimiento del funcionamiento del sistema ambiental. En particular los proyectos de desarrollo incluyen la construcción de SIG independiente a los programas parciales de investigación, generando debilidades a la hora de la integración de información diversa o la comprensión global de los sistemas. Es por este motivo que el SIG elaborado en este trabajo constituye un instrumento operativo esencial para la integración y gestión de toda la información involucrada.

## PERSPECTIVAS

La generación de información para comprender el funcionamiento de un sistema cuenca hidrográfica ha sido la constante de este trabajo, los avances alcanzados en este sentido indican la potencialidad de las líneas metodológicas desarrolladas. Pero como siempre sucede cuando se busca profundizar en el conocimiento de un sistema natural, se termina por descubrir todo lo que se desconoce sobre este sistema.

En este sentido este trabajo generó una serie de perspectivas, desafíos e interrogantes hacia el futuro:

La potencialidad de extrapolación de la metodología de identificación, delimitación espacial y seguimiento en el tiempo de unidades suelo-vegetación en otros territorios. En especial la organización de la información de las imágenes de baja resolución, este trabajo se realizó con esta expectativa, disponiendo hoy de la base de las imágenes SPOT-VGT, integradas en el SIG y construida la matriz de datos, para la extrapolación de la metodología en todo el territorio del Uruguay.

Continuar integrando variables ambientales en la interpretación de la firma espectral de parcelas con suelo descubierto. En especial, avanzar con los factores ya determinados: humedad del suelo, técnicas de manejo del suelo, materia mineral. Una línea posible en este sentido hacia el futuro es el seguimiento permanente y continuo de parcelas específicas.

Profundizar en la metodología de evaluación de la evapotranspiración / escurrimiento superficial y subsuperficial, con datos de campo. Es necesario profundizar en este sentido determinando un programa de mediano plazo, integrando varias cuencas pequeñas aforadas, que permita contrastar los resultados teóricos obtenidos con datos de campo.

Tal vez el desafío mayor, consiste en la utilización de la información generada y las propuestas metodológicas para la gestión sustentable del territorio, que tienda a aumentar los niveles de producción minimizando los procesos de degradación del sistema ambiental. En este sentido la metodología de trabajo propuesta y su potencial para generar información, constituye la base de un plan de gestión a nivel de la cuenca hidrográfica.

También es necesario explorar aplicaciones prácticas, integrando estas metodologías para generar la información necesaria a nivel de predio con las nuevas tecnologías agrícolas especialmente la siembra de precisión.

## Bibliografía

**Achkar, M., Cayssials, R. y Domínguez, A. 1999.** Desafíos para Uruguay – Espacio agrario – espacio ambiental. Ed. Nordan. Montevideo Uruguay.

**Achkar, M. 2000a.** Situación agraria del Uruguay. En Perfil Ambiental del Uruguay – 2000 Ed. Nordan, p.59-70, Montevideo Uruguay.

**Achkar, M. 2000b.** Ordenamiento ambiental del territorio para la actividad apícola en los departamentos de: Flores, Paysandú, Río Negro y Soriano. Aplicación de metodología SIG. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias. Montevideo Uruguay. 196pp.

**Achkar, M. y Domínguez, A. 2000.** El sistema ambiental uruguayo. En Perfil Ambiental del Uruguay – 2000 Ed. Nordan, p.17-28, Montevideo Uruguay.

**Achkar, M. 2002.** Evaluación de la distribución de la materia orgánica del horizonte superficial del suelo mediante el uso de imágenes satelitales. En Perfil Ambiental del Uruguay – 2002 Ed. Nordan, p.69-80, Montevideo Uruguay.

**Achkar, M., Panario, D., Kaemmerer, M., Anno, F., Puech, V., Garces, S., Mehier, S., Lefèvre-Fonollosa MJ. 2004a.** Use of SPOT4-5/VEGETATION data for the study of Vegetation Productivity in a humid moderate climate, based on Multivariable Analysis. Bassin A Sánchez – Río Negro - Uruguay, (1998 – 2002). Second International SPOT/VEGETATION Users Conference Antwerp, Belgium.

**Achkar, M., Cayssials, R., Domínguez, A. y Pesce, F. 2004b.** Hacia un Uruguay Sustentable, gestión integrada de cuencas hidrográficas. Ed. Redes- AT. Montevideo Uruguay.

**Achkar, M., Cayssials, R. y Domínguez, A. 2004c.** Evolución de los procesos de aprovechamiento productivo de las tierras al oeste del Uruguay. En Colloque International: Réseau CDP Cuenca del Plata Université Toulouse Le Mirail. France.

**Adams, J.B. Smith, M.O. Johnson, N.P. 1986.** Spectral mixture modeling: A new analysis of rock and soil types at the Viking Lander 1 site. Journal of Geophysical Reserch, N°91. 8098-8112pp.

**Al-Abbas, A.H. Swain, P.H. y Baumgardner, M.F. 1971.** Relating organic matter and clay content to the multispectral radiance of soils. *Soil Science*. V° 114. 477-485pp.

**Alvarez, R. y Lavado, R.S. 1997.** Climate, organic matter and clay content relationships in the Pampa and Chaco soils, Argentina. *Geoderma* N°83. 127-141pp.

**Aman, A., Randriamanantena, H. P., Podaire, A., & Frouin, R., 1992.** Upscale integration of normalized difference vegetation index: the problem of spatial heterogeneity. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 30 (2):326-338.

**Anno, F., Achkar, M., Puech, V., 2003.** Analyse multitemporelle et multirésolution pour l'étude de la productivité végétales en zone climatique tempérée, bulletin SFPT n°170, ISSN n°02446014, p.30-38.

**Arvidsson, J. 1998.** Influence of soil texture and organic matter content of bulk density, air content, compression index and crop yield in field and laboratory compression experiments. *Soils & Tillage Reserch*. N° 49 159-170pp.

**Asner, P. Carol, A. Wessman, C. Bateson, A. y Jeffrey, L. 2000.** Impact of tissue, canopy and landscape factors on the hyperspectral reflectance variability of arid ecosystems. *Remote Sensing Environment*. N° 74. 69-84pp.

**Assad, M.L. Hamada, E. Cavalieri, A. 1998.** Sistemas de informacoes geograficas na avaliacao de terras para agricultura. In. *Sistema de Informacoes Geográficas Aplicacoes na Agricultura*. Assad, E. y Eyji Sano, E. Editores. Embrapa. Brasil. 191-232pp.

**Bardinet, C. Benard, M. Blank, J.P. Monget, J.M. Tricart, J. 1984.** Cartographie automatique et détection de contours des unités géomorphologiques de la zone de Mopti-Bandiagara (Mali° par données multisatellites Landsat, Radar SIR-A, simulation SPOT. In: 8° Symposium Canadien de Télédétection. Canadá. 187-194pp.

**Barrán, J.P. y Nahum, B. 1985.** Bases económicas de la revolución Artigista. Ed. Banda Oriental. Montevideo Uruguay.

**Baumgardner, M.F. Silva, L.F. Biehl, L.L y Stoner, E.R. 1985.** Reflectance properties of soils. *Advances in Agronomy*. V° 38. 2-44pp.

**Bayer, C. y Mielniczuk, J. 1999.** Dinamica e funcao da materia organica. In: *Fundamentos da materia organica do solo*. Ed. Santos, G.A. y Camargo, F.A. GENESIS. Porto Alegre. 9-26pp.

**Bishop, T.F.A. y McBratney, A.B. 2001.** A comparison of prediction methods for the creation of field-extent soil property maps. *Geoderma*. N° 103. 149-160p.

**Boix-Fayos, C. Calvo-Cases, A. Imeson, A.C. y Soriano-Soto, M.D. 2001.** Influence of soil properties on the aggregation of some mediterranean soils and the use of aggregate size and stability as band degradation indicators. *CATENA* N° 44. 47-67pp.

**Bonn, F. Y Rochon, G. 1996.** Précis de télédétection. Volume 1 Principes et methodes. Ed. UREF. Québec. Canadá.

**Bosque Sendra, J. 1992.** Sistemas de información geográfica. Colección Monografías y tratados GER. Ediciones RIALP, Madrid. 451 pp. (Serie Geografía y Ecología - Tratados)

**Boulaine, J. 1969.** Sol, Pédon et Génon, concepts et definitions. *Bull. AFES*, N° 2. Paris. 31–40pp.

**Bowers, S. A. y Hanks, R. J. 1965.** Reflection of radiant energy from soil. *Soil Science*. V° 100. 130-138pp.

**Brabant, P. 1994.** Pédologie et systeme d'information geographique. Comment introduire les cartes de sols et les autres données sur les sols dans les SIG? *Pédologie*. V° 27. N° 2. 315-339pp.

**Braun, P. y Hense, A. 2004.** Combining Ground –Based and satellite data for calibrating vegetation indices. Electronic format on the web *the 2nd. VEGETATION International Users Conference*. Antwerp, Bélgica.

**Camara, G., and J. S. Medeiros. 1998.** Principios básicos em geoprocessamento. In: *Sistemas de Informações Geográficas*, E. Delgado y E. Eyji (ed.) Ediciones Embrapa, Brasilia. p. 3-11.

**Canas, A.A.D. y Barnet, M.E.1985.** The generation and interpretation of false-colour composite principal component images. *International Journal of Remote Sensing*. V° 6. N° 6. 867-881pp.

**Carrasco, S. 2002.** Caso Práctico ACP. [www.uv.es/carracs/PDF/caso](http://www.uv.es/carracs/PDF/caso).

**Carreiras, J. M. B., Shimabukuro, Y. E., & Pereira, J. M. C., 2002.** Fraction images derived from SPOT-4 VEGETATION data to assess land-cover change over the State of Mato Grosso, Brazil. *Int. J. Remote Sensing*, vol.23, n°23:4979-4983.

**Cayssials, R. y Alvarez, C. 1983.** Interpretación agronómica de la carta de reconocimiento de suelos del Uruguay. MGAP. DGRNR. Boletín Técnico N° 9. Montevideo Uruguay.

**Chen, X., 2002.** Using remote sensing and GIS to analyse land cover change and its impacts on regional sustainable development. *Int. J. Remote Sensing*, vol.23, n°1:107-124.

**Chen, J. M., Pavlc, G., Brown, L., Cihlar, J., Leblanc, S. G., White, H. P., Hall, R. J., Peddle, D. R., King, D. J., Trofymow, J. A., Swift, E., Van Der Sanden, J., Pellikka, P. K. E. 2002.** Derivation and validation of Canada-wide coarse-resolution leaf area index maps using high-resolution satellite imagery and ground measurements. *Remote Sensing of Environment*, 80:165-184.

**Chuvienco, E. 1990.** Fundamentos de teledetección espacial. Colección Monografías y tratados GER. Ediciones RIALP, Madrid. 453 pp. (Serie Geografía y Ecología - Tratados).

**Chuvienco, E. Salas, J. Aguado, I. Cocero, D. Riaño, D. 2001.** Estimación del estado hídrico de la vegetación a partir de sensores de alta y baja resolución. *GeoFocus*. N°1. 1-16pp.

**Cierniewski, J. 1989.** The influence of the viewing geometry of bare rough soil surface on their spectral response in the visible and Near-Infrared range. *Remote Sensing of Environmental*. V° 27. 135-142pp.

**Cihlar, J., Latifovic, R., Beaubien, J., Guindon, B., & Palmer, M. 2002.** A TM-based accuracy assessment of land cover product for Canada derived from SPOT4/VGT data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, (accepted for publication).

**Cipra, J.E. Baumgardner, M.F. Stoner, E.R. y MacDonald, R.B. 1971.** Measuring radiance characteristics of soil with a field spectroradiometer. *Soil Science Society of America Journal*. V° 35. 1014-1017pp.

**Cipra, J.E. Franzmeier, D.P. Bauer, M.E. y Boyd, R.K. 1980.** Comparison of multispectral measurements from some nonvegetated soils using Landsat digital data and a spectroradiometer. *Soil Science Society of America Journal*. V° 44. 80-84pp.

**Clark, R.N. 1999.** Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. In: Remote sensing for the earth sciences: Manual of remote sensing. Vol 3. Rencz (ed). John Wiley & Sons, New York.

**Clevers J. 1997.** A simplified approach fro yield prediction of sugra beet based on optical remote sensing data. *Remote Sensing Environment*. N° 61. 221-228pp.

**Condit H.R. 1970.** The spectral reflectance of American soils. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. V° 36. 955-966pp.

**CONEAT. 1994.** Unidades de suelos Coneat. MGAP, DGRNAR, CONEAT. Montevideo Uruguay.

**Cowel, S. y Clift, R. 2000.** A methodology for assessing soil quantity and quality in life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*. N° 8 321-331pp.

**Crowley, J.K. 1991.** Visible and near-infrared reflectance spectra of playa evaporite minerals. *Journal of Geophysical Reserch*. N°96. 231-240pp.

**Daels, L. y Antrop, M. 1977.** The extraction of soil information from remote sensing documents. *Pédologie*. V° 27. N° 2. 123-153pp.

**Dehaan, R.L. y Taylor, G.R. 2004.** A remote-sensing method of mapping soils and surficial lags from a deepy weathered arid region, near Cobar, NSW, Australia. *Geochemistry*. V°4. N°2. 99-112pp.

**Defries, R. S., Townshend, J. R. G., y Hansen, M. C. 1999.** Continuous fields of vegetation characteristics at the global scale at 1-km resolution. *Journal of Geophysical Research*, 104(D14):16911-16923.

**Daniel, K.W. 2002.** An Approach for Estimating Soil Organic Matter Content Using Synthetic IRS Satellite Data in Tropical Soils of Lop Buri, Thailand. *Geospatial Application Papers*. In: [www.GISdevelopment.net](http://www.GISdevelopment.net).

**DIEA – MGAP. 2003.** Censo general agropecuario 2000. Montevideo Uruguay.

**Dillon, P:J. Molot, 1997.** Effect of landscape form on export of dissolved organic carbon, iron, and phosphorus from forested stream catchments. *Water Resours.* N°31. 2591-2600pp.

**Dommergues, Y., Mangenot, F. 1970.** *Ecologie microbiene du sol.* Masson et Cie. Paris.

**Doorenbos, J. and Pruitt, W. O., 1977.** Crop water requirements. *Irrigation and Drainage Paper No. 24*, (rev.) FAO, Rome, Italy. 144 p.

**Druck Fuks, S. 1998.** Novos Modelos para mapas derivados de informacoes de solos. In. *Sistema de Informacoes Geográficas Aplicacoes na Agricultura.* Assad, E. y Eyji Sano, E. Editores. Embrapa. Brasil. 373-404pp.

**Duchaufour, P. 1977.** *Pédologie. 1 Pédogenése et classification.* Ed. Masson. Paris Francia.

**Estreguil, C. 1996.** Télédétection spatiale visible et infrarouge de la dynamique du couvert forestier équatorial asiatique. Thèse de l'Université Paul Sabatier, CESBIO. Centre Commun de Recherche, Commission Européenne, 194 p.

**Escadafal, R. 1989.** Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et par télédétection. Application: exemple de la région de Tataouine (Tunisie). *Etudes et Thésés.* ORSTOM. Paris. Francia.

**Eshel, G. Levy, G.L. Singer, M.J. 2004.** Spectral reflectance properties of crusted soils under solar illumination. *Soil Science Society of America Journal.* N°68. 1982-1991pp.

**FAO. 1990.** Irrigation and Drainage Paper No. 24, *Crop water requirements*,

**Ferreira, A.J.D. Coelho, C.O.A. Walsh, R.P.D. Shakesby, R.A. Ceballos, A. Doerr, S.H. 2000.** Hydrological implications of soil water-repellency in Eucalyptus globulus forest, north-central Portugal. *Journal of Hydrology*. N°231-232. 165-177pp.

**Follet, R.F. McConkey, B. 2000.** The role of cropland agriculture for C sequestration in the Great Plains. In: *Proceedings of the Conference on Great Plains Soil Fertility*. V° 8. 1-15pp.

**Follet, R.F. 2001.** Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils. *Soils & Tillage Research*. N° 61. 77-92 pp.

**Fonseca, Paulo A. da. 2002.** Indices de Desenvolvimento Concelhio. In: *Revista de Estatística*. 2° Quadrimestre de 2002. Volume II. Brasil. 5 -16 pp.

**François, A. 2000.** Ciclo de formación sobre geodesia, referencial geográfica y proyecciones para los sistemas de información geográfica. *MVOTMA*, Montevideo. 48 pp.

**Frazier, B.E. 1989.** Use of landsat thematic mapper band ratios for soil investigations. *Remote Sensing of the Earth's Surface*. V° 9. N°1. 155-158pp.

**Frazier, B.E. y Cheng, Y. 1989.** Remote sensing of soil in the eastern Palouse Region with landsat thematic mapper. *Remote Sensing of Environmental*. V° 28. 317-325pp.

**Gaddas, F. 2001.** Proposition d'une methode de cartographie des pedopaysages. Tesis Doctoral. Paris. 212pp.

**Galvao, L.S. Pizarro, M.O. Epiphanyo, C.N. 2001.** Variations in reflectance of tropical soils: spectral-chemical composition relationships from AVIRIS data. *Remote Sensing of Environmental*. N° 75. 245-255pp.

**Gastó, J.; Cosio, F. y Panario, D. 1993.** Clasificación de ecorregiones y determinación de sitio y condición. Manual de aplicación a municipios y predios rurales. REPAAN. Quito.

**Genovese, G. Vignolles, C. Nègre, T. Passera, G. 2001.** A methodology for a combined use of normalised difference vegetation index and CORINE land cover data for cover crop yield monitoring and forecasting. *Agronomie*. N° 21 91-111pp.

**Gerbermann, A.H. y Neher, D.D.1979.** Reflectance of varying mixtures of clay soil and sand. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. N° 45. 1145-1151pp.

**Girard, M.C. 1985.** Télédétection de la surface du sol. In *Applications de la Télédétection à l'Agriculture*. Les Colloques de l'INRA, N°32. INRA. Paris. 177 – 193 pp.

**Girard, M. C., y Girard, C. M. 1989.** Télédétection appliquée, zones tempérées et intertropicales. Editions MASSON – ISBN : 2-225-81202-0, 260 p.

**Girard, M. C., y Girard, C. M. 1999.** Traitement des données de télédétection. Ed. DUNOD. Paris Francia.

**Grattan, S. R., W. Bowers, A. Dong, R. L. Snyder, J. J. Carroll, and W. George. 1998.** New crop coefficients estimate water use of vegetables, row crops. *California Agriculture* 52 (1): 16-21.

**Gregorich, E.G. Ellert, B:H: Dury, C.F. Linang, B.C. 1996.** Fertilization effects on soil organic matter turnover and crop residue storage. *Soil Science Society of America Journal*. N°60. 472-476pp.

**Guerschman, J.P., Paruelo, J.M., Di Bella, C., Giallorenzi, M.C., Pacin, F. 2002.** Land cover classification in the Argentine Pampas using multi-temporal Landsat TM data. *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 00, N° 00.

**Guissard, V. Defourny, P. Ledent, J. 2004.** Crop specific information extraction based on coarse resolution pixel sampling. Electronic format on the web *the 2nd. VEGETATION International Users Conference*. Antwerp, Belgique.

**Hassink, J. Whitmore, A.P. 1997.** A model of the physical protection of organic matter in soils. *Soil Science Society of America Journal*. N° 61 131-139pp.

**Hauwermeiren Van, S. 1998.** Manual de Economía Ecológica. Instituto de Economía Ecológica. Santiago de Chile. 265 pp.

**Hedley, J. y Mumby, P. 2003.** A remote sensing method for resolving depth and subpixel composition of aquatic benthos. *Limnology Oceanography*. N° 48 480-488pp.

**Hoffbeck, J.P. Landgrebe, D.A. 1996.** Classification of remote sensing images having high spectral resolution. *Remote Sensing of Environmental*. N° 57. 119-126pp.

**Huete, A.R. Post, D.F. y Jackson, R.D. 1984.** Soil spectral effects on 4-space vegetation discrimination. *Remote Sensing of Environmental*. N° 15. 155-165pp.

**Ishida, T. y Ando, H. 1999.** Use of disjunctive cokriging to estimate soil organic matter from Landsat Thematic mapper imagen. *International Journal of Remote Sensing*. V° 20. N° 8. 1549-1565pp.

**James, F. Y McCulloch, C. 1990.** Multivariate analysis in ecology and systematics : panacea or pandora's box. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* N° 21. 129-166p.

**Jiménez, E., Gil, J. y Rodríguez, G. 2000.** Análisis factorial. Ed. La Muralla, SA. / Hespérides. Madrid España.

**Jobbagy, E.G. Jackson, R.B. 2000.** The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications* N°10. 423-436pp.

**Jordan, C.F. 1969.** Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology* N° 50. 663-666p.

**Kaemmerer, M. 1979.** "Contribution à l'étude de l'évolution de la matière organique dans quelques sols d'Uruguay sous différents systèmes agro-écologiques". Tesis Doctoral, ENSAIA (INP de Lorraine). Nancy. Francia.

**Kaiser, H.F. 1974.** An index of factorial simplicity. *Psychometrika*. N° 39. 31-36 pp.

- Katerji, N. and Perrier, A. 1983.** Modélisation de l'évapotranspiration réelle ETR d'une parcelle de luzerne: rôle d'un coefficient cultural. *Agronomie* 3 (6): 513-521
- King, C. 1984.** La télédétection pour mieux comprendre la répartition des sols et leur fonctionnement: l'exemple des données de simulations SPOT. In: Principaux Résultats scientifiques du BRGM – Résumés. Francia. 269-270pp.
- Kogan, F.N. 1987.** Vegetation index far areal analysis or crop conditions. Proceedings of the 18th Conference on Agricultural and Forest Meteorology, AMS. held in W. Lafayette, Indiana, in september 1987. 103-106 pp.
- Kogan, F.N. 1990.** Remote sensing of wather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. *International Journal of Remote Sensing*. V° 11. N° 8. 1405-1419pp.
- Kontoes, C., G.G. Wilkinson, A. Burrill, S. Goffredo, and J. Megier. 1993.** An experimental system for the integration of GIS data in knowledge-based image analysis for remote sensing of agriculture. *International Journal of Geographical Information Systems*. Vol. 7, No. 3, pp. 247-262.
- Kravchencoa, A. y Bullocka, D. 2000.** The correlation of corn and soja, the grain yield withj the topography and the properties of the soils. *Agronomy Journal*. N° 92. 75-83pp.
- Krishnan, P. Alexander, J.D. Butler, B.J. y Hummel J.W. 1980.** Reflectance technique for predicting soil organic matter. *Soil Science Society of America Journal*. N° 44. 1282-1285pp.
- Kristof, S.J. Baumgardner, M.F. y Johannsen. 1974.** Spectral mapping of soil organic matter. *ITC Journal*. N° 4. 479-489pp.
- Lal, R. Kimble, J. Follet, R. 1997.** Land use and soil C pools in terrestrial ecosystems. In: Lal et al. (ed) *Management of carbon sequestration in soil*. CRC Press. Boca Raton. FL. USA. 1-10pp.
- Larson, W.E. Clapp, C.E. Pierre, W.H. Morachan, Y.B. 1972.** Effects of increasing of organic residue on continuous corn. II. Organic C, N, P and S. *Agronomy Journal*. N° 64. 204-208pp.
- Lauver, C., and J. Whistler. 1993.** A hierarchical classification of Landsat TM imagery to identify natural grassland areas and rare species habitat. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. Vol. 59, No. 5. 627-634pp.

**Lefevre-Fonollosa, M.J. 1983.** Télédétection d'anomalies Géobotaniques appliquée à la recherche minière. *Thèse d'état. Soutenue le 29 Juin 1983 à l'UPS-TOULOUSE. 2 tomes, 268 pages, 23 tableaux, 93 fig. 23 planches.*

**Lefevre-Fonollosa, M.J., Mimouni, A., & Jourdain, S. 1993.** Utilisation des données SPOT pour la cartographie d'un bilan de l'eau simplifié. Symposium International de Cartographie Spatiale organisé par l'ACI et l'ISPRS-Tunis.

**Legros, J.P. 1996.** Cartographies des sols, de l'analyse spatiale à la gestion des territoires. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. Lausanne. 321pp

**Leone A. and Sommer, P. 2000.** Multivariate Analysis of Laboratory Spectra for the Assessment of Soil Development and Soil Degradation in the Southern Apennines (Italy). *Remote Sensing of Environment. V° 72. 346-359pp.*

**Lima, W.P. 1993.** Impacto Ambiental do eucalipto Ed. EDUSP. San Paulo. Brasil

**Lozet, J. Mathieu, C. 2002.** Dictionnaire de science du sol. TEC&DOC. Paris. 575pp

**MAP. DSF. 1976.** Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay y leyenda explicativa, tomos I y II. Montevideo, Uruguay.

**Martini, M. Soumare, P.B. Ndione, J.A. Toure, A. 2004.** Crops and rangeland monitoring in senegal using SPOT4/5 Vegetation data. Second International SPOT/VEGETATION Users Conference Antwerp, Belgium.

**Matthews, H.L. Cunningham, R.L. y Petersen, G.W. 1973.** Spectral reflectance of selected Pennsylvania soils. *Soil Science Society of America Journal. N° 37. 421-424pp.*

**May, G.A. y Petersen, G.W. 1975.** Spectral signature selection for mapping unvegetated soils. *Remote Sensing of Environmental. N° 4. 211-220pp.*

**Mielniczuk, J. 1999.** Materia organica e a sustentabilidade de sistemas agricolas. In: Fundamentos da materia organica do solo. Ed. Santos, G.A. y Camargo, F.A. GENESIS. Porto Alegre. 1-8pp.

**Milton, E.J. y Webb J.P. 1987.** Ground radiometry multispectral survey of bare soils. *International Journal of Remote Sensing*. V° 8. N° 1. 3-14pp.

**Milton, E.J. Rollin, E.M. Emery, D.R. 1995.** Advances in spectrometry. In: Advances in Environmental Remote Sensing” (Eds Danson, FM and Plummer, SE) John Wiley & Sons Ltd, Chichester, pp 9-32.

**Molfino, J.H. y Califra, A. 2001.** Agua disponible de las tierras del Uruguay segunda aproximación. DSyA – DGRNR- MGAP. Montevideo Uruguay.

**Morel, R. 1996.** Les sols cultivés. TEC&DOC. Paris. 389pp.

**Moulin, S. Dedieu, G. Fischer, A. 1997.** Assimilation of optical satellite data into a crop process model: interannual study, Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing. Guyot & Phulpin, 767-771pp.

**Moulin, S. Zurita, R. Guérif, M Baret, F. 2003.** Characterizing the spatial and temporal variability of biophysical variables of a whwat crop using hyper-spectral measurements. IEEE International Geoscience and remote sensing Symposium, July 21-25 /2003, Toulouse. Francia.

**Mulla, D.J. 1995.** Geostatistics, remote sensing and precision farming. In ‘Precision Agriculture: Spatial and Temporal Variability of Environmental Quality’. (Eds Lake JV and Bock GR) pp 100-119. (John Wiley & Sons)

**Museo y Jardín Botánico, 2001.** Curso de conocimiento y reconocimiento de flora indígena el Uruguay. Ed. Intendencia Municipal de Montevideo, Servicio de Imprenta y Reproducciones, Montevideo, 127p.

**Musto, J.W. 1991.** Impacts of plantation forestry on various soil types. South Africa, Institute for Commercial Forestry Research, Scottsville. ICFR Annual Research Report. 37-47pp.

**Musy, A. ; M. Soutter. 1991.** Physique du sol. Ed. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. Lausanne. 335pp.

**Nagy, G., Bidegain, M., Caffera, M., Lopez, C., Ponce, A., Sencion, G. 2002.** Evaluacion de la vulnerabilidad ambiental al cambio global. Perfil Ambiental del Uruguay / 2002, Coord. Domínguez, A., y Prieto, R., Ed. Nordan. Montevideo, p.15-25.

**Oetter, D. G., Cohen, W. B., Berterretche, M., Maierperger, T. K., & Kennedy, R. E. 2000.** Land cover mapping in an agricultural setting using multiseasonal Thematic Mapper data. Remote Sensing of Environment, 76:139-155.

**Palacios- Orueta, A. Ustin, S. 1998.** Remote sensing of soils in the Santa Monica Mountains: I. Spectral analysis. Remote Sensing of Environmental. N° 65. 170-183pp.

**Palacios- Orueta, A. Pinzón, J. Ustin, S. y Roberts, D. 1999.** Remote sensing of soils in the Santa Monica Mountains: II. Hierarchical foreground and background analysis. Remote Sensing of Environmental. N° 68. 138-151pp.

**Panario, D. 1987.** Geomorfología, Propuesta de un marco estructural y un esquema de evolucion del modelado del relieve uruguayo. Serie Avances de Investigación, Facultad de Humanidades y Ciencias, UdelaR. Montevideo Uruguay.

**Panario, D. 1994.** Evolución y tendencia de la vegetación nativa Uruguaya. En contribución de los estudios edafologicos al conocimiento de la vegetación en la República Oriental del Uruguay. Boletín Técnico n°13 MGAP, p. 49-67.

**Panario, D. y Bidegain, M. 1997.** Climate change effects on grasslands in Uruguay. Climate Research, vol.9:37-40.

**Panario, D., Achkar, M. y Aicardi, J.P. 2000.** Sector agropecuario. Diagnóstico y escenarios sustentables. En Uruguay Sustentable. Ed. Redes-AT- Uruguay. p. 17-160. Montevideo.

**Paruelo, J.M., Jobbagy, E.G., Sala, E.O. 2001.** Current distribution of ecosystem functional types in temperate South America. Ecosystems (2001) 4: 683-698.

**Paustian, K. Parton, W.J. Persson, J. 1992.** Modeling of soil organic matter in organic amended and nitrogen-fertilized longterm plots. *Soil Science Society of America Journal*. N° 56. 476-488pp.

**Pax-Lenney, M., & Woodcock, C. E. 1997.** Monitoring agricultural lands in Egypt with multitemporal Landsat TM imagery: How many images are needed?. *Remote Sensing of Environment*, 59:522-529.

**Pía, L. 1986.** Analisis multivariado: metodo de componentes principales. OEA. Washington, D.C. USA.

**Pinilla, C. 1995.** Elementos de Teledetección. Madrid. Ed. RA-MA. 313pp.

**Planet, W.G. 1970.** Some comments on reflectance measurements of wet soils. *Remote Sensing of Environmental*. N° 1. 127-129pp.

**PNUD, DINAMA. 1999.** Propuesta de estrategia nacional para la conservación y uso sostenible de la diversidad biologica del Uruguay. DINAMA. Montevideo Uruguay.

**PNUMA, FAO, UNESCO. 1983.** Misión sobre la desertificación de tierras en el Uruguay. DsyA-MGAP. Montevideo Uruguay.

**Presutti, M. 2003.** Clasificación orientada a objetos de imágenes satelitales: su aplicación en la estimación del escurrimiento superficial de una cuenca hidrográfica. Universidad Nacional de la Plata. Argentina.

**Price, K.P., D.A. Pyke, and L. Mendes. 1992.** Shrub dieback in a semiarid ecosystem: The integration of remote sensing and geographic information systems for detecting vegetation change. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* Vol. 58, No. 4. 455-463pp.

**Qi, J., Marsett, R. C., Moran, M. S., Goodrich, D. C., Heilman, P., Kerr, Y. H., Dedieu, G., Chehbouni, A., Zhang, X. X. 2000.** Spatial and temporal dynamics of vegetation in the San Pedro River basin area. *Agricultural and Forest Meteorology*, 105:55-68.

**Qin, W. 1993.** Modeling bidirectional reflectance of multicomponent vegetation canopies. Remote Sensing Environment. N° 46. 235-245pp.

**Quaife, T. Lomas, M. Picard, G. Disney, M. Woodward, I. Quegan, S. Lewis, P. 2004.** Using SPOT Vegetation data for dynamic vegetation modelling within the centre for terrestrial carbon dynamics (CTCD). Second International SPOT/VEGETATION Users Conference Antwerp, Belgium.

**Rahman, A. F., Gamon, J. A., Sims, D. A., & Schmidts, M. 2003.** Optimum pixel size for hyperspectral studies of ecosystem function in southern California chaparral and grassland. Remote Sensing of Environment, 84:192-207.

**Ray, T. Y Murray, B. 1996.** Nonlinear spectral mixing in desert vegetation. Remote Sensing Environment. N° 55. 59-71pp.

**Rasmussen, P.E. Allmaras, R.R. Rhode, C.R. Roager, N.C. 1980.** Crop residue influences on soil carbon and nitrogen in a wheat-fallow system. Soil Science Society of America Journal. N° 44. 596-600pp.

**Reicosky, D.C. Dugas, W.A. Torbert, H.A. 1997.** Tillage-induced soil carbon and biomass production. Journal Water Conservation. N° 50. 253-262pp.

**Reis, E. 1997.** Estadística Multivariada Aplicada. Ed. Silabo. Lisboa. Portugal.

**Robertson, G.P. Paul, E.A. Harwood, R.R. 2000.** Greenhouse gases in intensive agriculture: contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere. Science 289. 1922-1925pp.

**Rosengurtt, B. 1994.** Especies campestres generales. En contribución de los estudios edafológicos al conocimiento de la vegetación en la República Oriental del Uruguay. Boletín Técnico n°13 MGAP, p.17-46.

**Rouse, J., Hass, R. Schell, J. Deering, D. Harlan, J. 1974.** Monitoring the vernal advancement of natural vegetation. NASA/GSFC. Greenbelt. USA.

**Salisbury J.W., and D.M. D'Aria. 1992.** Infrared (8-14  $\mu\text{m}$ ) remote sensing of soil particle size. *Remote Sensing Environment*. 42:157-165.

**Sarli, V. 2004.** Impacto del cambio en el uso del suelo sobre el funcionamiento ecosistémico. Departamentos de Paysandú y Río Negro Uruguay. Tesis de Maestría. FC. UdelaR. 104 pp.

**Satterwhite, M.B. y Henley, J. 1987.** Spectral characteristics of selected soils and vegetation in northern Nevada and their discrimination Using Band Ratio Techniques. *Remote Sensing of Environmental*. N° 23. 155-175pp.

**Segura-Castruita, M.A. Ortiz, C.A. Gutiérrez, M.C. 2003.** Localización de suelos de humedad residual a partir de imágenes de satélite: Parte 2 factores que influyen en su reflectancia y clasificación con los procedimientos: mínima distancia y máxima verosimilitud. *Terra Latinoamericana (Sociedad Mexicana de Ciencias del Suelo)* 135-142pp.

**Sejenovich, H. 1996.** Manual de cuentas patrimoniales. PNUMA-FB. México.

**Seyler, F., Chaplot, V., Muller, F., Cerri, C. E. P., Bernoux, M., Ballester, V., Feller, C., Cerri, C. 2002.** Pasture mapping by classification of Landsat TM images. Analysis of the spectral behaviour of the pasture class in a real medium-scale environment : the case of the Piracicaba Catchment (12 400 km<sup>2</sup>, Brazil). *Int. J. Remote Sensing*, vol.23, n°23:4985-5004.

**Sganga, J. C. 1994.** Caracterización de la vegetación de la R.O.U. en contribución de los estudios edafológicos al conocimiento de la vegetación en la República Oriental del Uruguay. *Boletín Técnico* n°13 MGAP, p.5-14.

**Smith, M., Allen, R. G., Monteith, J. L., Perrier, A., Pereira, L., and Segeren, A. 1992.** Report of the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements. UN-FAO, Rome, Italy, 54 p.

**Soegaard, H., Jensen, N. O., Boegh, E., Hasager, C. B., Schelde, K., & Thomsen, A. 2003.** Carbon dioxide exchange over agricultural landscape using eddy correlation and footprint modelling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 114:153-173.

**Stoner, E.R. y Baumgardner, M.F. 1981.** Characteristic variations in reflectance of surface soils. *Soil Science Society of America Journal*. N° 45. 1161-1165pp.

**Stoner, E.R. Baumgardner, M.F. Weismiller, R.A. Biehl, L.L. y Robinson, B.F. 1980.** Extension of laboratory measured soil spectra to field conditions. *Soil Science Society of America Journal*. N° 45. 572-574pp.

**Strachan, I.B. Patley, E. Boisvert, B. 2002.** Impact of nitrogen and environmental conditions on corn as detected by hyperspectral reflectance. *Remote Sensing of Environment*, N°80. 213-224pp.

**Taboada, M.A. Panuska, E.M. Lavado, R.S. Giménez, J.E. Duymovich, O.A. 1987.** Perdidas de sustancias humicas de suelos natricos a traves del Rio Samborombon. Comparación de suelos con horizonte natrico y argilico. *Notas del Museo de la Plata. Tomo XXI Geología* N° 74. 68-76pp. Argentina.

**Tian Y., Woodcock C.E., Wang Y., Privette J.L., Shabanov N.V., Zhou L., Zhang Y., Buremann W., Dong J., Veikkanen B., Häme T., Andersson K., Ozdogan M., Knyazikhin Y., Myneni R.B. 2002.** Multiscale analysis and validation of the MODIS LAI product. II. Sampling strategy, *Remote Sens. Environ.*, 83. 431-441.

**Tucker, C. J. y Miller L.D. 1977.** Shortgrass prairie spectral measurements. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Vol. 41, N°9. 1975. 1157-1162 pp.

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

**UNESCO. 1982.** Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur. Ed. Rostlac. Montevideo Uruguay.

**Vegetation. 2000.** 2 years to prepare the future, proceedings. Lake Maggiore – Italy, 3-6 April 2000. Joint Research Centre, European Commission, SAI.

**Wallace, J. S., Roberts, J. M., and Sivakuma, M. V. K. 1990.** "The estimation of transpiration from sparse dryland millet using stomatal conductance and vegetation area indices." *Agric. and Forest Meteorol.* 51: 35-49.

**West, T.O. Marland, G. 2002.** A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: a comparing of tillage practices in the United States. *Agriculture Ecosystem and Environment*. V° 91. 217-232pp.

**Xiao, X., Boles, S., Liu, J., Zhuang, D., Liu, M. 2002.** Characterization of forest types in Northeastern China, using multi-temporal SPOT-4 VEGETATION sensor data. *Remote Sensing of Environment*, 82:335-348.

<http://www.spot-vegetation.com>

<http://www.gsfc.nasa.gov>

## **ANEXO – 1**

**Glosario de tipos de suelos, según la clasificación de suelos utilizada en Uruguay**

## **Tipos de suelos presentes en la cuenca del Arroyo Sánchez.**

El presente glosario de tipos de suelos resumido es una esquematización de la Carta de Reconocimientos de Suelos del Uruguay. Tomo I Clasificación de Suelos.

**MAP. DSF. 1976.** Carta de reconocimientos de suelos del Uruguay. Leyenda explicativa Tomo I. Montevideo Uruguay.

### **Horizonte Diagnóstico:**

Se denominan horizontes diagnóstico a determinadas capas del suelo originadas por procesos pedogenéticos naturales, cuyas características morfológicas, físicas o químicas se definen con precisión, tanto cualitativa como cuantitativa.

La presencia, ausencia o el grado de desarrollo de estos horizontes se usan como base para la clasificación de los suelos.

### **Horizonte Diagnóstico Superficiales:**

Son aquellos que se forman en la superficie del suelo.

**Horizonte Melánico:** es un horizonte oscurecido por su tenor relativamente alto de MO, con alta saturación de cationes bivalentes y con una estructura en general moderada a fuerte.

**Horizonte Umbrico:** es un horizonte sensiblemente oscurecido por la MO, con bajo contenido de bases, siendo frecuentemente el hidrógeno el catión intercambiable dominante.

**Horizonte Histico:** es un horizonte turboso, muy rico en MO parcialmente descompuesta en condiciones de exceso de humedad.

**Horizonte Ocrico:** es un horizonte muy claro, muy pobre en MO.

**Horizonte Albico:** es un horizonte eluvial que ha perdido arcilla y hierro, solos o en combinación.

### **Horizonte Diagnóstico Subsuperficiales:**

Son aquellos que se forman por debajo de la superficie del suelo.

**Horizonte Argilúvico:** es un horizonte enriquecido en arcillas de origen eluvial. Se forma siempre inmediatamente por debajo de un horizonte que pierde arcilla por eluviación.

**Horizonte Natrico:** es un tipo especial de horizonte argilúvico, con estructura columnar o prismática y alto contenido de sodio intercambiable.

**Horizonte Cambico:** es un horizonte alterado de textura más pesada que arenoso franco, pero el grado de alteración no es suficiente como para haber destruido todos los minerales alterables.

**Horizonte Gleico:** es un horizonte con condiciones de hidromorfismo pronunciado debido a estar

### **Argisoles:**

Pertenece al Orden III "Suelos Saturados Lixiviados", que agrupa a los suelos cuya característica fundamental es la diferenciación textural, normalmente resultante de procesos de lixiviación de arcillas.

### **Argisoles Dístricos Ocrícos:**

Argisoles con horizonte superficial (20 cm.) con una capacidad de intercambio catiónico de 10meq/100g de suelo o menor, con horizonte ócrico (muy claro, muy pobre en materia orgánica) sin cambio textural abrupto.

### **Argisoles Eútricos Melánicos Típicos:**

Argisoles con horizonte superficial (20 cm.) con capacidad de intercambio catiónico mayor de 20 meq/100g de suelo y porcentaje de saturación de bases de 60 % a pH 7. Con horizonte melánico, sin cambio textural abrupto ni horizonte álbico.

### **Planosoles Eútricos Melánicos:**

Pertenece al Orden III, presentan un horizonte argilúvico de máximo desarrollo y muy poco permeable, que origina una napa colgada de duración considerable. Los Planosoles Eútricos presentan en el horizonte superficial (20 cm.) CIC > 20 meq/100 g y saturación de bases mayor a 60% a pH 7. Presentan horizonte melánico.

### **Brunosoles:**

Pertenece al Orden II "Suelos Melánicos", son suelos oscuros, con contenidos elevados de MO, en general texturas medias. La secuencia de los horizontes es A-B-Cca, el B es en general argilúvico, moderadamente diferenciado, pero que no restringe excesivamente los movimientos del aire y del agua.

### **Brunosoles Eútricos:**

Brunosoles que cumplen una de las siguientes características:

- Si la relación de porcentaje de arcilla entre los horizontes B y A es menor a 1:2, la CIC del horizonte superficial (20cm.) es mayor a 25 meq/100g y su saturación de bases es mayor a 60% a pH = 7.
- Si la relación de porcentaje de arcilla entre los horizontes B y A es 1:2 o mayor, la CIC del horizonte superficial (20cm.) es mayor a 20 meq/100g y su saturación de bases es mayor a 60% a pH = 7.

### **Brunosoles Eútricos Háplicos:**

Son Brunosoles Eútricos que carecen de horizonte argilúvico.

### **Brunosoles Eútricos Lúvicos:**

Son Brunosoles Eútricos con horizonte argilúvico bien desarrollado y muestran una transición abrupta entre A y B.

**Brunosoles Eútricos Típicos:**

Son Brunosoles Eútricos con horizonte argilúvico y que carecen de transición abrupta entre los horizontes A y B.

**Brunosoles Subeútricos:**

Brunosoles que cumplen con una de las siguientes características:

- Si la relación de porcentaje de arcilla entre B y A es menor de 1:2
  - a) En el horizonte superficial (20 cm.),  $25 \leq \text{CIC} < 10 \text{ meq/100g}$ .
  - b) En el horizonte superficial (20 cm.),  $\text{CIC} > 25 \text{ meq/100g}$  y la saturación de bases es menor o igual al 60% a pH 7.
- Si la relación de porcentaje de arcilla entre B y A es 1:2 o mayor,
  - a) En el horizonte superficial (20 cm.),  $20 \leq \text{CIC} < 10 \text{ meq/100g}$ .
  - b) En el horizonte superficial (20 cm.),  $\text{CIC} > 20 \text{ meq/100g}$  y la saturación de bases es menor o igual al 60% a pH 7.

**Brunosoles Subeútricos Lúvicos:**

Son Brunosoles Subeútricos con horizonte argilúvico bien desarrollado y muestran una transición abrupta entre A y B.

**Brunosoles Subeútricos Típicos:**

Son Brunosoles Subeútricos con horizonte argilúvico y que carecen de transición abrupta entre los horizontes A y B.

**Vertisoles:**

Pertenecen al Orden II "Suelos Melánicos", son suelos muy oscuros, texturas finas, cuyas propiedades se relacionan con su alto contenido de arcillas expansivas.

**Vertisoles Háplicos:**

Son los Vertisoles que carecen de doble perfil, presentan un horizonte melánico de gran espesor, siendo su perfil de tipo A-C.

**Vertisoles Rúpticos:**

Son los Vertisoles de doble perfil, que generalmente aparece asociado con microrrelieve de ondas.

**Vertisoles Rúpticos Lúvicos:**

Presentan un horizonte argilúvico horizontalmente discontinuo.

**Vertisoles Rúpticos Típicos:**

No presentan un horizonte argilúvico horizontalmente discontinuo.

### **Fluvisoles Heterotexturales Melánicos:**

Pertenecen al Orden I "Suelos Poco Desarrollados". Son suelos profundos, derivados de materiales de origen aluvial, que no muestran evidencias importantes de procesos pedogenéticos salvo acumulación de materia orgánica. Heterotexturales son los que en los primeros 120 cm. la fracción limo es mayor al 30%, la fracción arena es mayor al 20% y donde el espesor de los horizontes discordantes supera el 20% del espesor total del perfil. Por último presenta horizonte melánico.

### **Gleysoles:**

Pertenecen al Orden VI " Suelos Hidromorficos". Son suelos cuyas características están determinadas por una evolución dominada por el efecto de un exceso de agua. Los Gleysoles en particular son suelos que carecen de horizonte hístico.

### **Gleysoles Háplicos Melánicos:**

Gleysoles que carecen de horizonte argilúvico y presentan horizonte melánico.

### **Gleysoles Lúvicos Melánicos Típicos:**

Gleysoles con horizonte argilúvico, presentan horizonte melánico sin cambio textural abrupto.

### **Solods Ocrícos:**

Pertenecen al Orden V " Suelos Halomorficos". Las propiedades más importantes se deben a la presencia actual o pasada de cantidades significativas de sodio intercambiable. Los Solods presentan procesos de lixiviación intensa, lo suficiente para eliminar una parte considerable del sodio. Particularmente presentan horizonte ócrico.

### **Solonetz Ocríco:**

Pertenecen al Orden V " Suelos Halomorficos". Los Solonetz poseen una alcalinidad elevada a través de todo el perfil, un contenido de sodio intercambiable mayor de 15% en todo el perfil.

## **ANEXO – 2**

### **Descripción de las unidades CONEAT**

**Descripción de las unidades CONEAT:  
(MGAP, DGRNAR, CONEAT, 1994)**

**03.2** El material geológico corresponde a sedimentos aluviales limosos y limo arcillosos. Los suelos dominantes son Gleysoles Háplicos Melánicos, Fluvisoles Heterotexturales Melánicos y eventualmente Vertisoles Háplicos. El relieve corresponde a planicies de nivel altimétrico medio, planos ligeramente descendentes hacia los cursos de agua. El uso es pastoril y la vegetación es de pradera estival, con bosque de galería contra los cauces y parque en el resto, en las planicies más altas se desarrollan cultivos agrícolas de ciclo estival.

**03.3** El material geológico corresponde a sedimentos limo arcillosos y sedimentos aluviales de texturas variables y estratificados. Los suelos dominantes son Planosoles, Gleysoles y Fluvisoles. El relieve corresponde a planicies de inundación rápida y de corta duración, observándose canales y meandros típicos de su origen fluvial. El uso es pastoril, con vegetación de pradera estival.

**03.40** El material geológico corresponde a sedimentos limo arcillosos y sedimentos aluviales de texturas variables y estratificadas, asociados a los cursos de agua. Los suelos dominantes son Brunosoles Eútricos Lúvicos, Solonetz Ocrico y Gleysoles Típicos Melánicos. El relieve corresponde a planicies medias con áreas deprimidas. El uso es pastoril con vegetación de monte parque, con árboles de densidad variable.

**03.51** El material geológico corresponde a sedimentos limo arcillosos. Los suelos dominantes son Brunosoles Eútricos Lúvicos Este grupo se localiza mayormente en planicies altas, a veces laderas muy suaves, con pendientes menores de 1%, excepcionalmente inundables. Son áreas cultivadas o tierras pastoriles con pasturas invernales de alta calidad.

**03.52** El material geológico corresponde a sedimentos limo arcillosos. Los suelos dominantes son Brunosoles Eútricos Lúvicos, Solonetz Ocricos y con menor presencia Solods Ocricos y Fluvisoles. El relieve corresponde a planicies excepcionalmente inundables y presenta vegetación de parque con densidad variable de árboles, espinillos, algarrobos, etc., el uso dominante es pastoril.

**09.3** El material geológico corresponde a sedimentos areno arcillosos eventualmente con losas de areniscas silicificadas. Los suelos dominantes están correlacionados con la topografía, en las laderas fuertes Argisoles Dístricos Ocricos, y en las laderas suaves Brunosoles Subeútricos Típicos y Lúvicos, El relieve está constituido por lomadas de laderas asimétricas, donde las laderas sur son de marcada convexidad y pendientes de 4

a 8% y las laderas de exposición norte son mas extendidas y de pendientes suaves, de 1 a 3%. La vegetación es de pradera estival, en las áreas de texturas mas arenosas existen cultivos estivales pero predomina el uso pastoril estival.

**10.1** El material geológico corresponde a sedimentos limo arcillosos y arcillosos del Cuaternario. Los suelos corresponden a Brunosoles Eútricos Típicos y Vertisoles Rúpticos Típicos, asociados a Brunosoles Eútricos Lúvicos, y en las concavidades, Planosoles Eútricos Melánicos. El relieve es suave, con pendientes de 1 a 3%. El campo natural tiene pasturas invernales de alta calidad, el uso predominante es de cultivos.

**10.2** El material geológico corresponde a sedimentos limo arcillosos con arena en cantidades significativas. Los suelos corresponden a Vertisoles Rúpticos Lúvicos y Brunosoles Eútricos y Subéuticos Lúvicos. El relieve es ondulado con laderas ligeramente convexas y extendidas, de pendientes de 2%. El campo natural tiene pasturas invernales de alta calidad, el uso predominante es de cultivos.

**11.1** El material geológico corresponde a sedimentos limosos con cantos rodados integrados en la masa, en cantidades generalmente abundantes. Los suelos corresponden a Brunosoles Eutricos Típicos, moderadamente profundos. El relieve es ondulado fuerte 6 a 12% de pendiente. El uso es agrícola pastoril, en general la vegetación es de pradera, con predominio de especies invernales.

**11.2** El material geológico corresponde a sedimentos limosos. Los suelos predominantes son Brunosoles Eútricos Típicos, en las laderas de mayor convexidad existen asociados suelos superficiales, y en las concavidades aparecen Solonetz y Planosoles Eútricos Melánicos El relieve es ondulado (3 a 6% de pendiente) a ondulado fuerte (5-8%). El uso predominante es de cultivo invierno-estivales y rastrojos. La pradera natural tiene predominio de especies invernales y vegetación de parque en especial de espinillos.

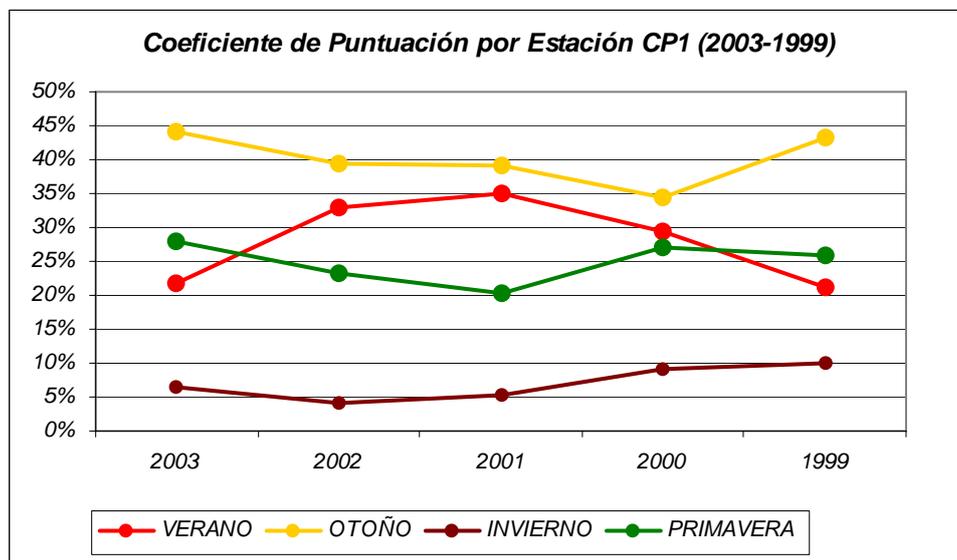
**11.5** El material geológico corresponde a sedimentos limosos y limo arcillosos del Cuaternario. Los suelos dominantes corresponden a Brunosoles Eútricos Típicos y en las concavidades, Planosoles Eútricos Melánicos. El relieve es en general ondulado, con mayores rangos de pendientes en las áreas de disección (4 a 8%) e interfluvios ondulados con pendientes de 3 a 6%. La tierra se encuentra bajo cultivos predominantemente invernales y estivales, con praderas artificiales convencionales integrando la rotación o campos fertilizados con fósforo donde el trébol blanco y el lotus se integran a la buena dotación de pasturas naturales.

**11.6** El material geológico corresponde a sedimentos limosos. Los suelos corresponden a Brunosoles Eútricos Típicos y Vertisoles Háplicos. El relieve es suavemente ondulado, con predominio de laderas extendidas de pendientes entre 1 y 3%. La tierra se encuentra bajo cultivos predominantemente invernales y estivales, con praderas artificiales convencionales integrando la rotación o campos fertilizados con fósforo donde el trébol blanco y el lotus se integran a la buena dotación de pasturas naturales.

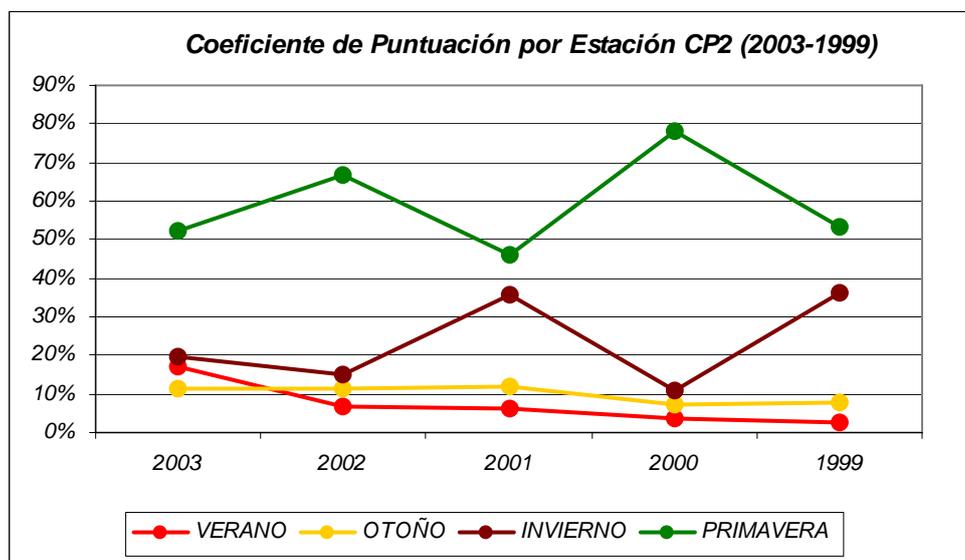
**ANEXO – 3**

**COEFICIENTES DE PUNTUACIONES ACP**

	COEFICIENTES DE PUNTUACIÓN 1° ACP				
	2003	2002	2001	2000	1999
<b>VERANO</b>	21,66%	33,06%	35,13%	29,51%	21,07%
<b>OTOÑO</b>	44,08%	39,49%	39,24%	34,46%	43,24%
<b>INVIERNO</b>	6,35%	4,26%	5,22%	9,02%	9,90%
<b>PRIMAVERA</b>	27,91%	23,19%	20,41%	27,01%	25,79%
<b>TOTAL</b>	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%



	COEFICIENTES DE PUNTUACIÓN 2° ACP				
	2003	2002	2001	2000	1999
<b>VERANO</b>	17,13%	6,83%	6,43%	3,51%	2,49%
<b>OTOÑO</b>	11,23%	11,54%	12,08%	7,37%	7,93%
<b>INVIERNO</b>	19,57%	14,95%	35,49%	10,78%	36,15%
<b>PRIMAVERA</b>	52,06%	66,69%	46,00%	78,35%	53,44%
<b>TOTAL</b>	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%



**ANEXO – 4**

**Tablas de correspondencia interanual**

1998	1999						Margen Activo
	1	2	3	4	5	6	
1	88	2	2	0	7	0	99
2	7	11	18	14	20	1	71
3	34	2	132	27	7	2	204
4	8	0	12	87	11	7	125
5	0	7	8	20	85	53	173
6	0	0	0	23	32	60	115
<b>Margen Activo</b>	<b>137</b>	<b>22</b>	<b>172</b>	<b>171</b>	<b>162</b>	<b>123</b>	<b>787</b>

1999	2000						Margen Activo
	1	2	3	4	5	6	
1	117	4	16	0	0	0	137
2	0	8	12	1	1	0	22
3	3	7	130	24	7	1	172
4	0	7	19	72	39	34	171
5	0	4	35	32	74	17	162
6	0	0	0	26	30	67	123
<b>Margen Activo</b>	<b>120</b>	<b>30</b>	<b>212</b>	<b>155</b>	<b>151</b>	<b>119</b>	<b>787</b>

2000	2001						Margen Activo
	1	2	3	4	5	6	
1	109	11	0	0	0	0	120
2	1	18	8	0	1	2	30
3	66	11	93	11	16	16	212
4	1	2	36	64	14	38	155
5	0	5	17	38	54	37	151
6	0	0	3	26	33	57	119
<b>Margen Activo</b>	<b>177</b>	<b>47</b>	<b>157</b>	<b>139</b>	<b>118</b>	<b>149</b>	<b>787</b>

2001	2002						Margen Activo
	1	2	3	4	5	6	
1	117	0	39	17	3	1	177
2	19	19	4	2	3	0	47
3	3	11	86	31	23	3	157
4	5	1	15	47	41	30	139
5	0	6	5	15	61	31	118
6	4	0	13	25	56	51	149
<b>Margen Activo</b>	<b>148</b>	<b>37</b>	<b>162</b>	<b>137</b>	<b>187</b>	<b>116</b>	<b>787</b>

2002	2003						Margen Activo
	1	2	3	4	5	6	
1	121	14	3	0	2	8	148
2	3	25	8	0	1	0	37
3	14	8	97	6	12	25	162
4	10	1	32	51	18	25	137
5	0	2	31	80	58	16	187
6	0	0	1	66	20	29	116
<b>Margen Activo</b>	<b>148</b>	<b>50</b>	<b>172</b>	<b>203</b>	<b>111</b>	<b>103</b>	<b>787</b>

Los valores de las tablas de correspondencias indican la variabilidad interanual en la asignación de los pixeles correspondientes a cada categoría.

**ANEXO – 5**

**Tablas de correspondencias Landsat – SPOT-VGT, según año**

**1998 (superficies en hectáreas)**

LANDSAT 5TM 21/11/1998	SPOT - VGT					
	FORESTAL	PASTORIL AGRICOLA INVERNAL	PASTORIL AGRICOLA ESTIVAL	AGRICOLA PASTORIL ESTIVAL	AGRICOLA PASTORIL INVERNAL	AGRICOLA
FORESTAL	3787	372	645	370	240	1
MONTE NATURAL Y PARQUE	1652	759	4119	1502	858	567
CAMPO NATURAL INVERNAL	487	750	1047	407	1984	822
CAMPO NATURAL ESTIVAL	1280	372	2945	2053	754	371
CEREALES INVERNAL	483	2357	1079	978	5574	3207
CEREALES ESTIVAL	994	652	1782	925	996	375
PRADERAS INVERNAL	270	2395	1886	461	2463	248
PRADERAS ESTIVAL	759	552	1629	942	500	273
<b>Totales</b>	<b>9712</b>	<b>8209</b>	<b>15132</b>	<b>7638</b>	<b>13369</b>	<b>5864</b>

UNIDADES	1º clase	2º clase	3º clase	4º clase	Confusión
<b>Forestal</b>	<b>39%</b>	<b>17%</b>	<b>13%</b>	<b>8%</b>	<b>23%</b>
<b>Pastoril agrícola invernal</b>	<b>9%</b>	<b>29%</b>	<b>29%</b>		<b>33%</b>
<b>Pastoril agrícola estival</b>	<b>19%</b>	<b>27%</b>	<b>11%</b>	<b>12%</b>	<b>31%</b>
<b>Agrícola pastoril estival</b>	<b>12%</b>	<b>12%</b>	<b>27%</b>	<b>20%</b>	<b>29%</b>
<b>Agrícola pastoril invernal</b>	<b>42%</b>	<b>18%</b>	<b>15%</b>		<b>25%</b>
<b>Agrícola</b>	<b>55%</b>	<b>6%</b>	<b>4%</b>	<b>5%</b>	<b>30%</b>

**2000 (superficies en hectáreas)**

LANDSAT 7TM 20/12/2000	SPOT - VGT					
	FORESTAL	PASTORIL AGRICOLA INVERNAL	PASTORIL AGRICOLA ESTIVAL	AGRICOLA PASTORIL ESTIVAL	AGRICOLA PASTORIL INVERNAL	AGRICOLA
FORESTAL	7674	216	648	234	212	56
MONTE NATURAL Y PARQUE	604	253	2553	779	601	165
CAMPO NATURAL INVERNAL	259	220	1003	905	2422	958
CAMPO NATURAL ESTIVAL	349	85	1709	1218	492	482
CEREALES INVERNAL	460	803	2301	959	4461	2857
CEREALES ESTIVAL	1280	195	3438	2932	817	643
PRADERAS INVERNAL	176	386	1041	1462	3053	2975
PRADERAS ESTIVAL	567	170	2225	2055	749	441
<b>Totales</b>	<b>11369</b>	<b>2328</b>	<b>14918</b>	<b>10544</b>	<b>12807</b>	<b>8577</b>

UNIDADES	1º clase	2º clase	3º clase	4º clase	Confusión
<b>Forestal</b>	<b>67%</b>	<b>5%</b>	<b>3%</b>	<b>5%</b>	<b>20%</b>
<b>Pastoril agrícola invernal</b>	<b>9%</b>	<b>17%</b>	<b>35%</b>		<b>39%</b>
<b>Pastoril agrícola estival</b>	<b>23%</b>	<b>15%</b>	<b>12%</b>	<b>17%</b>	<b>33%</b>
<b>Agrícola pastoril estival</b>	<b>28%</b>	<b>20%</b>	<b>12%</b>	<b>7%</b>	<b>33%</b>
<b>Agrícola pastoril invernal</b>	<b>35%</b>	<b>24%</b>	<b>19%</b>		<b>22%</b>
<b>Agrícola</b>	<b>33%</b>	<b>8%</b>	<b>35%</b>	<b>5%</b>	<b>19%</b>

**2001(4) (superficies en hectáreas)**

LANDSAT 7TM 11/04/2001	SPOT - VGT					
	FORESTAL	PASTORIL AGRICOLA INVERNAL	PASTORIL AGRICOLA ESTIVAL	AGRICOLA PASTORIL ESTIVAL	AGRICOLA PASTORIL INVERNAL	AGRICOLA
FORESTAL	8031	645	657	50	96	60
MONTE NATURAL Y PARQUE	2033	615	2139	1060	320	541
CAMPO NATURAL INVERNAL	749	459	615	830	1790	953
CAMPO NATURAL ESTIVAL	273	95	2387	1340	336	552
CEREALES INVERNAL	484	622	1322	756	3290	3581
CEREALES ESTIVAL	1871	352	3348	3481	576	1139
PRADERAS INVERNAL	68	371	504	989	2831	2528
PRADERAS ESTIVAL	618	241	1825	1971	519	560
<b>Totales</b>	14127	3400	12797	10477	9758	9914

UNIDADES	1° clase	2° clase	3° clase	4° clase	Confusión
<b>Forestal</b>	<b>57%</b>	<b>14%</b>	<b>2%</b>	<b>4%</b>	<b>23%</b>
<b>Pastoril agrícola invernal</b>	<b>14%</b>	<b>18%</b>	<b>11%</b>		<b>57%</b>
<b>Pastoril agrícola estival</b>	<b>19%</b>	<b>26%</b>	<b>17%</b>	<b>14%</b>	<b>24%</b>
<b>Agrícola pastoril estival</b>	<b>33%</b>	<b>19%</b>	<b>13%</b>	<b>10%</b>	<b>25%</b>
<b>Agrícola pastoril invernal</b>	<b>33%</b>	<b>29%</b>	<b>18%</b>		<b>20%</b>
<b>Agrícola</b>	<b>36%</b>	<b>12%</b>	<b>25%</b>	<b>6%</b>	<b>21%</b>

**2001(6) (superficies en hectáreas)**

LANDSAT 7TM 30/06/2001	SPOT - VGT					
	FORESTAL	PASTORIL AGRICOLA INVERNAL	PASTORIL AGRICOLA ESTIVAL	AGRICOLA PASTORIL ESTIVAL	AGRICOLA PASTORIL INVERNAL	AGRICOLA
FORESTAL	8005	677	624	88	154	37
MONTE NATURAL Y PARQUE	2147	771	2155	1163	969	993
CAMPO NATURAL INVERNAL	202	1435	685	772	1956	1169
CAMPO NATURAL ESTIVAL	766	502	700	316	401	322
CEREALES INVERNAL	577	356	1952	1192	2457	3475
CEREALES ESTIVAL	722	270	2569	1581	276	1306
PRADERAS INVERNAL	230	511	1452	1463	3532	2499
PRADERAS ESTIVAL	1602	515	2372	1046	749	763
<b>Totales</b>	14251	5037	12509	7621	10494	10564

UNIDADES	1° clase	2° clase	3° clase	4° clase	Confusión
<b>Forestal</b>	<b>56%</b>	<b>15%</b>	<b>5%</b>	<b>11%</b>	<b>13%</b>
<b>Pastoril agrícola invernal</b>	<b>7%</b>	<b>10%</b>	<b>29%</b>		<b>54%</b>
<b>Pastoril agrícola estival</b>	<b>6%</b>	<b>17%</b>	<b>19%</b>	<b>21%</b>	<b>37%</b>
<b>Agrícola pastoril estival</b>	<b>21%</b>	<b>14%</b>	<b>4%</b>	<b>15%</b>	<b>46%</b>
<b>Agrícola pastoril invernal</b>	<b>22%</b>	<b>32%</b>	<b>18%</b>		<b>28%</b>
<b>Agrícola</b>	<b>33%</b>	<b>12%</b>	<b>24%</b>	<b>7%</b>	<b>24%</b>

**2002 (superficies en hectáreas)**

LANDSAT 7TM 21/09/2002	SPOT - VGT					
	FORESTAL	PASTORIL AGRICOLA INVERNAL	PASTORIL AGRICOLA ESTIVAL	AGRICOLA PASTORIL ESTIVAL	AGRICOLA PASTORIL INVERNAL	AGRICOLA
FORESTAL	8051	312	791	353	260	103
MONTE NATURAL Y PARQUE	1038	521	1585	1403	953	410
CAMPO NATURAL INVERNAL	721	870	1752	1172	3256	537
CAMPO NATURAL ESTIVAL	623	401	2728	2369	938	513
CEREALES INVERNAL	647	598	804	986	5016	2575
CEREALES ESTIVAL	433	312	2703	2060	471	1646
PRADERAS INVERNAL	590	419	460	599	3084	2300
PRADERAS ESTIVAL	697	25	689	1096	357	215
<b>Totales</b>	12800	3458	11512	10038	14335	8299

UNIDADES	1° clase	2° clase	3° clase	4° clase	Confusión
<b>Forestal</b>	<b>63%</b>	<b>8%</b>	<b>5%</b>	<b>5%</b>	<b>19%</b>
<b>Pastoril agrícola invernal</b>	<b>25%</b>	<b>17%</b>	<b>12%</b>		<b>46%</b>
<b>Pastoril agrícola estival</b>	<b>24%</b>	<b>6%</b>	<b>23%</b>	<b>14%</b>	<b>33%</b>
<b>Agrícola pastoril estival</b>	<b>20%</b>	<b>24%</b>	<b>11%</b>	<b>14%</b>	<b>31%</b>
<b>Agrícola pastoril invernal</b>	<b>35%</b>	<b>22%</b>	<b>23%</b>		<b>20%</b>
<b>Agrícola</b>	<b>31%</b>	<b>20%</b>	<b>28%</b>	<b>3%</b>	<b>18%</b>