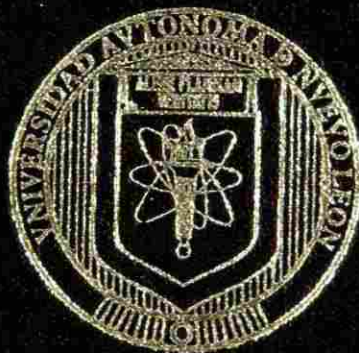


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES  
SUBDIRECCION DE POSTGRADO



ALTERNATIVAS DE MANEJO FORESTAL  
MEDIANTE EL DESARROLLO DE CONOCIMIENTO  
ESPECIFICO DE SITIO

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN  
MANEJO DE RECURSOS NATURALES

PRESENTA  
ING. M.C. RENE G. GONZALEZ MURGUIA

LINARES, N. L.

SEPTIEMBRE DEL 2003

FD  
Z5991  
FCF  
2003  
.66



1020149181



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES  
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



ALTERNATIVAS DE MANEJO FORESTAL  
MEDIANTE EL DESARROLLO DE CONOCIMIENTO  
ESPECÍFICO DE SITIO

TESIS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN  
MANEJO DE RECURSOS NATURALES  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

PRESENTA  
ING. M.C. RENE G. GONZALEZ MURGUIA

LINARES, N. L.

SEPTIEMBRE DEL 2003

976624

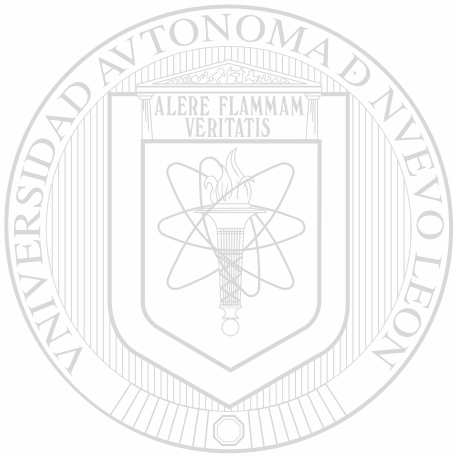
TD

Z5991

FCF

2003

.G6



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

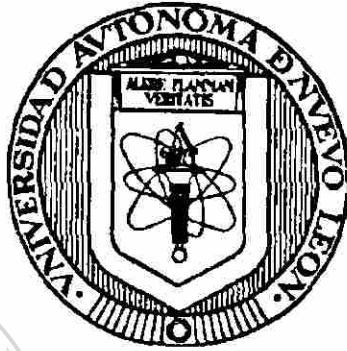
®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



FONDO  
TESIS

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES  
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO**



**ALTERNATIVAS DE MANEJO FORESTAL MEDIANTE EL  
DESARROLLO DE CONOCIMIENTO ESPECÍFICO DE SITIO**

**TESIS**

**PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN MANEJO DE  
DIRECCIÓN DE RECURSOS NATURALES**

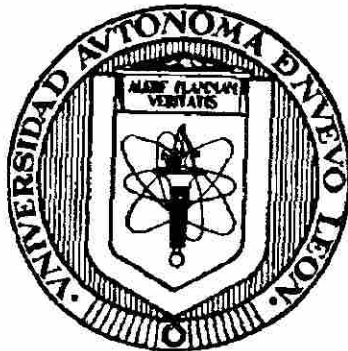
**PRESENTA**

**ING. M.C. RENÉ G. GONZÁLEZ MURGUÍA**

**LINARES, N.L.**

**SEPTIEMBRE DEL 2003.**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**  
**SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO**



**ALTERNATIVAS DE MANEJO FORESTAL MEDIANTE EL  
DESARROLLO DE CONOCIMIENTO ESPECÍFICO DE SITIO**

**TESIS**

**PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN MANEJO DE  
RECURSOS NATURALES**

**PRESENTA**

**ING. M. C. RENÉ G. GONZÁLEZ MURGUÍA**

**COMISIÓN DE TESIS**

**DR. EDUARDO J. TREVIÑO GARZA**  
**DIRECTOR**

**DR. OSCAR A. AGUIRRE CALDERÓN**  
**ASESOR**

**DR. JAVIER JIMÉNEZ PÉREZ**  
**ASESOR**

**DR. ISRAEL CANTÚ SILVA**  
**ASESOR**

**DR. RAHIM FOROUGHBAKHCH POURNAVAB**  
**ASESOR**

## **Dedicatoria**

Este trabajo está dedicado a mi esposa Analsabel Alvarado Ruíz, por todo su amor, paciencia y apoyo en la realización del mismo.

También a mis hijos Hanssel e Ivann González Alvarado como un ejemplo de trabajo y perseverancia en el desarrollo personal.

A mis padres Ángel René González Zatarain y Laura Delia Murguía Zavala como un tributo a su esfuerzo en darnos la mejor preparación.

A la señora María Amparo Ruíz Piña y al Lic. Ricardo Alvarado Ortiz por su constante apoyo en estos años.

## **Agradecimientos**

Mi agradecimiento a la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León por haberme brindado la oportunidad de cursar este grado.

Al Doctor Eduardo Treviño Garza por todo su apoyo, consejos y asesoría académica durante mi estancia en la facultad.

A mis asesores por su tiempo y disponibilidad en el desarrollo del presente documento.

Al Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey por su apoyo y constante impulso al desarrollo de sus miembros.

Al Arquitecto Leonardo Quintanilla Cárdenas por impulsarme y brindarme tantas oportunidades.

A Dios por darme la oportunidad de estar entre ustedes.



La ecuación polinomial de ajuste calculada a partir de los valores NDVI es:

Ecuación de ajuste:  $y = -0.4655 x^2 + 1.2619 x + 0.195$

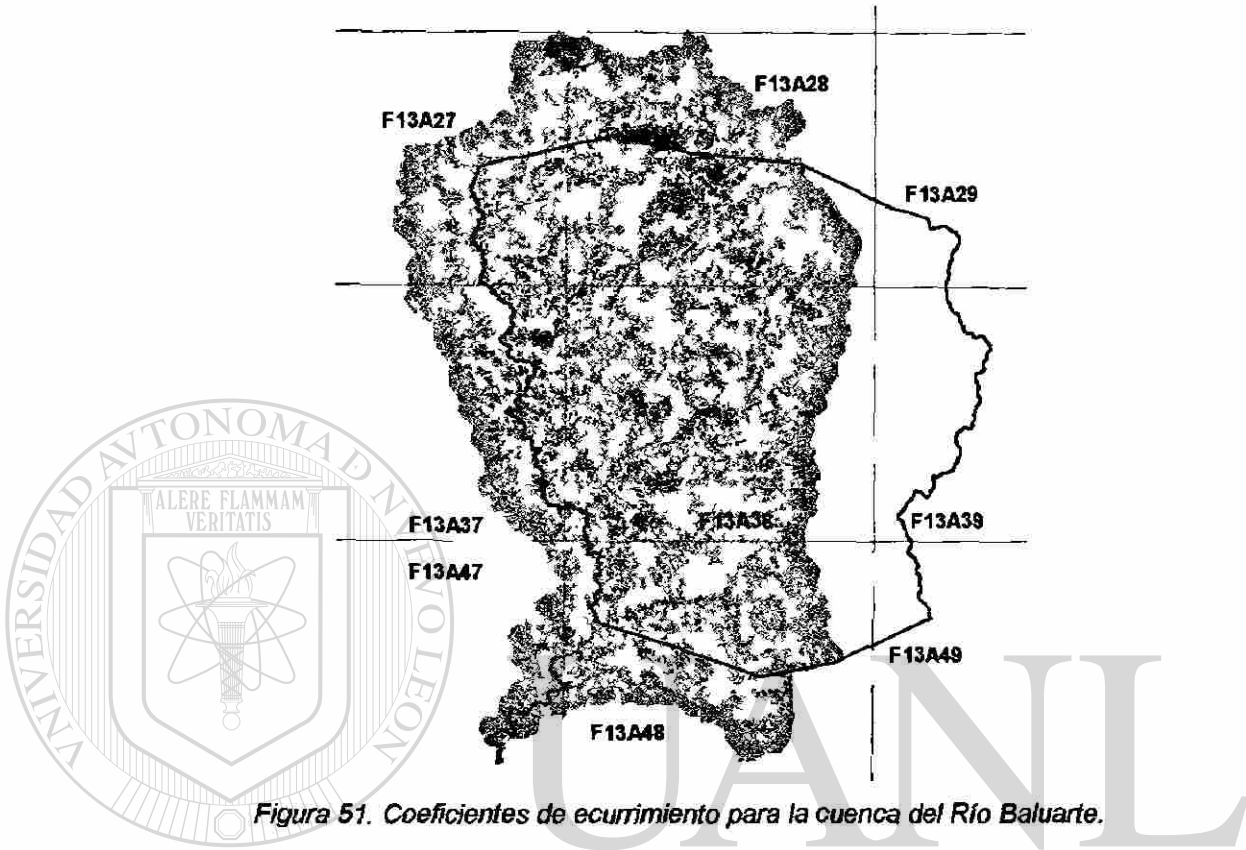


Figura 51. Coeficientes de escurrimiento para la cuenca del Río Baluarte.



Figura 52. Coeficientes de escurrimiento para el área de estudio 1973 y 2000.

<b>Contenido</b>	<b>Página</b>
Resumen. . . . .	i
1. Introducción. . . . .	1
1.1. Objetivo general. . . . .	3
1.2. Objetivos particulares . . . . .	3
1.3. Hipótesis . . . . .	3
2. Antecedentes. . . . .	4
3. Área de estudio. . . . .	14
3.1. Fisiografía . . . . .	14
3.2. Geología . . . . .	14
3.3. Edafología . . . . .	15
3.4. Climas . . . . .	16
3.5. Precipitación y Temperatura . . . . .	18
3.6. Hidrología. . . . .	19
3.7. Uso de suelo y vegetación. . . . .	19
3.8. Aspectos socioeconómicos. . . . .	21
4. Materiales y métodos. . . . .	26
4.1. Infraestructura utilizada. . . . .	26
4.2. Definición del polígono del predio y zona de estudio. . . . .	26
4.3. Definición de proyección geográfica. . . . .	26
4.4. Adquisición y captura de información. . . . .	27
4.5. Información derivada de procesar la información adquirida. . . . .	28
4.6. Evaluación de la cobertura vegetal mediante percepción remota. . . . .	30
4.6.1. Procesamiento de imágenes Landsat. . . . .	33
4.6.2. Integración de información dasocrática existente. . . . .	35
4.6.3. Selección de áreas para muestreo de campo. . . . .	36
4.6.4. Firmas espectrales y validación. . . . .	37
4.6.5. Clasificación de imagen Landsat-ETM+ 2000. . . . .	38
4.7. Estimación de densidad de la masa forestal. . . . .	39
4.8. Análisis de la dinámica regional y sus impactos. . . . .	39
4.8.1. Evaluación multitemporal. . . . .	39
4.8.2. Modificación de escurrimientos por deterioro de la cobertura forestal. . . . .	41
4.8.3. Análisis de distribución de la población y sus actividades respecto a la problemática se subcuencas en el ejido Pueblo Nuevo. . . . .	45
4.9. Modelo de estratificación de la masa forestal (rodalización) . . . . .	45
4.9.1. Definición de zonas de protección dentro del subrodal (segregación). . . . .	47

---

4.10. Integración de información modelada a la dasocrática existente. . . . .	47
5. Resultados. . . . .	49
5.1. Modelo Digital de Elevación . . . . .	49
5.2. Pendiente. . . . .	49
5.3. Exposición. . . . .	50
5.4. Determinación de la cobertura forestal actual. . . . .	51
5.4.1. Procesamiento de imágenes Landsat. . . . .	52
5.4.2. Integración de información dasocrática existente. . . . .	53
5.4.3. Selección de áreas para muestreo de campo. . . . .	54
5.4.4. Firmas espectrales y validación. . . . .	55
5.4.5. Clasificación de imagen Landsat-ETM+ 2000. . . . .	56
5.5. Estimación de densidad de la masa forestal. . . . .	59
5.6. Evaluación multitemporal. . . . .	63
5.7. Modificación de escurrimientos por deterioro de la cobertura forestal. . . . .	67
5.8. Análisis de distribución de la población y sus actividades respecto a la problemática de subcuencas en el ejido Pueblo Nuevo. . . . .	74
5.9. Modelo de estratificación de la masa forestal (rodalización). . . . .	78
5.9.1. Definición de zonas de protección dentro del subrodal (segregación). . . . .	83
5.10. Integración de información modelada a la dasocrática existente. . . . .	84
6. Discusión. . . . .	91
7. Conclusión. . . . .	98
8. Bibliografía. . . . .	102
Anexo I. Normalización Topográfica. . . . .	110
Anexo II. Integración de Información Dasocrática. . . . .	127
Anexo III. Métodos alternos para evaluación de Cobertura Vegetal. . . . .	133
Anexo IV. Modelación Hidrológica. . . . .	143

---

## Índice de Figuras

Página

Figura 1. Diagrama de planeación forestal del ejido Pueblo Nuevo 1997-2007. ....	13
Figura 2. Ubicación del área de estudio. ....	14
Figura 3. Geología estratigráfica y estructural de área de estudio. ....	15
Figura 4. Edafología del área de estudio. ....	16
Figura 5. Distribución de tipos climáticos en el área de estudio. ....	17
Figura 6. Distribución de la Precipitación media anual en la zona de estudio. ....	18
Figura 7. Distribución de la Temperaturas media anual en la zona de estudio. ....	18
Figura 8. Diagrama climático de Walter para la estación meteorológica de El Salto, Durango. .	19
Figura 9. Principales Cauces y área de captación en la zona de estudio. ....	20
Figura 10. Tipos de Uso de Suelo y Vegetación del Inventario Nacional Forestal 2000 en la zona de estudio. ....	20
Figura 11. Localidades e infraestructura de caminos, brechas y veredas. ....	24
Figura 12. Grado de Marginación por localidad en el Estado de Durango y otros Estados colindantes. ....	25
Figura 13. Polígono del área de estudio, definición de zona de estudio y localización de cartas 1:50,000 de INEGI. ....	27
Figura 14. Esquema de procesos desarrollados de la presente investigación. ....	48
Figura 15. Modelo Digital de Elevación de la zona de estudio. ....	49
Figura 16. Distribución de la pendiente en la zona de estudio. ....	50
Figura 17. Distribución de exposiciones en la zona de estudio. ....	50
Figura 18. Imagen Landsat-TM Original, composición de falso color TM4-R, TM5-V, TM3-A. ....	51
Figura 19. Imagen Landsat-Panromática Original. ....	51
Figura 20. Imagen Landsat-ETM+ remuestreada composición de falso color TM4-R, TM5-V, TM3-A. ....	52
Figura 21. Modelo de iluminación. ....	52
Figura 22. Imagen landsat-ETM+ remuestreada y normalizada. ....	53
Figura 23. Cobertura digital de la información dasocrática de rodales. ....	53
Figura 24. Cobertura digital de la información dasocrática de subrodales. ....	54
Figura 25. Ubicación de las 62 zonas de muestreo para la definición de polígonos de entrenamiento. ....	54
Figura 26. Patrón digital para cada tipo de vegetación del clima Templado. ....	55
Figura 27. Patrón digital para cada tipo de vegetación del grupo de clima Cálido. ....	55
Figura 28. Patrón digital para otros tipos de vegetación y usos de suelo. ....	56
Figura 29. Clasificación de tipos de vegetación y usos de suelo, según Inventario Nacional Forestal 2000. ....	57
Figura 30. Clasificación de tipos de vegetación y usos de suelo para el ejido Pueblo Nuevo. ....	57
Figura 31. Densidad con NDVI. ....	59
Figura 32. Densidad con PCA2. ....	59
Figura 33. Densidad con Tasseled Cap. ....	59
Figura 34. Tipos de vegetación y su densidad. ....	60
Figura 35. Correlación entre valores de índice de sitio y NDVI promedio para cada subrodal. ....	61
Figura 36. Comparación entre índice de sitio e índice de diferencia normalizada de vegetación para la cuarta anualidad por tratamiento a aplicar. ....	62
Figura 37. Comparación entre cobertura de copas e índice de diferencia normalizada de vegetación para la cuarta anualidad por tratamiento a aplicar. ....	62
Figura 38. Landsat-MSS 1973. ....	63
Figura 39. Landsat-MSS 1986. ....	63
Figura 40. Landsat-TM 2000. ....	63
Figura 41. NDVI 1973 (Azul). ....	63
Figura 42. NDVI 1986 (Verde). ....	63

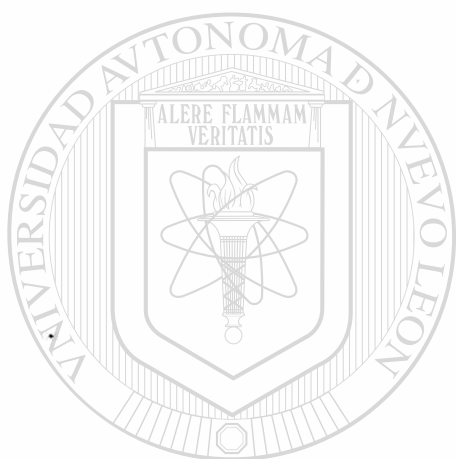
Figura 43. NDVI 2000 (Rojo).	63
Figura 44. Imagen que integra los 3 NDVI's para el análisis multitemporal.	63
Figura 45 Esquema para la interpretación colorimétrica de la imagen compuesta por NDVI's, basada en la densidad de cobertura forestal entre fechas de escenas.	64
Figura 46. Cambios de cobertura forestal experimentada en el área de estudio y subrodales de producción.	65
Figura 47. Comparación porcentual del cambio de cobertura forestal en subrodales de producción y áreas no manejadas.	66
Figura 48. Comparación porcentual de la superficie por tratamiento para la cuarta anualidad y patrón de densidad 1973-1986-2000.	66
Figura 49. Cuenca del Río Baluarte, estaciones meteorológicas e hidrométrica ubicadas dentro de la cuenca, principales escurrimientos y límite del área de estudio.	67
Figura 50. Modelo de distribución de precipitación media anual en el área de estudio.	68
Figura 51. Coeficientes de escurrimiento para la cuenca del Río Baluarte.	69
Figura 52. Coeficientes de escurrimiento para el área de estudio 1973 y 2000.	69
Figura 53. Cauces digitalizados comparados contra modelados escala 1:250,000.	70
Figura 54. Cauces digitalizados comparados contra modelados escala 1:50,000.	70
Figura 55. Definición de submicrocuencas del modelado hidrológico comparado contra información hidrológica de áreas de captación del ejido Pueblo Nuevo.	71
Figura 56. Longitud de flujos para las dos subcuencas del área de estudio.	71
Figura 57. Hidrogramas 1973-2000 para la cuenca del Río Baluarte.	72
Figura 58. Hidrogramas 1973-2000 para la cuenca del Río San Diego.	72
Figura 59. Grado de deterioro expresado en cambio porcentual de escurrimiento.	73
Figura 60. Categorías de riesgo hidrológico por submicrocuenca.	73
Figura 61. Distribución de localidades y total de población respecto al deterioro de submicrocuencas.	74
Figura 62. Establecimiento de áreas agrícolas en zonas forestales (Río Baluarte).	75
Figura 63. Establecimiento de áreas agrícolas en zonas forestales (Río San Diego).	75
Figura 64. Riesgo de submicrocuencas y crecimiento de localidades en 5 años.	76
Figura 65. Información vectorial digital de submicrocuencas modeladas.	78
Figura 66. Tipos de vegetación y exposición en porcentajes.	78
Figura 67. Comparación de rodales actuales y exposiciones de 8 y 2 clases (NW-SE).	79
Figura 68. Información vectorial digital de exposición preferencial.	79
Figura 69. Integración de los dos criterios y generación de los Rodales modelados.	80
Figura 70. Rodales actuales.	80
Figura 71. Rodales modelados.	80
Figura 72. Sobreposición de Rodales actuales y modelados.	81
Figura 73 Integración de los dos criterios y generación de los Subrodales modelados.	82
Figura 74. Subrodales digitalizados, sobre imagen Landsat-ETM+.	83
Figura 75. Subrodales digitalizados, sobre clasificación.	83
Figura 76. Subrodales modelados, sobre imagen Landsat-ETM+.	83
Figura 77. Subrodales modelados, sobre clasificación.	83
Figura 78. Vías de comunicación y transmisión.	84
Figura 79. Cauces.	84
Figura 80. Cartografía dasocrática existente.	84
Figura 81. Información digital generada.	84
Figura 82. Distribución altitudinal porcentual de tipos de vegetación y uso de suelo.	85
Figura 83. Clasificación de tipos de vegetación y usos de suelo, según Inventario Nacional Forestal 2000, curva de nivel de los 1,400 m.s.n.m. en negro, e isoterma media anual de los 18°C en rojo.	85
Figura 84. Distribución de las especies del género Pinus en subrodales de producción.	86
Figura 85. Distribución de Otras Coníferas en subrodales de producción.	86
Figura 86. Distribución de Pinus cooperii en subrodales de producción.	87
Figura 87. Distribución de Pinus durangensis en subrodales de producción.	87
Figura 88. Distribución de Pinus teocote en subrodales de producción.	87

## Índice de Tablas

Página

Tabla 1. Superficie forestal nacional según Anuarios Estadísticos. ....	11
Tabla 2. Tipos de suelo en el área de estudio. ....	16
Tabla 3. Descripción de los tipos climáticos (clasificación climática de Köppen, modificado por E. García, 1964) presentes en la zona de estudio. ....	17
Tabla 4. Superficie por tipo de vegetación o uso de suelo en el área de estudio, según Inventario Nacional Forestal 2000. SEMARNAT. ....	21
Tabla 5. Variables demográficas. ....	22
Tabla 6. Distribución de la Población Económicamente Activa según SEGOB. ....	22
Tabla 7. Distribución de la Población Económicamente Activa según INEGI. ....	22
Tabla 8. Comparación de indicadores promedio para el Estado y Municipio. ....	23
Tabla 9. Infraestructura educativa Municipal. ....	23
Tabla 10. Indicadores relevantes SEGOB. ....	24
Tabla 11. Resumen de Información adquirida y procesos de integración al SIG. ....	29
Tabla 12. Calificación de pendiente por rangos porcentuales en el área de estudio. ....	30
Tabla 13. Calificación de exposición por rangos de azimut en el área de estudio. ....	30
Tabla 14. Fuentes de información cartográfica sobre uso de suelo y vegetación. ....	31
Tabla 15. Reportes seleccionados para su integración al SIG Forestal. ....	36
Tabla 16. Principales ventajas y desventajas entre métodos. ....	46
Tabla 17. Valores para definir superficies de segregación en subrodales. ....	47
Tabla 18. Porcentajes de pendiente en la zona de estudio. ....	49
Tabla 19. Matriz de confusión para evaluar la precisión de clasificación. ....	58
Tabla 20. Coeficientes de correlación entre el índice de densidad de Reineke y distintos índices comúnmente utilizados en percepción remota para evaluar la cobertura vegetal. ....	60
Tabla 21. Coeficientes de correlación y $R^2$ entre índices de densidad calculados. ....	60
Tabla 22. Correlación entre parámetros del inventario y valores asociados a cobertura vegetal calculados de la imagen Landsat-ETM+ de 2000. ....	61
Tabla 23. Cambios de cobertura forestal del área de estudio y de subrodales de producción. ....	65
Tabla 24. Cambios de cobertura forestal en subrodales de producción y áreas no manejadas. ....	65
Tabla 25. Superficie en hectáreas por tratamiento para la cuarta anualidad y patrón de densidad 1973-1986-2000. ....	66
Tabla 26. Datos de estaciones meteorológicas ubicadas dentro de la cuenca del Río Baluarte. ....	67
Tabla 27. Datos de la estación hidrométrica "Las Habitas". ....	67
Tabla 28. Porcentajes de escurrimiento por tipo de uso de suelo y pendiente. ....	68
Tabla 29. Evaluación de usos de suelo y vegetación per cápita. ....	77
Tabla 30. Variabilidad de clases dentro de subrodales. ....	82
Tabla 31. Comparación de superficies de cobertura vegetal y uso de suelo. ....	93
Tabla 32. Valores de imagen original. ....	120
Tabla 33. Valores del modelo Lambertian. ....	120
Tabla 34. Valores del modelo No Lambert. ....	121
Tabla 35. Valores del modelo de Smith. ....	122
Tabla 36. Valores del modelo de Civco. ....	123
Tabla 37. Valores del modelo modificado de Civco. ....	124
Tabla 38. Valores comparativos entre clasificaciones. ....	126
Tabla 39. Reportes seleccionados para su integración al SIG Forestal. ....	129
Tabla 40. Topología de subrodales. ....	129
Tabla 41. Información hidrológica. ....	129
Tabla 42. Información para segregaciones. ....	129
Tabla 43. Parámetros del inventario. ....	130

<i>Tabla 44. Información Topográfica. . . . .</i>	<i>130</i>
<i>Tabla 45. Información edafológica. . . . .</i>	<i>130</i>
<i>Tabla 46. Tipificación dasocrática del subrodal. . . . .</i>	<i>131</i>
<i>Tabla 47. Características dasocráticas de Pino. . . . .</i>	<i>131</i>
<i>Tabla 48. Características dasocráticas de Encino. . . . .</i>	<i>131</i>
<i>Tabla 49. Características dasocráticas de Otras Coníferas. . . . .</i>	<i>132</i>
<i>Tabla 50. Características dasocráticas de Otras Hojosas. . . . .</i>	<i>132</i>
<i>Tabla 51. Características dasocráticas de Pino Muerto. . . . .</i>	<i>132</i>
<i>Tabla 52. Incrementos, Densidades y Tratamientos. . . . .</i>	<i>132</i>



UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## **Resumen**

En el ejido Pueblo Nuevo, municipio del mismo nombre, en el Estado de Durango, se aplicaron tecnologías de sistemas de información geográfica y percepción remota para evaluar el desempeño del manejo forestal, cuantificar la superficie de los diferentes tipos de vegetación y uso de suelo, comparar los resultados con el inventario nacional forestal 2000, desarrollar una metodología para la estratificación hasta nivel de subrodal que permita una definición precisa, sencilla y estándar, comparar índices derivados de imágenes de satélite con información de manejo elaborada por los prestadores de servicios técnicos forestales de la región, analizar los cambios de densidad de cobertura forestal desde 1973 al 2000, modelar el impacto a sus cuencas hidrológicas y determinar cuales tratamientos silvícolas generan mayor impacto de deterioro en sus ecosistemas para modificar su aplicación.

## **Summary**

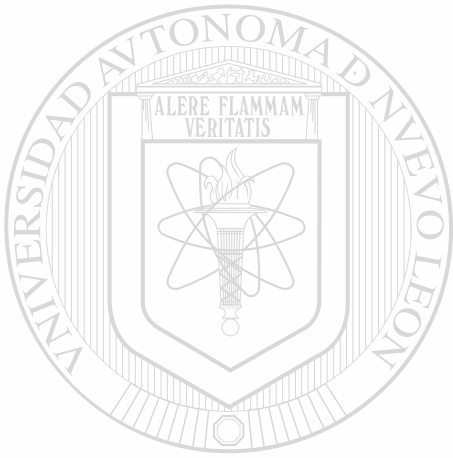
In ejido Pueblo Nuevo, same name municipality, Durango State, we apply remote sensing and geographic information system technology to evaluate the forest management applied, evaluate the land-cover land-use, compare it with the national forest inventory 2000, develop a methodology to stratify at stand level to let us a simple, accuracy and standardized definition, compare satellite images indexes with the forest management information developed by local forest technician services, analyze the forest cover density changes since 1973 to 2000, model it the watershed impact and define which silvicultural treatments generate most detriment impact on its ecosystems to modify its application.



FD  
Z5991  
FCF  
2003  
.66



1020149181



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES  
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



ALTERNATIVAS DE MANEJO FORESTAL  
MEDIANTE EL DESARROLLO DE CONOCIMIENTO  
ESPECÍFICO DE SITIO

TESIS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN  
MANEJO DE RECURSOS NATURALES  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

PRESENTA  
ING. M.C. RENE G. GONZALEZ MURGUIA

LINARES, N. L.

SEPTIEMBRE DEL 2003

976624

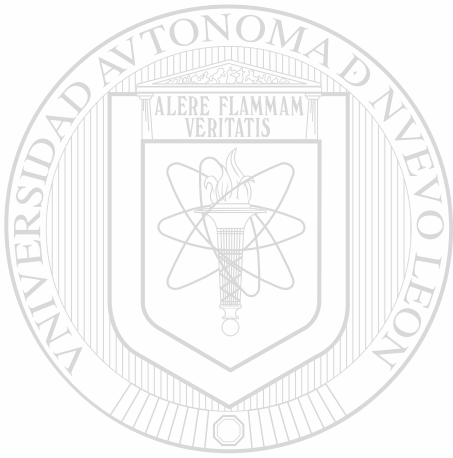
TD

Z5991

FCF

2003

.G6



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

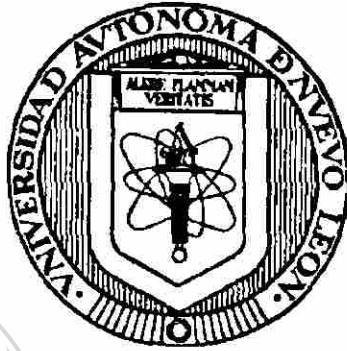
®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



FONDO  
TESIS

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES  
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO**



**ALTERNATIVAS DE MANEJO FORESTAL MEDIANTE EL  
DESARROLLO DE CONOCIMIENTO ESPECÍFICO DE SITIO**

**TESIS**

**PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN MANEJO DE  
DIRECCIÓN DE RECURSOS NATURALES**

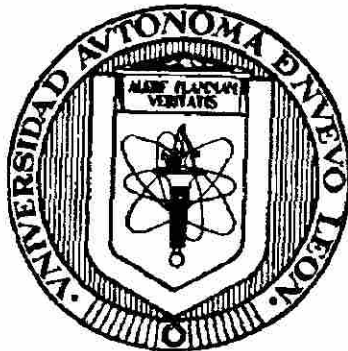
**PRESENTA**

**ING. M.C. RENÉ G. GONZÁLEZ MURGUÍA**

**LINARES, N.L.**

**SEPTIEMBRE DEL 2003.**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**  
**SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO**



**ALTERNATIVAS DE MANEJO FORESTAL MEDIANTE EL  
DESARROLLO DE CONOCIMIENTO ESPECÍFICO DE SITIO**

**TESIS**

**PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN MANEJO DE  
RECURSOS NATURALES**

**PRESENTA**

**ING. M. C. RENÉ G. GONZÁLEZ MURGUÍA**

**COMISIÓN DE TESIS**

**DR. EDUARDO J. TREVIÑO GARZA**  
**DIRECTOR**

**DR. OSCAR A. AGUIRRE CALDERÓN**  
**ASESOR**

**DR. JAVIER JIMÉNEZ PÉREZ**  
**ASESOR**

**DR. ISRAEL CANTÚ SILVA**  
**ASESOR**

**DR. RAHIM FOROUGHBAKHCH POURNAVAB**  
**ASESOR**

## **Dedicatoria**

Este trabajo está dedicado a mi esposa Analsabel Alvarado Ruíz, por todo su amor, paciencia y apoyo en la realización del mismo.

También a mis hijos Hanssel e Ivann González Alvarado como un ejemplo de trabajo y perseverancia en el desarrollo personal.

A mis padres Ángel René González Zatarain y Laura Delia Murguía Zavala como un tributo a su esfuerzo en darnos la mejor preparación.

A la señora María Amparo Ruíz Piña y al Lic. Ricardo Alvarado Ortiz por su constante apoyo en estos años.

## **Agradecimientos**

Mi agradecimiento a la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León por haberme brindado la oportunidad de cursar este grado.

Al Doctor Eduardo Treviño Garza por todo su apoyo, consejos y asesoría académica durante mi estancia en la facultad.

A mis asesores por su tiempo y disponibilidad en el desarrollo del presente documento.

Al Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey por su apoyo y constante impulso al desarrollo de sus miembros.

Al Arquitecto Leonardo Quintanilla Cárdenas por impulsarme y brindarme tantas oportunidades.

A Dios por darme la oportunidad de estar entre ustedes.

La ecuación polinomial de ajuste calculada a partir de los valores NDVI es:

Ecuación de ajuste:  $y = -0.4655 x^2 + 1.2619 x + 0.195$

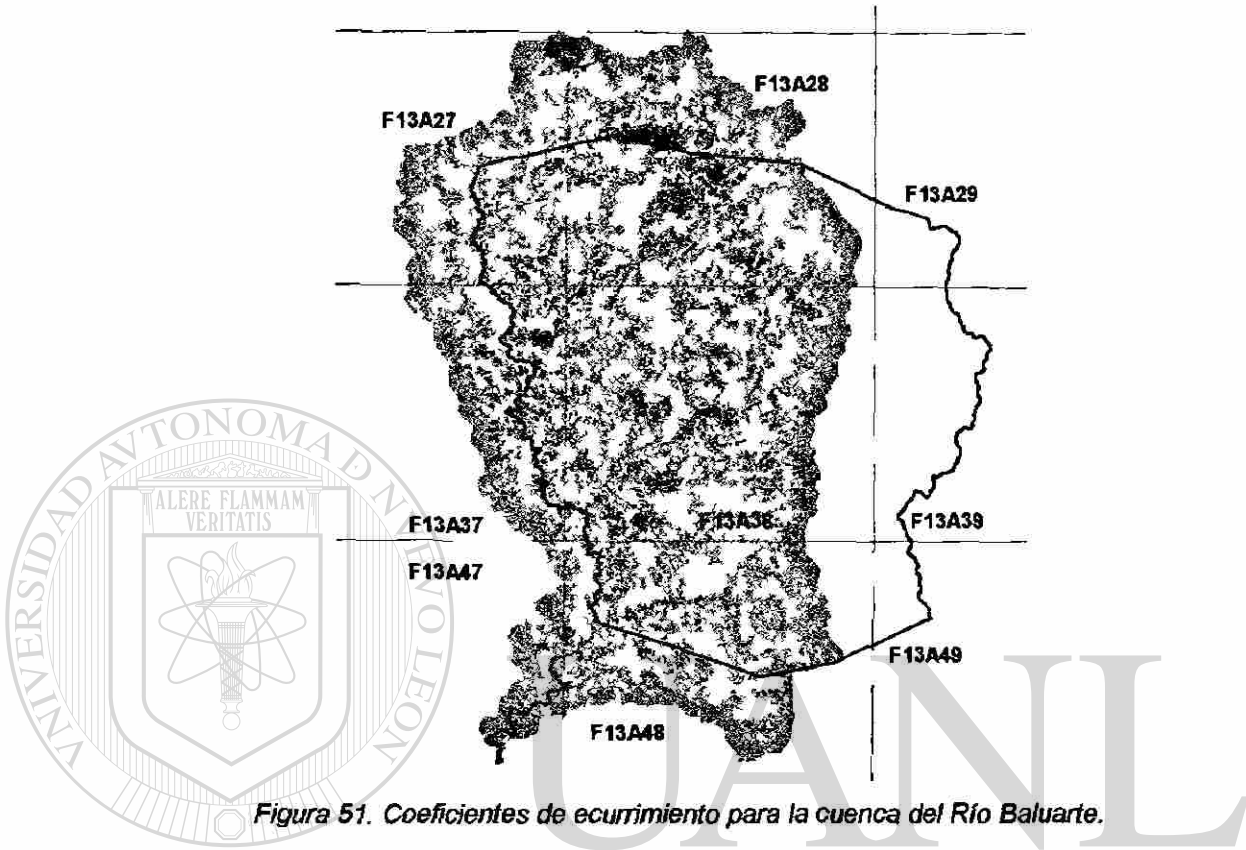


Figura 51. Coeficientes de escurrimiento para la cuenca del Río Baluarte.

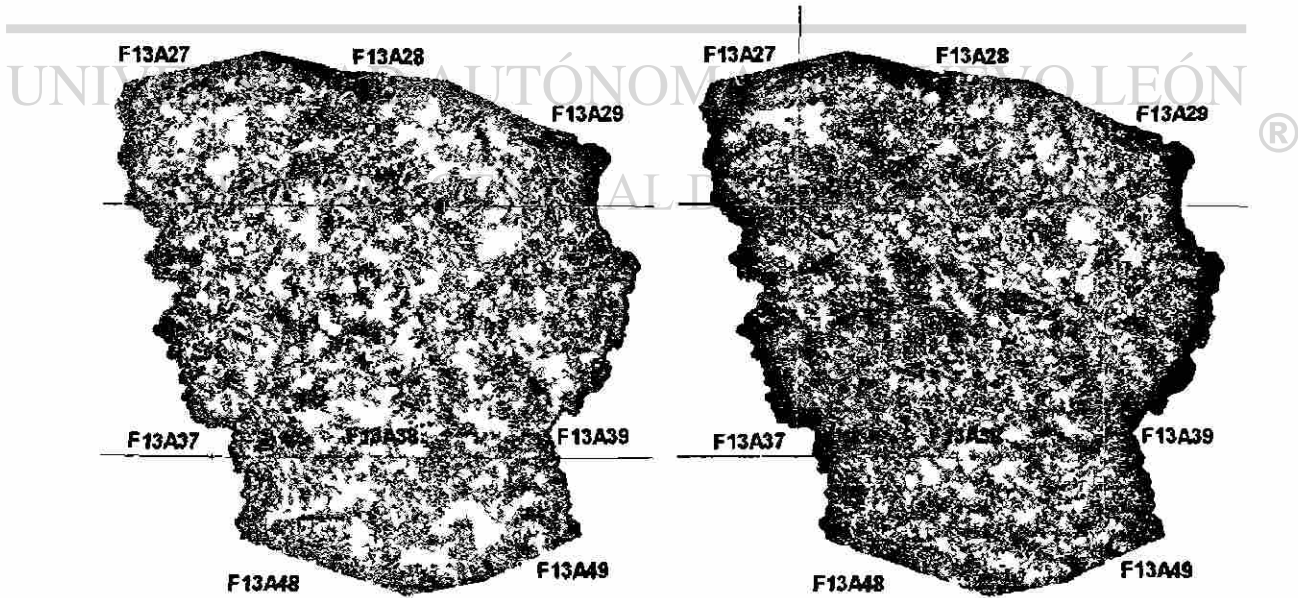


Figura 52. Coeficientes de escurrimiento para el área de estudio 1973 y 2000.



<b>Contenido</b>	<b>Página</b>
Resumen. . . . .	i
1. Introducción. . . . .	1
1.1. Objetivo general. . . . .	3
1.2. Objetivos particulares . . . . .	3
1.3. Hipótesis . . . . .	3
2. Antecedentes. . . . .	4
3. Área de estudio. . . . .	14
3.1. Fisiografía . . . . .	14
3.2. Geología . . . . .	14
3.3. Edafología . . . . .	15
3.4. Climas . . . . .	16
3.5. Precipitación y Temperatura . . . . .	18
3.6. Hidrología. . . . .	19
3.7. Uso de suelo y vegetación. . . . .	19
3.8. Aspectos socioeconómicos. . . . .	21
4. Materiales y métodos. . . . .	26
4.1. Infraestructura utilizada. . . . .	26
4.2. Definición del polígono del predio y zona de estudio. . . . .	26
4.3. Definición de <i>proyección geográfica</i> . . . . .	26
4.4. Adquisición y captura de información. . . . .	27
4.5. Información derivada de procesar la información adquirida. . . . .	28
4.6. Evaluación de la cobertura vegetal mediante percepción remota. . . . .	30
4.6.1. Procesamiento de imágenes Landsat. . . . .	33
4.6.2. Integración de información dasocrática existente. . . . .	35
4.6.3. Selección de áreas para muestreo de campo. . . . .	36
4.6.4. Firmas espectrales y validación. . . . .	37
4.6.5. Clasificación de imagen Landsat-ETM+ 2000. . . . .	38
4.7. Estimación de densidad de la masa forestal. . . . .	39
4.8. Análisis de la dinámica regional y sus impactos. . . . .	39
4.8.1. Evaluación multitemporal. . . . .	39
4.8.2. Modificación de escurrimientos por deterioro de la cobertura forestal. . . . .	41
4.8.3. Análisis de distribución de la población y sus actividades respecto a la problemática se subcuencas en el ejido Pueblo Nuevo. . . . .	45
4.9. Modelo de estratificación de la masa forestal (rodalización) . . . . .	45
4.9.1. Definición de zonas de protección dentro del subrodal (segregación). . . . .	47

---

4.10. Integración de información modelada a la dasocrática existente. . . . .	47
5. Resultados. . . . .	49
5.1. Modelo Digital de Elevación . . . . .	49
5.2. Pendiente. . . . .	49
5.3. Exposición. . . . .	50
5.4. Determinación de la cobertura forestal actual. . . . .	51
5.4.1. Procesamiento de imágenes Landsat. . . . .	52
5.4.2. Integración de información dasocrática existente. . . . .	53
5.4.3. Selección de áreas para muestreo de campo. . . . .	54
5.4.4. Firmas espectrales y validación. . . . .	55
5.4.5. Clasificación de imagen Landsat-ETM+ 2000. . . . .	56
5.5. Estimación de densidad de la masa forestal. . . . .	59
5.6. Evaluación multitemporal. . . . .	63
5.7. Modificación de escurrimientos por deterioro de la cobertura forestal. . . . .	67
5.8. Análisis de distribución de la población y sus actividades respecto a la problemática de subcuencas en el ejido Pueblo Nuevo. . . . .	74
5.9. Modelo de estratificación de la masa forestal (rodalización). . . . .	78
5.9.1. Definición de zonas de protección dentro del subrodal (segregación). . . . .	83
5.10. Integración de información modelada a la dasocrática existente. . . . .	84
6. Discusión. . . . .	91
7. Conclusión. . . . .	98
8. Bibliografía. . . . .	102
Anexo I. Normalización Topográfica. . . . .	110
Anexo II. Integración de Información Dasocrática. . . . .	127
Anexo III. Métodos alternos para evaluación de Cobertura Vegetal. . . . .	133
Anexo IV. Modelación Hidrológica. . . . .	143

---

## Índice de Figuras

Página

Figura 1. Diagrama de planeación forestal del ejido Pueblo Nuevo 1997-2007. ....	13
Figura 2. Ubicación del área de estudio. ....	14
Figura 3. Geología estratigráfica y estructural de área de estudio. ....	15
Figura 4. Edafología del área de estudio. ....	16
Figura 5. Distribución de tipos climáticos en el área de estudio. ....	17
Figura 6. Distribución de la Precipitación media anual en la zona de estudio. ....	18
Figura 7. Distribución de la Temperaturas media anual en la zona de estudio. ....	18
Figura 8. Diagrama climático de Walter para la estación meteorológica de El Salto, Durango. .	19
Figura 9. Principales Cauces y área de captación en la zona de estudio. ....	20
Figura 10. Tipos de Uso de Suelo y Vegetación del Inventario Nacional Forestal 2000 en la zona de estudio. ....	20
Figura 11. Localidades e infraestructura de caminos, brechas y veredas. ....	24
Figura 12. Grado de Marginación por localidad en el Estado de Durango y otros Estados colindantes. ....	25
Figura 13. Polígono del área de estudio, definición de zona de estudio y localización de cartas 1:50,000 de INEGI. ....	27
Figura 14. Esquema de procesos desarrollados de la presente investigación. ....	48
Figura 15. Modelo Digital de Elevación de la zona de estudio. ....	49
Figura 16. Distribución de la pendiente en la zona de estudio. ....	50
Figura 17. Distribución de exposiciones en la zona de estudio. ....	50
Figura 18. Imagen Landsat-TM Original, composición de falso color TM4-R, TM5-V, TM3-A. ....	51
Figura 19. Imagen Landsat-Panromática Original. ....	51
Figura 20. Imagen Landsat-ETM+ remuestreada composición de falso color TM4-R, TM5-V, TM3-A. ....	52
Figura 21. Modelo de iluminación. ....	52
Figura 22. Imagen landsat-ETM+ remuestreada y normalizada. ....	53
Figura 23. Cobertura digital de la información dasocrática de rodales. ....	53
Figura 24. Cobertura digital de la información dasocrática de subrodales. ....	54
Figura 25. Ubicación de las 62 zonas de muestreo para la definición de polígonos de entrenamiento. ....	54
Figura 26. Patrón digital para cada tipo de vegetación del clima Templado. ....	55
Figura 27. Patrón digital para cada tipo de vegetación del grupo de clima Cálido. ....	55
Figura 28. Patrón digital para otros tipos de vegetación y usos de suelo. ....	56
Figura 29. Clasificación de tipos de vegetación y usos de suelo, según Inventario Nacional Forestal 2000. ....	57
Figura 30. Clasificación de tipos de vegetación y usos de suelo para el ejido Pueblo Nuevo. ....	57
Figura 31. Densidad con NDVI. ....	59
Figura 32. Densidad con PCA2. ....	59
Figura 33. Densidad con Tasseled Cap. ....	59
Figura 34. Tipos de vegetación y su densidad. ....	60
Figura 35. Correlación entre valores de índice de sitio y NDVI promedio para cada subrodal. ....	61
Figura 36. Comparación entre índice de sitio e índice de diferencia normalizada de vegetación para la cuarta anualidad por tratamiento a aplicar. ....	62
Figura 37. Comparación entre cobertura de copas e índice de diferencia normalizada de vegetación para la cuarta anualidad por tratamiento a aplicar. ....	62
Figura 38. Landsat-MSS 1973. ....	63
Figura 39. Landsat-MSS 1986. ....	63
Figura 40. Landsat-TM 2000. ....	63
Figura 41. NDVI 1973 (Azul). ....	63
Figura 42. NDVI 1986 (Verde). ....	63

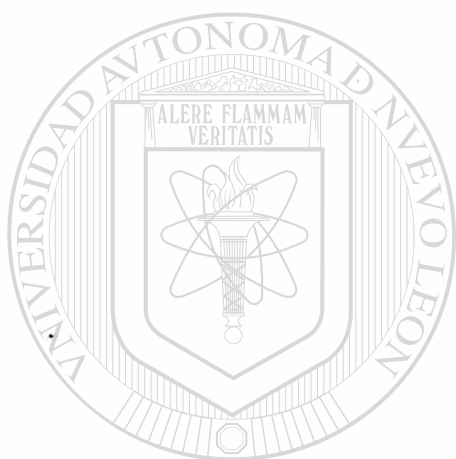
Figura 43. NDVI 2000 (Rojo).	63
Figura 44. Imagen que integra los 3 NDVI's para el análisis multitemporal.	63
Figura 45 Esquema para la interpretación colorimétrica de la imagen compuesta por NDVI's, basada en la densidad de cobertura forestal entre fechas de escenas.	64
Figura 46. Cambios de cobertura forestal experimentada en el área de estudio y subrodas de producción.	65
Figura 47. Comparación porcentual del cambio de cobertura forestal en subrodas de producción y áreas no manejadas.	66
Figura 48. Comparación porcentual de la superficie por tratamiento para la cuarta anualidad y patrón de densidad 1973-1986-2000.	66
Figura 49. Cuenca del Río Baluarte, estaciones meteorológicas e hidrométrica ubicadas dentro de la cuenca, principales escurrimientos y límite del área de estudio.	67
Figura 50. Modelo de distribución de precipitación media anual en el área de estudio.	68
Figura 51. Coeficientes de escurrimiento para la cuenca del Río Baluarte.	69
Figura 52. Coeficientes de escurrimiento para el área de estudio 1973 y 2000.	69
Figura 53. Cauces digitalizados comparados contra modelados escala 1:250,000.	70
Figura 54. Cauces digitalizados comparados contra modelados escala 1:50,000.	70
Figura 55. Definición de submicrocuencas del modelado hidrológico comparado contra información hidrológica de áreas de captación del ejido Pueblo Nuevo.	71
Figura 56. Longitud de flujos para las dos subcuencas del área de estudio.	71
Figura 57. Hidrogramas 1973-2000 para la cuenca del Río Baluarte.	72
Figura 58. Hidrogramas 1973-2000 para la cuenca del Río San Diego.	72
Figura 59. Grado de deterioro expresado en cambio porcentual de escurrimiento.	73
Figura 60. Categorías de riesgo hidrológico por submicrocuenca.	73
Figura 61. Distribución de localidades y total de población respecto al deterioro de submicrocuencas.	74
Figura 62. Establecimiento de áreas agrícolas en zonas forestales (Río Baluarte).	75
Figura 63. Establecimiento de áreas agrícolas en zonas forestales (Río San Diego).	75
Figura 64. Riesgo de submicrocuencas y crecimiento de localidades en 5 años.	76
Figura 65. Información vectorial digital de submicrocuencas modeladas.	78
Figura 66. Tipos de vegetación y exposición en porcentajes.	78
Figura 67. Comparación de rodales actuales y exposiciones de 8 y 2 clases (NW-SE).	79
Figura 68. Información vectorial digital de exposición preferencial.	79
Figura 69. Integración de los dos criterios y generación de los Rodales modelados.	80
Figura 70. Rodales actuales.	80
Figura 71. Rodales modelados.	80
Figura 72. Sobreposición de Rodales actuales y modelados.	81
Figura 73 Integración de los dos criterios y generación de los Subrodas modelados.	82
Figura 74. Subrodas digitalizados, sobre imagen Landsat-ETM+.	83
Figura 75. Subrodas digitalizados, sobre clasificación.	83
Figura 76. Subrodas modelados, sobre imagen Landsat-ETM+.	83
Figura 77. Subrodas modelados, sobre clasificación.	83
Figura 78. Vías de comunicación y transmisión.	84
Figura 79. Cauces.	84
Figura 80. Cartografía dasocrática existente.	84
Figura 81. Información digital generada.	84
Figura 82. Distribución altitudinal porcentual de tipos de vegetación y uso de suelo.	85
Figura 83. Clasificación de tipos de vegetación y usos de suelo, según Inventario Nacional Forestal 2000, curva de nivel de los 1,400 m.s.n.m. en negro, e isoterma media anual de los 18°C en rojo.	85
Figura 84. Distribución de las especies del género Pinus en subrodas de producción.	86
Figura 85. Distribución de Otras Coníferas en subrodas de producción.	86
Figura 86. Distribución de Pinus cooperii en subrodas de producción.	87
Figura 87. Distribución de Pinus durangensis en subrodas de producción.	87
Figura 88. Distribución de Pinus teocote en subrodas de producción.	87

## Índice de Tablas

Página

Tabla 1. Superficie forestal nacional según Anuarios Estadísticos. ....	11
Tabla 2. Tipos de suelo en el área de estudio. ....	16
Tabla 3. Descripción de los tipos climáticos (clasificación climática de Koppen, modificado por E. García, 1964) presentes en la zona de estudio. ....	17
Tabla 4. Superficie por tipo de vegetación o uso de suelo en el área de estudio, según Inventario Nacional Forestal 2000. SEMARNAT. ....	21
Tabla 5. Variables demográficas. ....	22
Tabla 6. Distribución de la Población Económicamente Activa según SEGOB. ....	22
Tabla 7. Distribución de la Población Económicamente Activa según INEGI. ....	22
Tabla 8. Comparación de indicadores promedio para el Estado y Municipio. ....	23
Tabla 9. Infraestructura educativa Municipal. ....	23
Tabla 10. Indicadores relevantes SEGOB. ....	24
Tabla 11. Resumen de Información adquirida y procesos de integración al SIG. ....	29
Tabla 12. Calificación de pendiente por rangos porcentuales en el área de estudio. ....	30
Tabla 13. Calificación de exposición por rangos de azimut en el área de estudio. ....	30
Tabla 14. Fuentes de información cartográfica sobre uso de suelo y vegetación. ....	31
Tabla 15. Reportes seleccionados para su integración al SIG Forestal. ....	36
Tabla 16. Principales ventajas y desventajas entre métodos. ....	46
Tabla 17. Valores para definir superficies de segregación en subrodales. ....	47
Tabla 18. Porcentajes de pendiente en la zona de estudio. ....	49
Tabla 19. Matriz de confusión para evaluar la precisión de clasificación. ....	58
Tabla 20. Coeficientes de correlación entre el índice de densidad de Reineke y distintos índices comúnmente utilizados en percepción remota para evaluar la cobertura vegetal. ....	60
Tabla 21. Coeficientes de correlación y $R^2$ entre índices de densidad calculados. ....	60
Tabla 22. Correlación entre parámetros del inventario y valores asociados a cobertura vegetal calculados de la imagen Landsat-ETM+ de 2000. ....	61
Tabla 23. Cambios de cobertura forestal del área de estudio y de subrodales de producción. ....	65
Tabla 24. Cambios de cobertura forestal en subrodales de producción y áreas no manejadas. ....	65
Tabla 25. Superficie en hectáreas por tratamiento para la cuarta anualidad y patrón de densidad 1973-1986-2000. ....	66
Tabla 26. Datos de estaciones meteorológicas ubicadas dentro de la cuenca del Río Baluarte. ....	67
Tabla 27. Datos de la estación hidrométrica "Las Habitas". ....	67
Tabla 28. Porcentajes de escurrimiento por tipo de uso de suelo y pendiente. ....	68
Tabla 29. Evaluación de usos de suelo y vegetación per cápita. ....	77
Tabla 30. Variabilidad de clases dentro de subrodales. ....	82
Tabla 31. Comparación de superficies de cobertura vegetal y uso de suelo. ....	93
Tabla 32. Valores de imagen original. ....	120
Tabla 33. Valores del modelo Lambertian. ....	120
Tabla 34. Valores del modelo No Lambert. ....	121
Tabla 35. Valores del modelo de Smith. ....	122
Tabla 36. Valores del modelo de Civco. ....	123
Tabla 37. Valores del modelo modificado de Civco. ....	124
Tabla 38. Valores comparativos entre clasificaciones. ....	126
Tabla 39. Reportes seleccionados para su integración al SIG Forestal. ....	129
Tabla 40. Topología de subrodales. ....	129
Tabla 41. Información hidrológica. ....	129
Tabla 42. Información para segregaciones. ....	129
Tabla 43. Parámetros del inventario. ....	130

<i>Tabla 44. Información Topográfica. . . . .</i>	<i>130</i>
<i>Tabla 45. Información edafológica. . . . .</i>	<i>130</i>
<i>Tabla 46. Tipificación dasocrática del subrodal. . . . .</i>	<i>131</i>
<i>Tabla 47. Características dasocráticas de Pino. . . . .</i>	<i>131</i>
<i>Tabla 48. Características dasocráticas de Encino. . . . .</i>	<i>131</i>
<i>Tabla 49. Características dasocráticas de Otras Coníferas. . . . .</i>	<i>132</i>
<i>Tabla 50. Características dasocráticas de Otras Hojosas. . . . .</i>	<i>132</i>
<i>Tabla 51. Características dasocráticas de Pino Muerto. . . . .</i>	<i>132</i>
<i>Tabla 52. Incrementos, Densidades y Tratamientos. . . . .</i>	<i>132</i>



UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## **Resumen**

En el ejido Pueblo Nuevo, municipio del mismo nombre, en el Estado de Durango, se aplicaron tecnologías de sistemas de información geográfica y percepción remota para evaluar el desempeño del manejo forestal, cuantificar la superficie de los diferentes tipos de vegetación y uso de suelo, comparar los resultados con el inventario nacional forestal 2000, desarrollar una metodología para la estratificación hasta nivel de subrodal que permita una definición precisa, sencilla y estándar, comparar índices derivados de imágenes de satélite con información de manejo elaborada por los prestadores de servicios técnicos forestales de la región, analizar los cambios de densidad de cobertura forestal desde 1973 al 2000, modelar el impacto a sus cuencas hidrológicas y determinar cuales tratamientos silvícolas generan mayor impacto de deterioro en sus ecosistemas para modificar su aplicación.

## **Summary**

In ejido Pueblo Nuevo, same name municipality, Durango State, we apply remote sensing and geographic information system technology to evaluate the forest management applied, evaluate the land-cover land-use, compare it with the national forest inventory 2000, develop a methodology to stratify at stand level to let us a simple, accuracy and standardized definition, compare satellite images indexes with the forest management information developed by local forest technician services, analyze the forest cover density changes since 1973 to 2000, model it the watershed impact and define which silvicultural treatments generate most detriment impact on its ecosystems to modify its application.

## 1. Introducción

La evolución histórica del manejo forestal ha sido determinada por el tipo de uso, aprovechamiento y enfoque administrativo aplicado por las diferentes culturas, principalmente a partir de las experiencias europeas, las cuales desarrollaron una dasonomía científica con métodos de medición y modelos matemáticos que definen la productividad de las masas forestales, a partir de inventarios, para estructurar una correcta planeación de los aprovechamientos (Mendoza, 1993).

La tendencia de crecimiento demográfico, la demanda de recursos naturales y su sobreexplotación registrados desde la segunda mitad de siglo XX hasta la actualidad, resultado de la orientación mecanicista hacia la industria maderera, con planes para el flujo sostenido de materia prima, la simplificación de sistemas y el mantenimiento el estado de los rodales, deja como lección clave, el tener cuidado en la aplicación de simples fórmulas sobre amplias áreas de forma genérica. De manera frecuente se tiene una tendencia práctica a encontrar una estrategia que trabaja en un lugar y aplicarla extensamente en otras áreas, como ejemplo de ello existe la aplicación de tratamientos silvícolas y/o plantaciones, cuyos resultados son bosques fragmentados, en los cuales las especies nativas son desplazadas y la capacidad productiva de muchos sitios ha sido deteriorada (Kohm et al. 1997).

*Un profesionalista forestal que trabajó mucho tiempo en oficinas centrales de la Subsecretaría Forestal y de la Fauna citó en una ocasión, "Las políticas de manejo y métodos de tratamiento silvícola que se establecen por oficinas centrales, parten del promedio de las condiciones en las que se encuentran las áreas forestales en México,.... el problema es que ese promedio no existe en ninguna parte" (conversación personal).*

El resultado más importante de las investigaciones sobre ecología de bosques ha sido la apreciación de la complejidad de estos y la limitación de nuestros conocimientos. Empezamos a apreciar que cada prescripción de manejo es una hipótesis trabajando cuyo resultado no es enteramente predecible. Es necesario por lo tanto que científicos, técnicos e inversionistas,



tomen en cuenta las características naturales de cada rodal y unidad de paisaje en el bosque, así como las limitaciones de las teorías generales.

El entendimiento de la dinámica ecológica de un sitio y la confección de estrategias de manejo apropiadas requerirán más información local sobre datos históricos del sitio, condiciones económicas, ambientales, sociales, regímenes de disturbio, dinámica de comunidades, y requerimientos de hábitat por las especies.

La integración del conocimiento de grandes escalas espaciales y temporales con el nivel de detalle adecuado, es uno de los mayores desafíos del siglo XXI. Afortunadamente, nuevas y poderosas herramientas han emergido en el momento preciso. Un ejemplo de ello son los Sistemas de Información Geográfica (SIG), que permiten manejar gran cantidad de datos espaciales y los avances en esta tecnología permiten el manejo (elaboración, actualización, distribución) y uso de información de forma fácil y accesible.

La mayor fuente de datos espaciales está constituida por imágenes de sensores remotos, su respectivo desarrollo ha mejorando sus capacidades espaciales y espectrales, así como nuevos modelos de análisis, aunado a los sistemas de posicionamiento global (SPG), proveen de mayor precisión de localización en el terreno. Facilitando a partir de esta información, evaluaciones y el planteamiento de estrategias alternativas de manejo.

Actualmente, debido a la magnitud e importancia de los recursos forestales en la conservación de los ecosistemas, se ha hecho indispensable el uso de nuevas tecnologías de análisis geográfico como herramienta de apoyo en la planeación, ejecución e integración de inventarios, análisis ecológico, silvícola y socioeconómico, en la formulación de programas de manejo forestal.

Como corolario del reconocimiento de la complejidad de los ecosistemas, es necesario **el desarrollo del conocimiento específico de sitio** de la superficie a administrar, aportando bases más sólidas para la planeación y prescripción del manejo.

### **1.1. Objetivo General**

Proponer alternativas de manejo basándose en los factores del medio físico, condición silvícola actual, capacidad productiva y el impacto al que han estado sujetos los ecosistemas forestales del ejido Pueblo Nuevo.

### **1.2. Objetivos Particulares**

1. Elaborar un SIG de los factores del medio físico e información dasocrática.
2. Definir el mejor método de normalización topográfica a utilizar.
3. Generar información de la composición de comunidades vegetales y sus diferentes densidades.
4. Analizar el efecto de los factores del medio físico en la distribución de la vegetación.
5. Establecer una metodología para modelar y crear la división dasocrática de zonas forestales hasta nivel de subrodal (estratificación automatizada).
6. Evaluar la posible relación entre densidades modeladas y variables dasocráticas.
7. Evaluar el efecto de tratamientos de anualidades anteriores y estado actual, contra factores del medio físico.
8. Estimar el impacto de las actividades silvícolas en las cuencas hidrológicas dentro del ejido Pueblo Nuevo.

### **1.3. Hipótesis**

- H1. El análisis de la información mediante modelos geoespaciales, permite explicar las interrelaciones de la masa forestal con su entorno.
- H2. La generación de modelos geoespaciales permite la adecuada valoración de cada área específica permitiendo proponer adecuaciones a los planes de manejo.

## 2. Antecedentes

A lo largo de la historia, el manejo forestal se ha manifestado bajo diversos enfoques. Sus inicios se atribuyen a los pueblos galos y germánicos quienes desarrollaron estilos de vida ligados al bosque. Para el Imperio Romano las áreas forestales no tenían valor pues en ellas no podía desarrollarse la vida civilizada, con su caída, dichos terrenos pasaron a manos de la corona y del clero, para su aprovechamiento se establecieron reglas y fueron conocidas como *servidumbres*, así como su conservación tenía el objetivo de proveer recursos alimenticios y fauna para actividades cinegéticas de los nobles (Mendoza, 1993).

En 1066 se estableció la primer legislación forestal denominada "*Constituciones de foresta*" por el rey Canute de Inglaterra, posteriormente complementadas por Guillermo I, las cuales buscaban la permanencia de una cubierta forestal que permitiera el libre tránsito de la fauna cinegética y protegiera su hábitat. Corrientes similares de manejo forestal se dieron en Francia (Mendoza, 1993).

Durante la edad media, la madera se convirtió en un material estratégico, en especial para propósitos de construcción naval, por lo que se cosechaba en gran cantidad. Luego, en tiempos de paz, ante perspectivas de nuevos conflictos, los gobiernos se esforzaban en reforestar los bosques talados, en consecuencia se registró una prolongada sucesión de ciclos de explotación y reforestación (James, 1981).

En Francia los antecedentes más antiguos son las ordenanzas de 1280, 1318 y 1346, en donde se establecía un cuerpo de grandes maestros forestales los cuales eran los encargados del manejo, protección y permanencia del recurso. Carlos V en 1376, estableció la ordenanza de Melun, la cual se mantuvo vigente hasta 1669, es la materialización de la experiencia francesa, la cual establecía:

- a) Los propietarios de bosques habrán de limitarse a cosechar una cantidad de madera que permita un rendimiento continuo y que no dañe la capacidad productiva del bosque.
- b) El control de cortas en monte alto se hará en áreas entre 10 y 15 hectáreas. La ubicación de dichas áreas queda a cargo de los maestros forestales.
- c) Las áreas de corta deberán tener límites claramente definidos, y las esquinas deberán estar señaladas por árboles marcados tanto en su base como a la altura del pecho

- d) Las áreas de corta deben permanecer cercadas
- e) Habrán de dejarse entre 15 y 20 árboles semilleros por hectáreas, tanto en monte bajo como en monte alto.

Este tipo de manejo se aplicó en áreas planas o de poca pendiente y creó las bases del tratamiento de corta de regeneración y corta de liberación de hoy en día, su avance en la aplicación duró hasta el siglo XVIII cuando se incorporaron los bosques de terrenos accidentados de pendientes moderadas a fuertes, los cuales motivaron la explotación selectiva, base de los tratamientos de selección (Mendoza, 1993).

En un esfuerzo por reglamentar la silvicultura Eduardo IV de Inglaterra establece en su acta de 1482 el cercado de las áreas de corta para favorecer a la regeneración que pudiera aparecer. Posteriormente en 1543 Enrique VIII promulgó el Acta de Preservación de los Bosques, la cual hace obligatorio el cercado de áreas de corta, evitar el pastoreo, la selección de árboles semilleros para regeneración, la asignación de turnos y diámetros mínimos (Osmaston, 1968).

Entre los avances técnicos franceses del siglo XVI se puede señalar:

- a) La definición precisa de árboles semilleros.
- b) El uso de tratamientos de preparación de suelos.
- c) Prácticas avanzadas de fomentar la regeneración natural.
- d) Complementación de la regeneración natural.
- e) Ejecución de limpiezas cada diez años (aclareos).
- f) Prácticas de cortas de mejoramiento y saneamiento.

En 1669 se promulgó una nueva ordenanza, a iniciativa de Jean Baptiste Colbert, ministro de finanzas de Luis XIV, la cual establecía el requerimiento de una autorización oficial para todo tipo de cortas, se especificará la ubicación, extensión y tratamiento, restringiendo el pastoreo. Esta ordenanza marcó la necesidad de elaborar planes formales de manejo forestal y de que la ejecución de los aprovechamientos sea supervisada por el Estado (Mendoza, 1993).

Mientras que en las primeras etapas históricas del manejo forestal se presentó una insistencia del Estado por la administración que permita la

permanencia del bosque, durante la revolución industrial esta idea de persistencia del recurso se transformó en el concepto de rendimiento sostenido, y para ello parecen haber coincidido tres circunstancias:

1.- El crecimiento demográfico y las constantes guerras causaron una escasez del recurso forestal en Europa, la cual generó políticas a favor de la reglamentación de los aprovechamientos. La idea del rendimiento sostenido se utilizó como lema político para transmitir un mensaje simple y de fácil aceptación sobre la extracción continua, no declinante y máxima del recurso. Para el Estado, el máximo rendimiento sostenido no era un fin en sí mismo, sino un medio para implementar una política de persistencia del recurso forestal.

2.- La fundación de las primeras escuelas forestales, marcó el inicio del manejo forestal como una disciplina científica, y con ello el deseo de encontrar patrones sistemáticos de producción que fueran aplicables a la administración del bosque. En todas las escuelas se consideró al bosque normal y al máximo rendimiento sostenido como objetivos fundamentales del manejo forestal.

3.- Según Lee (1982), también influyó el carácter del pueblo alemán conocido como amante del orden, el cual aportó una visión mecanicista de la realidad, ordenando el "desorden natural" para crear una línea de producción de madera con ritmo eficiente y regular.

## DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Respecto al desarrollo de la silvicultura, éste se caracterizó por la implementación de diferentes métodos de tratamiento creados o modificados en base a los resultados registrados de intervenciones anteriores, tales como el método de cortas sucesivas o de protección, propuesto por G.L. Harting Alemania en 1700. También durante ese periodo se aplicó el método de árboles semilleros, el cual tuvo algunos reveses, pues con frecuencia se perdía la regeneración cuando los semilleros eran derribados por viento o nieve, para lo cual se hicieron modificaciones a su aplicación. Para las prácticas de aclareos, a pesar de haberse aplicado en la antigüedad, el inicio de su desarrollo científico se establece en los escritos de Cotta a principios del siglo XIX y los primeros

experimentos de trascendencia fueron realizados hasta 1860 en Alemania (Mendoza, 1993).

En 1817 se establecieron grandes plantaciones coetáneas de especies exóticas de altos rendimientos financieros, las cuales sufrieron daños por plagas, enfermedades y viento. Esta experiencia creó la necesidad del desarrollo de técnicas de manejo incoetáneo, orientadas a fomentar condiciones de bosque ecológicamente estables vía el cultivo de masa de especies y edades mezcladas. Así aparece el método de selección en grupos, propuesto por Kart Gayer en 1880, el sistema de matarrasa en fajas desarrollado por Wagner y Eifert, el sistema silvícola de selección creado por Gurnaud y Biolley en Suiza y el sistema de protección irregular de Baden en Babaria.

Gurnaud y Biolley pugnaron por una silvicultura experimental que tuviera bases ecológicas sólidas y que reconociera el carácter único de cada situación forestal.

La tendencia ecológica en la silvicultura también se manifestó en los sistemas coetáneos, en el método de manejo por rodal, propuesto por Judeich en 1862. Según este método la cosecha de rodales coetáneos debe programarse con base en su edad, pero influyendo también sus situación sanitaria, su inventario de existencias de productos comerciales, sus metas de regulación y su accesibilidad. Así mismo los trabajos de Bollem en 1740 con el método de regulación por volumen (Osmaston, 1968), el cual propone aprovechamientos anuales de igual volumen distribuidos a lo largo del turno. Posteriormente Hartig en 1795 como resultado de frecuentes fallas en el establecimiento de la regeneración, modifica el método de regulación por volumen y propone evitar que áreas de corta de años sucesivos estuvieran contiguas y el avance del frente de corta fuera perpendicular al viento dominante, con el objetivo de disponer de fuentes alternas de semilla para la regeneración.

En 1820 Cotta mejora la propuesta de Hartig al incluir el elemento de calidad de estación y simplificando los cálculos de posibilidad sustituyendo el control de volúmenes por el de áreas.

El reconocimiento de la dasonomía como disciplina científica se debe al interés por desarrollar modelos matemáticos que definan al bosque meta. El primer antecedente parece ser el método austriaco de manejo de 1788, desarrollado para estimar el pago de impuestos prediales forestales, el cual intentaba definir matemáticamente la productividad potencial del bosque mediante relaciones entre existencias, incremento y posibilidad. Proponía una secuencia proporcionada de rodales de todas las edades. (Osmaston, 1968).

Durante el siglo XIX y la primera mitad del siglo XX abundaron publicaciones relativas a modelos matemáticos que definían el ideal estado de normalidad, sus características silvícolas de rendimiento y de manejo a nivel bosque, los cuales constituyeron la base de modelos de cálculo de posibilidad, regulación de cortas y división dasocrática del terreno (Mendoza, 1993).

El carácter industrial de la actividad forestal se debe a la consideración de variables financieras en el manejo. Según Max Robert Pressler (inventor del taladro para medir edades e incrementos), debería de abandonarse la idea del bosque normal y considerar a cada rodal como una inversión independiente de los demás rodales, liquidándolo cuando mostrara no rendir más allá de una tasa de retorno mínimo aceptable. Junto con Koenig fomentaron los aclareos para mejorar el rendimiento financiero del cultivo (James, 1981).

Un ejemplo de ello se encuentra en Davis 1966, donde se compara la diferencia de significados del manejo forestal, según Roth 1925, la meta del manejo forestal era el "construir, ordenar y mantener en orden un negocio forestal", en cambio para la Asociación de Forestales Americanos en 1958, definen al manejo forestal como "La aplicación de métodos de negocios y principios de técnica forestal para la operación de una propiedad forestal".

Los cambios en la actividad forestal durante el siglo XX han sido numerosos, sin embargo, las bases fundamentales del manejo forestal parecen continuar prácticamente sin alteración. Los avances logrados se centran en métodos de trabajo (regeneración, extracción, medición, inventarios, herramientas y equipos, etc.), mas sin embargo no se ha resuelto la controversia entre productividad y estabilidad ecológica (Mendoza, 1993).

Actualmente en México, la Nueva Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (25 de mayo 2003), título primero, capítulo I, artículo 3° bis, define el manejo forestal como "*el conjunto de acciones y procedimientos que tienen por objeto el cultivo, protección, conservación restauración o aprovechamiento de los recursos forestales, de tal manera que se respete la integridad funcional y las capacidades de carga de los ecosistemas a los que se integran*".

Entre los primeros trabajos a nivel internacional que impulsan el uso de SIG en el manejo forestal, se tienen los de Jordan en 1992, el cual sugiere guías para la investigación y desarrollo del potencial de los SIG en el manejo forestal, incluyendo diseño de manejo de bosques, implementación de inventarios, y estudios sobre la respuesta del bosque a sus intervenciones. Entre las primeras aplicaciones tenemos a Congalton *et al.* (1993), quienes utilizan imágenes Landsat-TM para producir bases de datos y mapas de bosques de coníferas de viejo crecimiento, así como la producción potencial de madera. El trabajo de Fiorella (1993), utiliza imágenes Landsat-TM para desarrollar una clasificación de estados sucesionales forestales que pueden ser integrados a un SIG. Posteriormente en 1995, Brownlie y Terlesk utilizan los SIG para combinar fotografías aéreas y datos de campo de las áreas de aprovechamiento para identificar y cuantificar los disturbios causados al suelo. Una de las primeras estimaciones de área basal fue desarrollada por Coulombe y Lowell (1995), quienes analizaron la factibilidad de estimación de área basal mediante la relación entre medidas de campo con algunas variables ecofisiográficas en un modelo de regresión usando un SIG.

Jordan y Wardoyo (1996) compararon el buen entendimiento del diseño de manejo forestal y su implementación, contra la pobreza de conocimiento en la evaluación del manejo forestal con respecto a su respuesta a los tratamientos. Resalta la importancia del estado del manejo en estos procesos para detectar problemas y ajustar estrategias. Proponen un marco de referencia para la evaluación del manejo forestal basado en imágenes de satélite (Landsat-TM), y tecnología de SIG (Arc/Info, Easi/Pace). El proyecto que involucra el desarrollo e integración de modelos para entender la dinámica entre suelo, vegetación y radiación en ecosistemas forestales, es el desarrollado entre NASA y el Instituto



de Ecología Terrestre. Este proyecto involucra modelos de simulación, sensores remotos, investigación de campo y SIG.

Actualmente, existen una gran variedad de trabajos y proyectos sobre temas forestales los cuales involucran el uso de SIG e imágenes de satélite, cada uno de ellos tratando de entender las interrelaciones entre los factores de medio físico y la biota propia del lugar, con el objetivo de minimizar el grado de impacto en sus masas forestales, quedando de manifiesto que, la principal ventaja del uso de sensores remotos en el manejo forestal es la facilidad de evaluar los tipos de uso de suelo y cobertura vegetal, orientando los trabajos de campo durante el desarrollo de inventarios, así como la sistematización de información (Lang, 1998).

Los primeros inventarios forestales fueron realizados de forma individual en la preparación de planes de manejo en Europa durante el siglo XIX, sin embargo no se agruparon para obtener resultados a nivel nacional. Suecia fue el primer país en realizar un verdadero inventario nacional forestal (Harrison, 1951).

Es un hecho reconocido que el bienestar físico de los pueblos depende de la cantidad y forma en que se utilicen los recursos naturales que poseen, así mismo, de la disponibilidad de materias primas para el desarrollo de industrias manufactureras y el comercio.

De esta forma, si se desea obtener el máximo beneficio productivo y protector de los bosques deben entonces someterse a una política bien estructurada, así como a una planificación bien definida, esto es imposible sino se conoce primero la extensión y naturaleza de los bosques, conocimiento proporcionado por el inventario forestal. Si dicho inventario se efectúa a escala nacional deberá proporcionar datos sobre los cuales se base la formulación de una política forestal constructiva y un plan general para su desarrollo; en el caso de superficies determinadas que se deseen someter a ordenación, deberá contener los elementos necesarios para la preparación de un plan adecuado (Harrison, 1951).

A nivel nacional, la evaluación de la cobertura forestal se ha realizado en base a la disponibilidad de recursos y políticas gubernamentales, como se

muestra en la tabla 1, donde se hace un recuento de la superficie forestal nacional publicada por anuarios estadísticos desde 1976 hasta el 2000, en los cuales se puede observar que la información sobre superficie forestal en sus diferentes categorías se mantiene sin variación por largos periodos de tiempo, cifras que no se modifican pese al continuo deterioro de las áreas forestales en México por incendios y cambio de usos de suelo a agropecuario o urbano. Cabe señalar la variación de superficie a partir de 1992, año en que inició el Inventario Nacional Forestal de Gran Visión, el cual manifiesta seguir con la misma tendencia de políticas anteriores.

A nivel Estatal (Secretaría de Recursos Naturales y SEMARNAT Durango), utilizan las cifras oficiales generadas a nivel Federal y la información de detalle es generada directamente por los prestadores de servicios forestales de las diferentes zonas del Estado. Presenta el problema de carencia de información en las zonas no administradas o evaluadas, como la región de las quebradas la cual es muy inaccesible.

Superficie Arbolada en hectáreas								
Año	Bosques			Selvas			Total Selvas	Total
	Coníferas y Latifoliadas	Latifoliadas	Total Bosque: Altas y Medianas	Bajas	Total Selvas			
1976	1,005,900	413,575	1,419,475	2,129,700	452,575	2,582,275	4,001,750	
1977	1,005,900	413,575	1,419,475	2,129,700	452,575	2,582,275	4,001,750	
1978	1,005,900	413,575	1,419,475	2,129,700	452,575	2,582,275	4,001,750	
1979	1,005,900	413,575	1,419,475	2,129,700	452,575	2,582,275	4,001,750	
1980	1,005,900	413,575	1,419,475	2,129,700	452,575	2,582,275	4,001,750	
1981	1,005,900	413,575	1,419,475	2,129,700	452,575	2,582,275	4,001,750	
1982	1,005,900	413,575	1,419,475	2,129,700	452,575	2,582,275	4,001,750	
1983	1,005,900	413,575	1,419,475	2,129,700	452,575	2,582,275	4,001,750	
1984	1,005,900	413,575	1,419,475	2,129,700	452,575	2,582,275	4,001,750	
1985	1,005,900	413,575	1,419,475	2,129,700	452,575	2,582,275	4,001,750	
1986	1,005,900	413,575	1,419,475	2,129,700	452,575	2,582,275	4,001,750	
1987	1,006,000	414,000	1,420,000	2,129,700	453,000	2,582,700	4,002,700	
1988	1,006,000	414,000	1,420,000	2,129,700	453,000	2,582,700	4,002,700	
1989	1,006,000	414,000	1,420,000	2,129,700	453,000	2,582,700	4,002,700	
1990	1,006,000	414,000	1,420,000	2,129,700	453,000	2,582,700	4,002,700	
1991	1,006,000	414,000	1,420,000	2,129,700	453,000	2,582,700	4,002,700	
1992	20,799,937	9,570,705	30,370,642	5,793,910	10,948,862	16,742,772	47,113,414	
1993	20,799,937	9,570,705	30,370,642	5,793,910	10,948,862	16,742,772	47,113,414	
1994	20,799,937	9,570,705	30,370,642	5,793,910	10,948,862	16,742,772	47,113,414	
1995	20,799,937	9,570,705	30,370,642	5,793,910	10,948,862	16,742,772	47,113,414	
1996	20,799,937	9,570,705	30,370,642	5,793,910	10,948,862	16,742,772	47,113,414	
1997	20,799,937	9,570,705	30,370,642	5,793,910	10,948,862	16,742,772	47,113,414	
1998	20,799,937	9,570,705	30,370,642	5,793,910	10,948,862	16,742,772	47,113,414	
1999	20,799,937	9,570,705	30,370,642	5,793,910	10,948,862	16,742,772	47,113,414	
2000	20,799,937	9,570,705	30,370,642	5,793,910	10,948,862	16,742,772	47,113,414	

Fuente: SFF\_SARH, SEMARNAT.

Tabla 1. Superficie forestal nacional según Anuarios Estadísticos.

A nivel local, las evaluaciones son realizadas mediante inventarios de campo realizados cada 10 años, con apoyo de métodos fotogramétricos. Su

principal desventaja es la carencia de visión integral, sin estructura de sistematización ya que son elaborados con un enfoque de aprovechamiento local, difíciles de integrar regionalmente. Existen algunos casos, donde varias unidades de producción forestal han elaborado sus inventarios guiados por una unidad de servicios técnicos forestales en común, donde se integra de forma uniforme pero parcial grandes regiones. Sin embargo, no están exentos de posibles errores presentes en las metodologías de evaluación utilizadas.

El inventario nacional forestal de gran visión realizado en 1992 integró en su metodología el uso de imágenes de satélite Landsat, las cuales son utilizadas recientemente a nivel internacional para la evaluación de la cobertura vegetal y/o usos de suelo. Este tipo de información provee de datos de alta resolución acerca la reflectancia superficial (albedo de los materiales en su superficie) cubriendo grandes áreas y se constituyen en una herramienta muy útil para la creación de mapas sobre tipos de vegetación, uso de suelo, geología, y otros temas (SARH, 1992).

### **Manejo forestal en el área de estudio**

La historia del manejo forestal del Ejido Pueblo Nuevo se inicia con los primeros aprovechamientos en 1918, basándose en el método de selección, caracterizándose por la poca importancia dada a los rubros de: investigación, manejo, protección y fomento, bajo la premisa de obtener las mayores utilidades con el mínimo de inversión, sin considerar beneficios sociales e indirectos. En cuanto al desarrollo del manejo forestal, se considera que el primer estudio dasonómico que se elaboró para el ejido fue realizado por C. Blanco *et al.* 1943. En 1965 C. Teck elaboró un estudio para la porción denominada Cofradía y los Aceros. Posteriormente se efectuó un estudio dasonómico por O. Zarzoza *et al.* Todos estos estudios estuvieron basados en el Método Mexicano de Ordenación de Montes, con aplicación de cortas selectivas hacia los individuos de buena calidad y grandes dimensiones, operando este método hasta 1977, año en que entra en operación el estudio formulado por J. M. Cassián *et al.* , con este estudio se implementa en la Región el Método de Desarrollo Silvícola, este método adolece de fundamentos para conocer la dinámica de crecimiento y producción del bosque, dejando sin considerar también los aspectos

socioeconómicos como base de planeación y de medición de los efectos de los aprovechamientos forestales (Meráz, 1998). Bajo la perspectiva de Manejo Integral Forestal en 1988 se buscó representar la dinámica del bosque y los impactos que sobre éste y sus recursos asociados tienen los aprovechamientos maderables, para el Ejido Pueblo Nuevo los estudios fueron realizados por J. M. Cassián *et al.* (Meráz, 1998). Para el periodo (1994-1997) se inician los estudios del Programa de Manejo Forestal por R. Meráz *et al.* Posteriormente, después de ajustes administrativos en los servicios técnicos forestales en 1997 inicia el programa de manejo forestal del ejido Pueblo Nuevo 1997-2007, elaborado por los servicios técnicos forestales del ejido, dirigidos por Ing. Rufino Meráz Alemán. Dicho programa de manejo presenta un diagrama general del proceso de planeación forestal empleado en el cual el uso de SIG se constituye como un elemento central en la definición, integración y análisis del inventario ecológico, socioeconómico y del recurso forestal (figura 1).

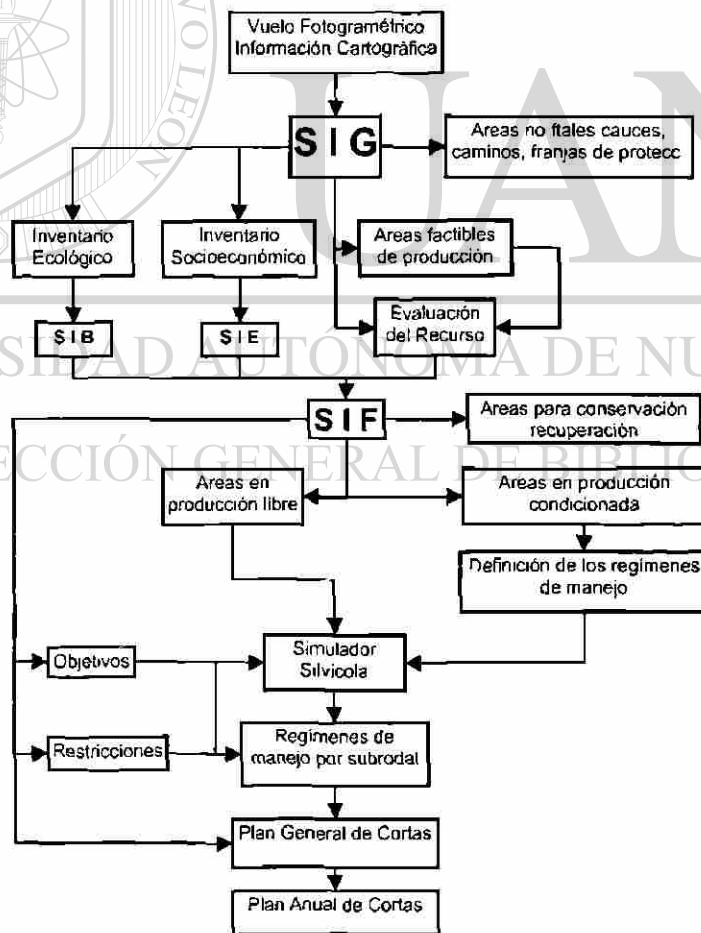
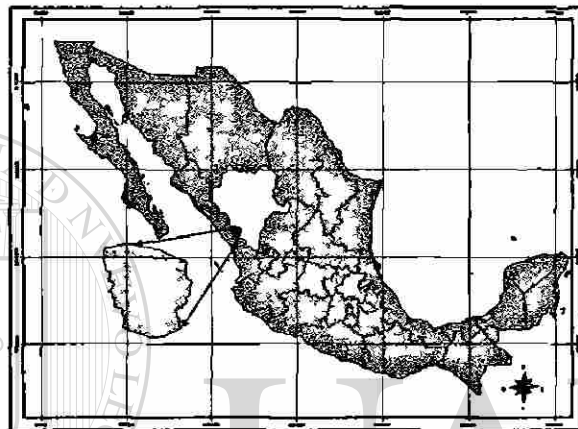


Figura 1. Diagrama de planeación forestal del ejido Pueblo Nuevo 1997-2007.

### 3. Área de Estudio

El área de estudio es el Ejido Pueblo Nuevo, el cual se encuentra ubicado entre las coordenadas  $23^{\circ} 06' 54''$  a  $23^{\circ} 39' 00''$  de latitud norte y  $105^{\circ} 12' 25''$  a  $105^{\circ} 46' 19''$  de longitud al oeste de meridiano de Greenwich, en el Estado de Durango, Municipio de Pueblo Nuevo, con una superficie total de 240,739 hectáreas (figura 2).



*Figura 2. Ubicación del área de estudio.*

**3.1. Fisiografía:** Según INEGI (1981), el área de estudio se ubica en la provincia fisiográfica Sierra Madre Occidental, dentro de las subprovincias Gran meseta y cañones duranguenses, así como mesetas y cañones del sur. El área de estudio se caracteriza por presentar en su parte norte relieve característico de sierra alta y algunas mesetas alineadas de suroeste a noreste, algunos lomeríos y zonas onduladas. En la parte media, donde la altitud es más baja se presentan pendientes de moderadas a fuertes y que culminan en cañones, mismos que presentan una gran variación de altitud y topografía generalmente escarpada. La variación altitudinal dentro del predio es de 2,800 metros con una mínima de 126 hasta una máxima de 2,926 m.s.n.m.

**3.2. Geología:** La información geológica digitalizada escala 1:250,000 de INEGI (1984) registro una dominancia de roca ígnea extrusiva tipo toba ácida, la cual es un conjunto de productos pirocásticos de diversas características, comprende

tobas radioasíticas, riolíticas, dasíticas e ignibrítas, que presentan diversas texturas, tales como piroclástica, holocristalina, afanítica y porfídica. Se presentan en pseudoestratificación, fracturamiento moderado, intemperismo somero; su color varía de pardo claro a rosado con tonos blancos, negros y amarillo ocre. La unidad está asociada con depósitos vulcanoclásticos, sus relaciones estratigráficas son discordantes sobre las rocas más antiguas, subyace de igual modo a basaltos. Estratigráficamente se puede observar una marcada preferencia de fallamiento y fracturamiento con orientación norte-sur (figura 3).

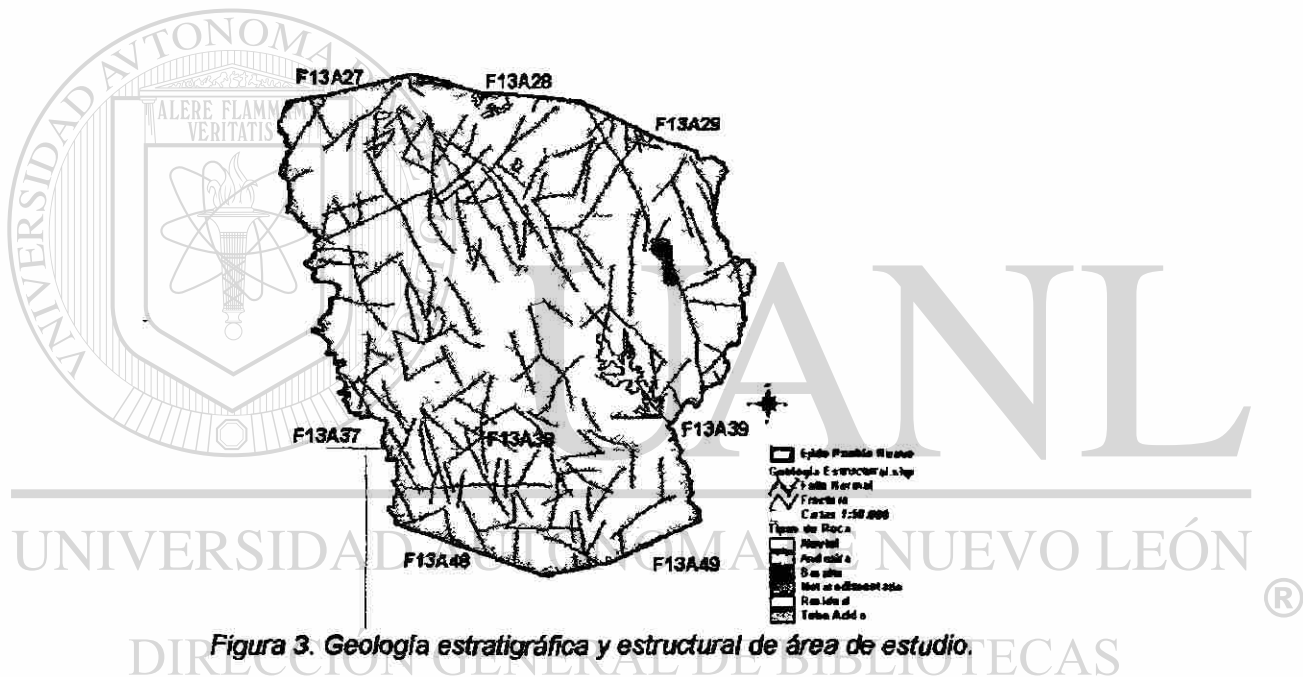


Figura 3. Geología estratigráfica y estructural de área de estudio.

**3.3. Edafología:** De acuerdo con la información contenida en la carta escala 1:250,000 de INEGI (1988). En el área de estudio existe una dominancia de suelos de tipo regosol, seguido de litosoles y regosoles (tabla 2 y figura 4). Predominando la textura media dentro de los primeros 30 cm de profundidad, presentan buen drenaje y aireación, existen áreas distribuidas al noroeste, en la zona de cañones, en las que se presentan suelos de textura gruesa, generalmente relacionados con los grupos de cambisol eútrico, regosol eútrico y litosol.

Unidades de Suelo	Descripción
<b>Cambisol</b>	Es un suelo joven, poco desarrollado, de cualquier clima, menos de zonas áridas, con cualquier tipo de vegetación, el subsuelo tiene una capa de terrones que presentan un cambio con respecto al tipo de roca subyacente, con alguna acumulación de arcilla, calcio, etc. Susceptibilidad de moderada a alta a la erosión.
<b>Litosol</b>	Es un suelo de distribución muy amplia, se encuentra en todos los climas y con muy diversos tipos de vegetación, son suelos sin desarrollo, con profundidad menor a 19 cm, tiene características muy variables, según el material que los forma. Su susceptibilidad a la erosión depende de la zona donde se encuentre, puede ser moderada a alta.
<b>Regosol</b>	Se caracteriza por no presentar capas distintas, son claros y se parecen a la roca que les dio origen, se pueden presentar en muy diferentes climas y con diversos tipos de vegetación, son de susceptibilidad variable a la erosión.

Tabla 2. Tipos de suelo en el área de estudio.

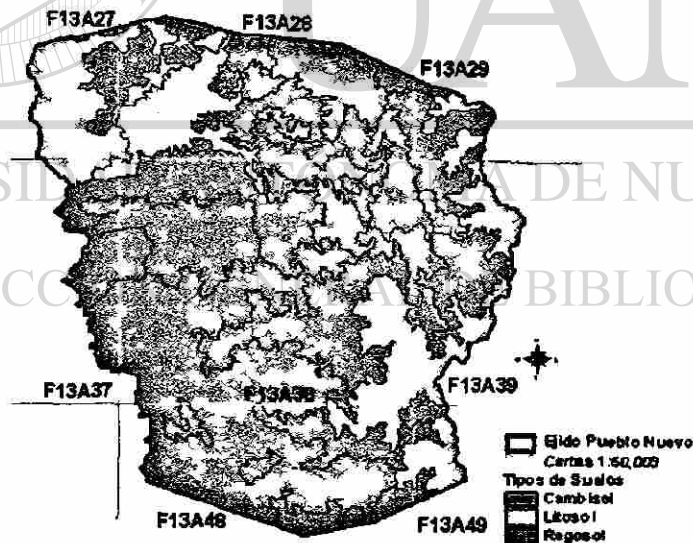


Figura 4. Edafología del área de estudio.

**3.4. Climas:** Uno de los factores determinantes para la distribución de los climas en el Estado de Durango es la barrera constituida por la Sierra Madre Occidental, que detiene los vientos húmedos presentándose en la región de las quebradas un clima marítimo semitropical con temperaturas generalmente altas

durante el año, con abundante precipitación pluvial y alta humedad atmosférica, a excepción de la región citada, la mayor parte de la sierra, por su altitud, tiene un clima semihumedo templado o semifrío, que se vuelve templado o semiseco en el lado oriental de la sierra y en buena parte de la franja central del estado, INEGI, 1981 (figura 5 y tabla 3),



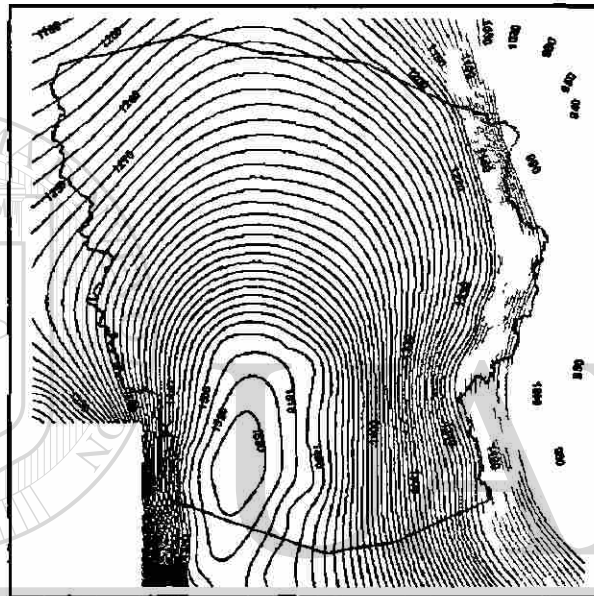
*Figura 5. Distribución de tipos climáticos en el área de estudio.*

Tipo climático	Descripción
(A)C(W1)	Clima semicálido subhúmedo, con lluvias en verano, con precipitación del mes más seco menor de 40 mm. y porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10.2 (agrupa los subtipos de humedad media de los semicálidos subhúmedos).
(A)C(W2)	Clima semicálido subhúmedo, con lluvias en verano, con precipitación del mes más seco menor de 40 mm. y porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10.2 (agrupa los subtipos más húmedos de los semicálidos subhúmedos).
AW1(W)	Clima cálido subhúmedo con lluvias en verano con porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10.2 mm.
AW2(W)	Clima cálido subhúmedo con lluvias en verano con un porcentaje de lluvia invernal menor de 5 mm.
C(E)(W2)	Clima semifrío subhúmedo con lluvias en verano con un porcentaje de precipitación entre 5 y 10.2 mm.
C(W2)	Clima templado subhúmedo con lluvias en verano con un porcentaje de precipitación invernal entre 5 y 10.2 mm
C(E)(M)	Clima semifrío húmedo con abundantes lluvias en verano con porcentaje de precipitación invernal mayor de 5 mm.

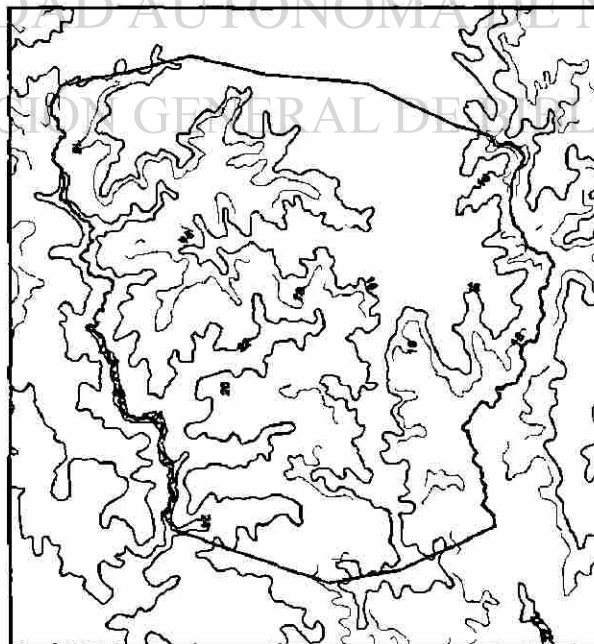
*Tabla 3. Descripción de los tipos climáticos (clasificación climática de Koppen, modificado por E. García, 1964) presentes en la zona de estudio.*



**3.5. Precipitación y Temperatura:** Estos dos factores son los principales descriptores del clima. Los patrones de distribución en espacio y tiempo de la precipitación, conjuntamente con la temperatura son utilizados para realizar la caracterización del clima local. Así mismo, guardan una especial atención, pues influyen muy fuertemente en la distribución de los seres vivos. La combinación de ellos, generan condiciones macro y microclimáticas de los ecosistemas. Los patrones de distribución (figuras 6 y 7) y sus promedios mensuales se representan mediante un diagrama climático de Walter (figura 8).



*Figuras 6. Distribución de la Precipitación media anual en la zona de estudio.*



*Figuras 7. Distribución de la Temperaturas media anual en la zona de estudio.*

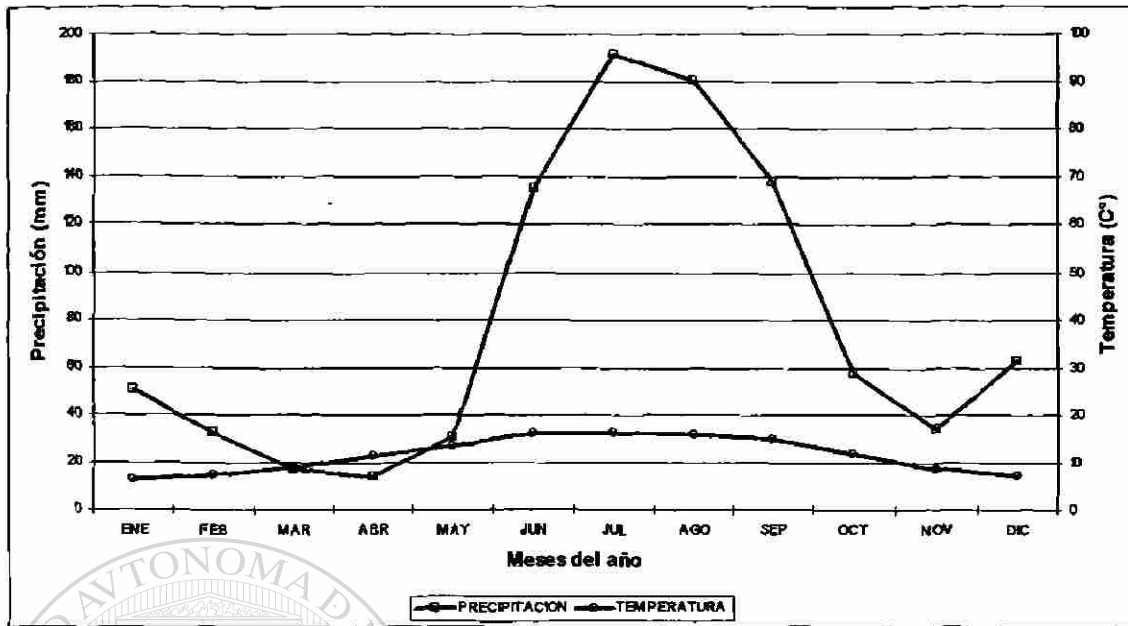


Figura 8. Diagrama climático de Walter para la estación meteorológica de El Salto, Durango.

**3.6. Hidrología:** La zona de interés se encuentra en la región hidrológica número 11, dividida por dos cuencas, INEGI, 1989 (figura 9):

- Cuenca de Río Baluarte "C" (185,089-40-29 Has.) (76.88%)
- Cuenca del Río Acaponeta "B" (65,095-33-83 Has.) (27.04%)

Dentro de la cuenca del Río Baluarte, destacan las subcuencas de la Quebrada de Guadalupe y la del Río Baluarte.

Dentro de la cuenca del Río Acaponeta, destacan las subcuencas de Quebrada San Vicente y Río San Diego. Cabe mencionar que en el límite sur del predio existe una muy pequeña fracción de la subcuenca Río Acaponeta.

**3.7. Uso de suelo y vegetación:** La información cartográfica digital en formato vectorial de tipos de vegetación y uso de suelo del Inventario Nacional Forestal 2000, facilitada por SEMARNAT, fue integrada al SIG (figura 10).

Evaluando el resultado del Inventario Nacional Forestal 2000 sobre el área de estudio (tabla 4), la superficie ocupada por bosques de pino-encino y encino-pino ocupa casi una cuarta parte, seguido por otro tanto de bosque de pino. Ambos, ocupan la mitad del área. Desde esta perspectiva, el área de estudio

muestra una aparente estabilidad ecológica, ya que solo el 1% esta ocupada por cultivos y un 3% por pastizales. Mas sin embargo, el 37.7 % esta ocupado por mezclas con vegetación secundaria arbustiva y herbácea.

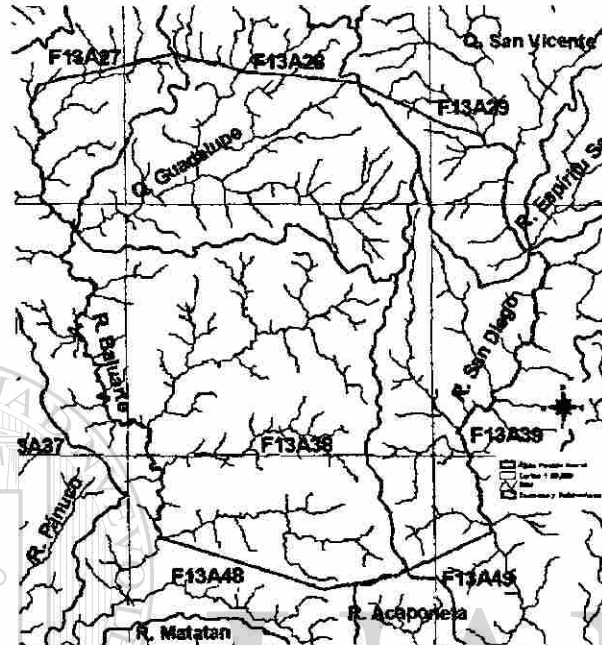
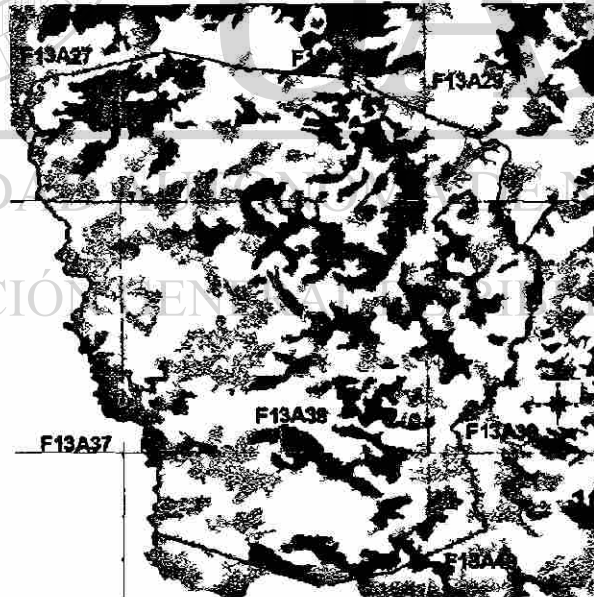


Figura 9. Principales Cauces y área de captación en la zona de estudio.



- Uso Predominante
- Bosque de Encino
- Bosque de Encino con vegetación secundaria arbustiva y herbácea
- Bosque de Pino
- Bosque de Pino con vegetación secundaria arbustiva y herbácea
- Bosque de Pino-Encino (incluye Encino-Pino)
- Bosque de Pino-Encino (incluye Encino-Pino) con vegetación secundaria arbustiva y herbácea
- Selva Baja Caducifolia y Subcaducifolia
- Selva Baja Caducifolia y Subcaducifolia con vegetación secundaria arbustiva y herbácea
- Selva Mediana Caducifolia y Subcaducifolia

Figura 10. Tipos de Uso de Suelo y Vegetación del Inventario Nacional Forestal 2000 en la zona de estudio.

COMUNIDAD	Hectáreas	%
AGRICULTURA DE TEMPORAL CON CULTIVOS ANUALES Y SUELOS DESNUDOS	2,440	1.01
BOSQUE DE ENCINO	22,170	9.21
BOSQUE DE ENCINO CON VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA Y HERBACEA	31,101	12.92
BOSQUE DE PINO	51,263	21.29
BOSQUE DE PINO CON VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA Y HERBACEA	16,580	6.89
BOSQUE DE PINO-ENCINO (INCLUYE ENCINO-PINO)	57,422	23.85
BOSQUE DE PINO-ENCINO (INCLUYE ENCINO-PINO) CON VEGETACION SECUNDARIA	28,896	12.00
PASTIZAL INDUCIDO	7,855	3.26
SELVA BAJA CADUCIFOLIA Y SUBCADUCIFOLIA	8,683	3.61
SELVA BAJA CADUCIFOLIA Y SUBCADUCIFOLIA CON VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA Y HERBACEA	14,176	5.89
SELVA MEDIANA CADUCIFOLIA Y SUBCADUCIFOLIA	155	0.06
<b>TOTAL</b>	<b>240,740</b>	

Tabla 4. Superficie por tipo de vegetación o uso de suelo en el área de estudio, según Inventario Nacional Forestal 2000. SEMARNAT.

**3.8. Aspectos socioeconómicos:** El ejido Pueblo Nuevo cuenta con un total de 118 localidades y 11,886 habitantes, de los cuales 5,973 son hombres y 5,913 son mujeres (Censo de Población y Vivienda 2000, INEGI, 2000), representando el 26.29% de la población total del Municipio. Su densidad de población es de 4.94 habitantes por kilómetro cuadrado, equivalentes a 20.25 hectáreas por habitante (tabla 5). El ejido actualmente cuenta con un total de 1,498 miembros.

Es un núcleo ejidal que aprovecha sus recursos forestales de manera colectiva el cual fue dotado mediante resolución presidencial el 15 de mayo de 1931, publicada en el diario oficial de la federación de fecha 03 de junio de 1931 con una superficie de 166,754-52-81 hectáreas, ejecutándose dicha resolución con fecha 14 de junio de 1931 con la misma superficie, habiéndose registrado en el Registro Agrario Nacional, con fecha 27 de enero de 1944, número de registro 727, foja 60, volumen 7.

A nivel Municipio, existen grupos étnicos como Tepehuanos, Coras y Huicholes; en el año 2000 existía una población de lengua indígena de 2,844 representando el 6.29% de la población.

Variable	Estado	Municipio	Ejido
Localidades	6,258	295	118
Población 2000	1,448,661	45,217	11,886
Hombres	709,521	22,434	5,973
Mujeres	739,140	22,783	5,913
Tasa de crecimiento 80-90	1.33 %	1.60 %	
Tasa de crecimiento 90-2000	0.71 %	1.42 %	
Densidad Hab./Km2	7.10	7.10	4.94

Fuente: INEGI, Censo Nacional de Población y Vivienda 2000.

Tabla 5. Variables demográficas.

La distribución de las actividades económicas varía según las fuentes consultadas (tablas 6 y 7).

Sector	PEA	%	Actividad Dominante	PEA	%
Primario	1,779	17.00%	Agropecuario	1,779	100.00%
Secundario	3,732	35.65%	Manufactura	3,086	82.69%
Terciario	4,561	43.58%	Comercial	1,487	32.60%
No Específico	395	3.77%			
Total Municipal	10,467				
Total Ejidal	1,613	13.57%			

Fuente: Secretaría de Gobernación, 2000.

Tabla 6. Distribución de la Población Económicamente Activa según SEGOB.

%	Actividad	Población
80	Sector primario (industria forestal principalmente, el cual está concentrado en este sector).	9,614
15	sector secundario (minería, extracción de petróleo y gas, electricidad, agua, construcción).	1,803
5	sector terciario (gobierno, comercio y otros servicios).	601

Fuente: INEGI, 1995.

Tabla 7. Distribución de la Población Económicamente Activa según INEGI.

Las actividades agropecuarias están representadas básicamente por los cultivos de maíz y frijol, así como la crianza de ganado bovino, porcino, equino y diversas aves.

A nivel ejidal, se registra un total de 1,964 viviendas habitadas, de las cuales 1,940 (98.78%) son particulares y los materiales empleados para su construcción son: madera, ladrillo y cemento. 1,206 (61.41%) cuentan con energía eléctrica, 1,382 (70.37%) tienen agua entubada y 233 (11.86%) con sistema de drenaje, la tabla 8 muestra comparaciones a nivel Municipal y Estatal.

Indicador	Estado Dgo.	Municipio PN	Ejido PN
con drenaje	74.20 %	71.25 %	11.86 5
con energía eléctrica	87.30 %	76.03 %	61.41 %
con agua entubada	86.52 %	84.64 %	70.37 %

Fuente: INEGI, 2000.

Tabla 8. Comparación de indicadores promedio para el Estado y Municipio.

Los medios de comunicación con que cuenta el ejido son: transporte rural colectivo propiedad del ejido, que comunica con la cabecera municipal, existen un total de 600 casas habitación que cuentan con televisión, dos poblaciones cuentan con caseta pública de teléfonos y en la cabecera municipal, se cuenta con central camionera, servicios telefónicos para las viviendas y caseta pública (lada y fax), oficinas de telégrafos, correos e internet.

Las vías de comunicación existentes en el ejido son, 665.97 Km. de carreteras de terracería, 1,712.30 Km. de brechas y 7,981.34 Km. de veredas. En la cabecera Municipal cruza la carretera federal No. 40, tramo Durango-Mazatlán, kilómetro 100 (figura 11).

El aspecto educativo puede resumirse en la tabla 9, la cual muestra la infraestructura Municipal existente y algunas variables importantes.

Nivel	No. Escuelas	Docentes	Alumnos
Preescolar	84	78	5,283
Primaria	154	324	18,581
Secundaria	47	--	7,003
Bachiller	3	--	1,623
Profesional	1	--	435

Variable	Estatal	Municipal	Ejidal
Población entre 6 y 14 años que sabe leer y escribir	88.67 %	81.12 %	77.39 %
Población mayor de 15 años alfabeta	94.52 %	91.30 %	89.77 %
Población mayor de 15 años sin primaria	21.96 %	28.37 %	42.10 %
Grado de escolaridad	7.31	5.97	4.97

Tabla 9. Infraestructura e indicadores de educación Municipal.

La prestación de servicios de Salud inicia en 1957 con el Instituto Mexicano del Seguro Social; brindando atención a los trabajadores del municipio. También existe un centro de salud de la Secretaría de Salubridad y Asistencia y un pequeño consultorio del Instituto de Seguridad y Servicio Social para los Trabajadores del Estado (ISSSTE). Actualmente se cuenta a nivel municipal con

17 unidades médicas de 1er. nivel, 34 consultorios, 16 médicos generales, 15 enfermeras. En el ejido existen 2,897 personas con derecho a servicios de salud, 2,796 en el IMSS y 101 en el ISSSTE.

Para SEGOB las variables más relevantes presentes en el municipio se muestran en la tabla 10.

Indicador	Municipio PN	Promedio Estatal
% + 15 años analfabeta	8.61 %	8.38 %
% + 15 años sin primaria	37.35 %	42.20 %
% sin drenaje	28.75 %	25.80 %
% sin energía eléctrica	23.97 %	12.70 %
% sin agua entubada	15.36 %	13.48 %
% piso de tierra	31.21 %	20.28 %

Fuente: SEGOB, 2000.

Tabla 10. Indicadores relevantes SEGOB.

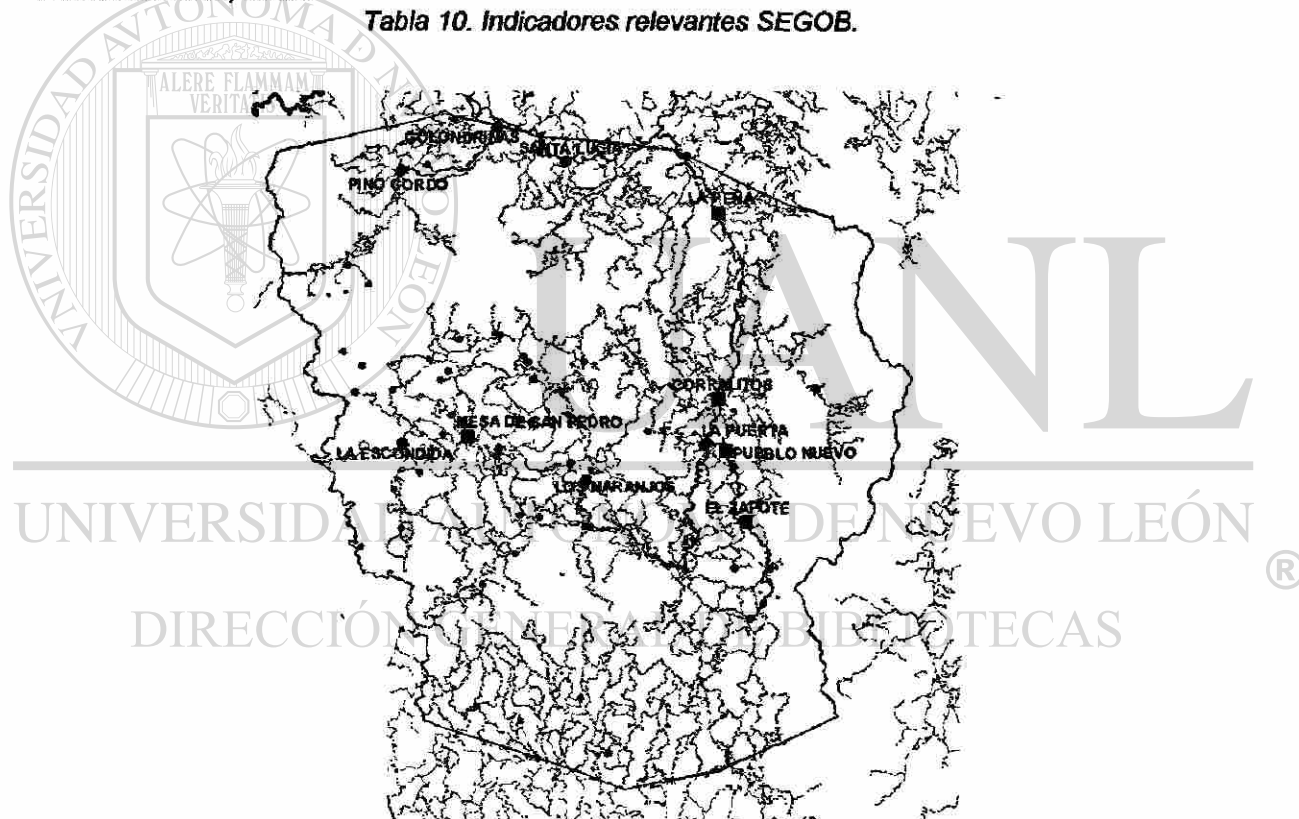
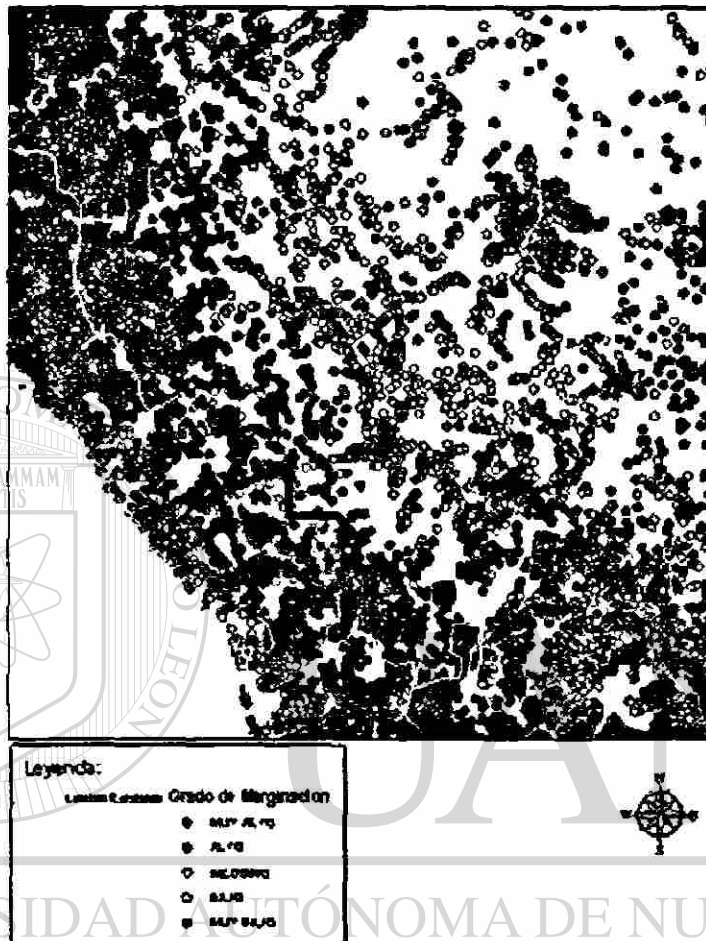


Figura 11. Localidades e infraestructura de caminos, brechas y veredas

De la situación socioeconómica previamente descrita, puede concluirse que el área de estudio, así como las localidades ubicadas en la Sierra Madre Occidental del Estado, son las de menor infraestructura de comunicación, servicios, educación y en consecuencia la de mayor grado de marginación como se observa en la figura 12.

Generalmente obtienen sus ingresos de la explotación de sus recursos naturales, complementados con actividades agropecuarias de autoconsumo.



**Figura 12. Grado de Marginación por localidad en el Estado de Durango y otros Estados colindantes.**



## **4. Materiales y Métodos**

### **4.1. Infraestructura utilizada**

Para la integración, análisis, modelos y generación de nueva información, se trabajó en los laboratorios de SIG de la Facultad de Ciencias Forestales de la UANL y en el Centro de Estudios Estratégicos del ITESM. El software utilizado fue Arc/Info 7.0.2, Arc/View 3.2, Imagine ERDAS 8.5 y Microsoft Office XP.

### **4.2. Definición del polígono del predio y zona de estudio**

La definición del límite del ejido se obtuvo a partir de las coordenadas de mojoneras existentes en archivos de PROCEDE, agregando la cobertura de hidrología superficial definiendo los cauces de los ríos Baluarte y San Diego para cerrar la poligonal del ejido Pueblo Nuevo, con un área total calculada de 240,739.88 hectáreas.

Se definió una zona de estudio (marcada en línea roja) mayor al límite ejidal con el objetivo de incluir sus vecindades y eliminar efectos de borde, para lo cual se trazó un polígono rectangular de 63.90 Km en su eje E-W por 64.68 Km en su eje N-S, con una superficie total de 413,305.20 ha. con coordenadas:

Esquina superior izquierda: X: 23°39'58" y Y: 105°47'35" Lat-Long.  
X: 419,115 y Y: 2,617,330 UTM.

Esquina inferior derecha: X: 23°05'05" y Y: 105°09'56" Lat-Long.  
X: 483,015 y Y: 2,552,650 UTM.

Dicha zona registró una superficie de 389,687.75 hectáreas, ésta fue definida tomando en cuenta las ocho cartas escala 1:50,000 de INEGI en las que se encuentra inserto el ejido Pueblo Nuevo (figura 13).

### **4.3. Definición de proyección geográfica**

Con el objetivo de establecer parámetros en la elaboración del sistema de información geográfica (SIG) se definieron los siguientes estándares:

**Sistema de coordenadas:**

**Proyección: Universal Transversa de Mercator – UTM**

**Unidades: Metros**

**Zona: 13**

**Longitud del meridiano central: -105**

**Latitud de proyección de origen: 0**

**Falso este en metros: 500,000**

**Falso norte en metros: 0**

**Factor de escala: 0.9996**

**Datum horizontal: Datum de Norte América de 1927 - NAD27**

**Nombre del Elipsoide: Clarke 1866**



**Figura 13. Polígono del área de estudio, definición de zona de estudio y localización de cartas 1:50,000 de INEGI**

#### **4.4. Adquisición y captura de información**

En la elaboración del presente trabajo se utilizó como información base, las cartas topográficas F13A27, F13A28, F13A29, F13A37, F13A38, F13A39, F13A48 y F13A49, escala 1: 50,000 de INEGI. La información temática de geología, edafología, hidrología de aguas superficiales y efectos climáticos se obtuvieron de las cartas F13-2, escala 1:250,000 de INEGI. La información sobre cobertura forestal utilizada fue la del inventario nacional forestal 2000, escala 1:250,000, aunque se consultó adicionalmente la carta de tipos de vegetación y uso de suelo de INEGI 1:250,000, así como la información digital sobre el mismo tema de CONABIO generada a partir de información de INEGI escala 1:250,000. La cobertura sobre información climática fue adquirida de la carta estatal de climas, escala 1:1'000,000 de INEGI, La información de estaciones

meteorológicas e hidrométricas de la CNA se localizaron atendiendo a sus coordenadas y fueron verificadas con la información de la carta de hidrología superficial y efectos climáticos. La información de localidades fue extraída de la base de datos del censo nacional de población y vivienda 2000 de INEGI y su localización fue determinada con base en sus coordenadas geográficas. La información municipal de Secretaría de Gobernación fue exportada a formato Dbase e integrada a la información vectorial de límites municipales de INEGI. La información dasocrática, de inventarios y fotografías aéreas para trabajo de campo fueron proporcionadas por la dirección de servicios técnicos forestales del ejido Pueblo Nuevo. En la tabla 11 se describe un resumen de la Adquisición y captura de Información.

#### **4.5. Información derivada de procesar la información adquirida**

A partir de la información topográfica vectorial digital de INEGI, escala 1:50,000, se elaboró un mosaico y se generó un Modelo Digital de Elevación (MDE) mediante el algoritmo TOPOGRID de Arc/Info 7.0.2®, asignando un tamaño de celda de 15x15 metros de resolución espacial (225 m<sup>2</sup> ó 0.0225 hectáreas).

Utilizando el MDE se calculó el modelo de pendientes del terreno en porcentaje, con el algoritmo SLOPE en el módulo GRID de Arc/Info 7.0.2®. El algoritmo utilizado identifica el máximo cambio de valores de "z" de cada celda con respecto a sus vecinas más próximas para determinar la pendiente en particular de cada celda (Ritter, 1987; Jenson, 1988). Los valores obtenidos fueron categorizados en seis clases como se muestra en la tabla 12.

Basados en el algoritmo del cálculo de la pendiente, se identificó la dirección (azimut) cuesta abajo en cada celda, para determinar la orientación de las mismas o modelo de exposiciones con el algoritmo ASPECT en el módulo GRID de Arc/Info 7.0.2®.

Los valores fueron categorizados en sus ocho puntos cardinales como se muestra en la tabla 13.

Tema	Formato	Escala	Fuente	Tratamiento	Resultado
Topografía	Digital Vector	1:50,000	INEGI	Revisión de: Proyección Trazo de arcos Base de Datos	Curvas de nivel cada 20 m
Vías de comunicación	Digital Vector	1:50,000	INEGI	Revisión de: Proyección Trazo de arcos Base de Datos	Carreteras, caminos, brechas y veredas
Líneas de transmisión	Digital Vector	1:50,000	INEGI	Revisión de: Proyección Trazo de arcos Base de Datos	Líneas de electricidad, teléfono y telégrafo
Escurrimiento superficial	Digital Vector	1:50,000	INEGI	Revisión de: Proyección Trazo de arcos Base de Datos	Cauces de arroyos y ríos
Geología	Carta	1:250,000	INEGI	Digitalización	Tipos de roca
Edafología	Carta	1:250,000	INEGI	Digitalización	Tipos de suelo
Hidrología de aguas superficiales y efectos climáticos	Carta	1:250,000	INEGI	Digitalización	Cauces de arroyos, ríos Cuencas Subcuencas Microcuencas Submicrocuena Isoyetas Isotermas
Cobertura Vegetal	Digital Vector y carta	1:250,000	SEMERNAT, INEGI, CONABIO	Revisión de: Proyección Trazo de arcos Base de Datos	Tipos de vegetación
Climas	Carta	1:1'000,000	INEGI	Digitalización	Tipos de climas
Estaciones climatológicas e hidrométricas	Tabla	Coordenadas XY	CNA, INEGI	Digitalización	Ubicación y caracterización climática de cuencas
Localidades del censo de población y vivienda	Tabla	Coordenadas XY	INEGI	Digitalización	Ubicación y caracterización socioeconómica de la población
Información Municipal	Tabla		SEGOB	Integrar a límites municipales	Caracterización demográfica municipal
Límites municipales	Digital Vector	1:250,000	INEGI	Revisión de: Proyección Trazo de arcos Base de Datos	Caracterización demográfica municipal
Estratificación Forestal	Digital Vector y Tabla	1:50,000	STF Pueblo Nuevo	Digitalización e integración de base de datos	Caracterización dasocrática del ejido Pueblo Nuevo
Imágenes Landsat MSS	Digital Raster	Resolución 60x60	U.S.G.S.	Calibración espectral	Análisis multitemporal
Imagen Landsat_ETM+	Digital Raster	Resolución 15x15	SEMARNAT	Calibración espectral	Evaluación de cobertura forestal

Tabla 11. Resumen de Información adquirida y procesos de integración al SIG.

Pendiente (%)	Definición
0	Plano
1 – 10	Relativamente. Plano
11 – 20	Medio
21 – 40	Fuerte
41 – 60	Escarpado
> 60	Muy escarpado

Tabla 12. Calificación de pendiente por rangos porcentuales en el área de estudio.

Azimut	Definición
337° 30' – 22° 30'	(N) Norte
22° 30' – 67° 30'	(NE) Noreste
67° 30' – 112° 30'	(E) Este
112° 30' – 157° 30'	(SE) Sureste
157° 30' – 202° 30'	(S) Sur
202° 30' – 247° 30'	(SW) Suroeste
247° 30' – 292° 30'	(W) Oeste
292° 30' - 337° 30'	(NW) Noroeste

Tabla 13. Calificación de exposición por rangos de azimut en el área de estudio.

#### 4.6. Evaluación de la cobertura vegetal mediante percepción remota

Uno de los principales objetivos del presente trabajo, es el de desarrollar una metodología de evaluación de la composición, distribución y densidad actual de la cobertura forestal, con un nivel de detalle tal que facilite nuevos procesos de estratificación, así como la comparación multitemporal de sus cambios, para lo cual, se adquirieron dos imágenes de satélite Landsat MSS y una Landsat ETM+ para su procesamiento y clasificación mediante el método de estadísticas supervisadas.

Con el propósito de determinar qué tipos de vegetación y usos de suelo que están presentes en el área de estudio (con enfoque a la administración forestal), se revisaron diversas fuentes cartográficas de información, como los

del inventario nacional forestal 2000, así como los presentes en las cartas de uso de suelo y vegetación de INEGI y CONABIO. Adicionalmente, se integró la información dasocrática y de manejo generada por los prestadores de servicios técnicos forestales del ejido Pueblo Nuevo (tabla 14).

Fuente	Nombre	Escala
INEGI	Uso de suelo y vegetación	1:250,000
SEMARNAT	Inventario Nacional Forestal 2000	1:250,000
CONABIO	Uso de suelo y vegetación agrupado	1:250,000
STFPN	Inventario Forestal de Manejo	1:20,000

Tabla 14. Fuentes de información cartográfica sobre uso de suelo y vegetación

Los tipos de vegetación presentes en el área de estudio son:

- Bosque de Otras Coníferas (OC).- Representado principalmente por los géneros *Abies*, *Picea* y *Pseudotsuga*.
- Bosque de Pino (cerrado) (P1).- Comunidades de alta densidad, cuya composición esta dominada por el género *Pinus* en más del 75%.
- Bosque de Pino (abierto) (P2).- Comunidades de muy baja densidad, cuya composición esta dominada por el género *Pinus* en más del 75%.
- Bosque de Pino-Encino (PQ).- Comunidades cuya composición esta dominada por el género *Pinus* en más del 50%, asociados a individuos del género *Quercus*.
- Bosque de Encino Pino (QP).- Comunidades cuya composición esta dominada por el género *Quercus* en más del 50%, asociados a individuos del género *Pinus*.
- Bosque de *Pinus lumholtzii* (PL).- Comunidades representadas por *Pinus lumholtzii* y *Quercus quercus*, en zonas muy específicas con características edafológicas particulares (Puede caracterizarse como Bosque de Encino-Pino).
- Bosque de Encino (Q).- Comunidades arbóreas cuya composición esta dominada por el género *Quercus* en más del 75%.

- Matorral de Encino (MQ).- Comunidades arbustivas cuya composición esta dominada por el género *Quercus* en más del 75%.
- Matorrales (Huiz).- Comunidades generalmente representadas por especies arbustivas de géneros *Prosopis* y *Acacia*. Los cuales son típicos indicadores de fuertes perturbaciones a ecosistemas aún no recuperados.
- Selva Mediana Subcaducifolia (SMS).- Este tipo de vegetación se encuentra en las cañadas húmedas y sombreadas en la zona baja de barrancas, constituido por especies como *Brosimum alicastrum* (capomo o ramón), *Ficus cotinifolia* (amate), *Swetenia humilis* (venadillo), *Ceiba pentadra* (ceiba), *Enterolobium cyclocarpum* (guanacastle o parota), *Dendropanax arboreus* (palo de agua).
- Selva Mediana Caducifolia (SMC).- Esta comunidad también es de distribución restringida, pero se encuentra en sitios mucho mas altos y menos protegidos.
- Selva Baja Subcaducifolia (SBS).- Se encuentra ampliamente distribuida en las laderas de la zona cálido húmeda del predio, en la zona limítrofe de los 1,400 m.s.n.m donde comienza la distribución de las comunidades de clima templado, las especies representativas son: *Ficus petiolaris*, *Trema micrantha* (capulín)
- Selva Baja Caducifolia (SBC).- Se desarrolla en climas cálidos subhúmedos, semisecos o subsecos donde la mayoría (75 – 100%) de los individuos que la forman tiran las hojas en la época seca que es muy prolongada (6 – 8 meses); los árboles dominantes son por lo general inermes. Se distribuye ampliamente sobre laderas de cerros con suelos de buen drenaje. Son comunes las comunidades de *Bursera spp*, *Lysiloma spp* (tepeguaje), *Jacarantia mexicana* (bonete), *Ipomea spp*. (cazahuate), *Pseudobombax palmeri* (amapola), *Erithrina spp*. (colorín), *Ceiba spp*. (pochote) y *Cordia spp*. (cueramo).
- Pastizales (Past).- Esta clase se refiere a las zonas que presentan cobertura vegetal de tipo herbáceo, ya sea de forma natural o cultivada. Se presenta comúnmente en claros naturales, áreas anteriormente

aprovechadas, áreas que fueron afectadas por incendios y terrenos agrícolas abandonados. El cultivo de pastizales con fines pecuarios no se presenta en el ejido.

- Suelo Desnudo (SD).- En esta clase se agrupan todas aquellas áreas carentes de vegetación, que muestran la presencia de suelo, debido a actividades agrícolas, pecuarias, o forestales.
- Roqueríos (R).- Esta clase se caracteriza por la ausencia de cobertura vegetal y suelo, de tal forma que las rocas se encuentran expuestas. Su distribución es muy amplia en las zonas de fuertes pendientes.
- Agua (A).- En esta clase se agrupan todos los cuerpos de agua presentes, principalmente en el lecho de los principales ríos.

#### **4.6.1. Procesamiento de imágenes Landsat**

Las imágenes Landsat MSS del 3 de marzo de 1973 y 6 de marzo de 1986, órbita 31, fila 44, pertenecen al programa "Caracterización del Paisaje en Norte América" (NALC), del U.S. Geological Survey y NASA. La imagen Landsat-ETM+ del 8 de marzo de 2000, órbita 31, fila 44, fue utilizada para identificar los diferentes tipos de vegetación y uso de suelo del inventario y fue facilitada por la Dirección de Geografía de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). La información adquirida por sensores remotos fue procesada para minimizar los errores que puedan degradar la calidad y repercutir directamente en la precisión de los análisis subsecuentes, entre los que tenemos:

- Errores internos (originados por el sensor mismo) se corrigieron mediante la adquisición de imágenes precalibradas por la compañía distribuidora.
- Errores externos (debido a perturbaciones de la plataforma o a afectaciones de las características de la escena, Chavez, 1989), principalmente espaciales, espectrales y temporales fueron corregidos de la siguiente manera:



- Respecto a la *variación temporal* (diferencias fenológicas a lo largo del año), esta fue minimizada con escenas de la misma época del año (3 de marzo de 1973, 10 de marzo de 1986 y 18 de marzo de 2000).
- La *variación espacial* (resolución espacial) solo fue aplicada a la imagen Landsat-ETM+ de 2000, la imagen multiespectral original en sus bandas visibles e infrarrojas con resolución espacial de 30x30 m. fue remuestreada a 60x60 m. mediante el algoritmo RESAMPLE de Imagine Erdas® para el análisis multitemporal con las imágenes Landsat MSS de igual resolución.

Adicionalmente, con el objetivo de determinar con mayor precisión los tipos de comunidades forestales existentes, la imagen multiespectral original en sus bandas visibles e infrarrojas fue combinada con la banda pancromática para obtener una imagen multiespectral de mejor resolución espacial (15x15 m.) mediante el algoritmo RESOLUTION MERGE de Imagine Erdas®, con la opción de componentes principales (Welch, 1987).

- La *variación espectral* presente en las imágenes fueron de dos tipos, la primera fuente (casi nula), derivada de condiciones atmosféricas locales como humedad ambiental y/o bruma presente, que afecta principalmente a las longitudes del espectro electromagnético visible (bandas 1, 2 y 3), esta fue corregida mediante ajuste de histogramas. La segunda de mayor impacto, denominada "efecto topográfico", generada por las condiciones de iluminación local al momento de la adquisición de la escena por el sensor del satélite Landsat (MSS 1973 y 1986 a las 10:55 a.m. y ETM+ a las 11:22 a.m.), fue corregido mediante normalización topográfica. *Para mayor información vea Anexo I Normalización Topográfica.*

Para este último punto, se propone la siguiente fórmula:

$$\delta DN_{\lambda ij} = DN_{\lambda ij} + (DN_{\lambda ij} * ((\mu_k - X_{ij}) / \mu_k) * k_{\lambda})$$

Donde:

$\delta DN_{\lambda ij}$  = Valores de radianza normalizada para el pixel<sub>ij</sub> en la banda  $\lambda$ .

$DN_{\lambda ij}$  = Valores de radianza originales para el pixel<sub>ij</sub> en la banda  $\lambda$ .

$\mu_k$  = Valor de la media del modelo de iluminación

$X_{ij}$  = Valor de iluminación para el pixel<sub>ij</sub>

$k_{\lambda}$  = constante de Minnaert modificada en la banda  $\lambda$  ( $0 \rightarrow 1$ )

Donde el cálculo de la constante de Minnaert es calculada entre los valores de brillantez de cada una de las seis bandas de la imagen Landsat ETM+, contra los valores de brillantez del modelo de iluminación. Los valores de la pendiente de dichas regresiones se muestran a continuación:

Constante de Minnaert para cada banda ( $k_{\lambda}$ )

Banda1	0.57099
Banda2	0.57853
Banda3	0.69805
Banda4	0.69127

#### 4.6.2. Integración de información dasocrática existente

Con el objetivo de obtener información de primera mano acerca de las condiciones de las comunidades forestales existentes, buscando lograr una mejor confiabilidad de clasificación, se integró la información dasocrática generada por los prestadores de servicios técnicos forestales del ejido Pueblo Nuevo, para lo cual se digitalizaron 32 cartas dasocráticas existentes, las cuales fueron rasterizadas en un escáner de rodillos de 36 pulgadas de ancho, generando archivos en blanco y negro, en formato PCX. Posteriormente fueron vectorizados, convirtiéndolos a formato DXF de Auto-CAD®. Finalmente, cada uno de ellos fue importado a formato vector de Arc\_Info 7.2.1, para luego ser georreferenciados y proyectados de acuerdo a los parámetros preestablecidos, e

integrados a un mosaico de toda el área de estudio. Obteniendo dos coberturas digitales, una para subrodales con 1,402 polígonos y otra para subrodales con 14,092 polígonos.

La información de manejo generada a partir del análisis de información de campo, registrada en la elaboración del inventario forestal ejidal de 1996, se encontraba en formato SPF, el cual es una aplicación diseñada para su captura y análisis, cuyos resultados fueron reportados en un total de nueve documentos diferentes, de entre los cuales se seleccionaron solo seis para evitar repetición de variables (tabla 15).

Reporte No.	Descripción
3	Número de sitios, intensidad y error del muestreo del inventario de manejo.
5	Características ecológicas.
6	Característica silvícolas – dasométricas por piso y grupo de especies.
8	Determinación del método de tratamiento.
9	Cálculos de incrementos.
10A	Cálculo de posibilidad de pino y encino por subrodal, serie y área de corta.

Tabla 15. Reportes seleccionados para su integración al SIG Forestal.

La integración de información seleccionada generó una base de datos con un total de 126 campos, los cuales fueron ligados a la cobertura digital de subrodales. Para mayor información vea Anexo II Integración de Información Dasocrática.

#### 4.6.3. Selección de áreas para muestreo de campo

Con el objetivo de identificar en campo las diferentes comunidades forestales y usos de suelo, la información dasocrática anteriormente descrita se sobrepuso a la imagen de satélite Landsat-ETM+ del año 2000, permitiendo seleccionar 62 subrodales de muestreo a partir de los cuales con se definieron un total de 172 puntos de entrenamiento ubicados con sistema de posicionamiento global, los cuales fueron ubicados en la imagen landsat ETM+ y mediante la herramienta SEED (ERDAS 8.5)\* generados los polígonos de entrenamiento, cubriendo un total 2,783.07 hectáreas.

\*Seed es una herramienta que permite agrupar píxeles con características espectrales similares, tomando en cuenta criterios del patrón de selección, superficie máxima y distancia espectral.

#### 4.6.4. Firmas espectrales y validación

Una vez seleccionadas las áreas de muestreo, se procedió a extraer los valores digitales en cada una de sus bandas para calcular los parámetros estadísticos de mínima, máxima, media, mediana, moda, desviación estándar, del grupo de píxeles que constituyen cada polígono de entrenamiento, sus histogramas para determinar su comportamiento de distribución, así como una matriz de covarianzas mediante la combinación de varianzas entre pares de bandas.

Con los valores de medias y matriz de covarianza de cada clase espectral se determinó su separabilidad matemática de clases con el algoritmo de divergencia de Jeffries-Matusita, esta ecuación compara cada clase espectral individual contra todas las demás clases espectrales, con el objeto de determinar su separabilidad y distinguir aquellas clases espectrales de diferente clase informacional en las que pudiese existir gran similitud. Si se presenta tal caso, significa que durante el proceso de clasificación puede existir confusión entre clases informacionales, por lo tanto es recomendable que dichas firmas sean eliminadas y definir nuevos polígonos de estadísticas supervisadas para evaluar de nuevo su separabilidad en distancia estadística. El resultado de este proceso es la optimización de polígonos de entrenamiento y el incremento de la capacidad de discriminación, reduciendo los costos de recursos de cómputo en los procesos de clasificación. Finalmente 157 firmas quedaron validadas.

Ecuación de divergencia de Jeffries-Matusita:

$$D = \frac{1}{8} (\mu_i - \mu_j)^T \left( \frac{C_i + C_j}{2} \right)^{-1} (\mu_i - \mu_j) + \frac{1}{2} \ln \left( \frac{|C_i + C_j| \cdot 2}{\sqrt{|C_i| \times |C_j|}} \right)$$

$$JM_{ij} = \sqrt{2(1 - e^{-D})}$$

Donde:

$i$  y  $j$  = las dos firmas (clases) a ser comparadas

$C_i$  = la matriz de covarianza de la firma  $i$

$C_j$  = la matriz de covarianza de la firma  $j$

$\mu_i$  = el valor promedio de la firma  $i$

$\mu_j$  = el valor promedio de la firma  $j$

$\ln$  = la función de logaritmo natural

$|C_i|$  = la determinante de  $C_i$  (álgebra matricial)

$|C_j|$  = la determinante de  $C_j$  (álgebra matricial)

#### 4.6.5. Clasificación de imagen Landsat-ETM+ 2000

Una vez evaluadas la firmas y seleccionadas sólo aquellas que mostraron ser representativas e independientes, se procedió a realizar la clasificación de la imagen Landsat-ETM+ del 2000, utilizando la regla de decisión o algoritmo de clasificación de "Máxima Verosimilitud" (Maximum Likelihood), el cual tiene como ventajas el ser uno de los más precisos, toma en cuenta la variabilidad dentro de cada clase y puede dar peso a cada clase según su probabilidad. Sus desventajas son, el tener firmas paramétricas, requiere de mayor tiempo y recursos de cómputo (Swain *et al.* 1978).

Ecuación del algoritmo de clasificación de "Máxima Verosimilitud" (Maximum Likelihood)

$$D = \ln(\alpha_c) - (0.5 \ln(|Cov_c|)) - (0.5 (X - M_c)^T (Cov_c^{-1} - I) (X - M_c))$$

Donde:

$D$  = verosimilitud (distancia)

$c$  = una clase en particular

$X$  = distancia entre el valor del píxel candidato y el valor promedio de la clase

$M_c$  = promedio de los valores de la clase  $c$

$\alpha_c$  = porcentaje de probabilidad de que cada píxel candidato sea un miembro de la clase  $c$

$Cov_c$  = matriz de covarianza de los píxeles en la clase  $c$

$|Cov_c|$  = determinante de  $Cov_c$  (álgebra matricial)

$Cov_c^{-1}$  = inversa de la  $Cov_c$  (álgebra matricial)

$\ln$  = función de logaritmo natural

$T$  = función de transposición (álgebra matricial)

Como resultado de este proceso se obtuvo la cobertura forestal actual de alta definición, clasificada por tipos de vegetación y uso de suelo del área de estudio. Su evaluación se realizó mediante una matriz de confusión, utilizando el conjunto de sitios previamente establecidos durante el trabajo de campo.

#### **4.7. Estimación de densidad de la masa forestal**

Una vez realizada la clasificación de tipos de cobertura forestal, el siguiente paso es la estimación de la densidad dentro de los mismos, resultado de aprovechamientos forestales, condiciones naturales, o consecuencia de diferentes agentes de deterioro presentes en las áreas forestales de México.

Para el área de estudio se calcularon:

- 1.- el índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI).
- 2.- la banda número dos del Análisis de Componentes Principales.
- 3.- la dimensión de Verdor (Greenness) de Tasseled Cap.

Posteriormente se compararon contra el índice de sitio, cobertura de copas, índice de densidad de Reineke, ICA e IMA registrado en los inventarios de subrodales productivos y se calcularon sus coeficientes de correlación para la cuarta anualidad, la cual era la siguiente a intervenir y mostraba la mejor caracterización en cobertura vegetal. *Para mayor información vea Anexo III Métodos alternos para evaluación de Cobertura Vegetal.*

#### **4.8. Análisis de la dinámica regional y sus impactos**

Se utilizaron un total de tres imágenes de satélite Landsat, dos de las cuales son del barredor multiespectral (MSS) del programa NALC (North American Land Characterization) y una del mapeador temático (ETM+), órbita 31, fila 44 del 03 de marzo de 1973, 10 de marzo de 1983 y 03 de marzo de 2000.

##### **4.8.1. Evaluación multitemporal**

La comparación multitemporal de imágenes Landsat del área de estudio sirve para estimar el avance del grado de deterioro al que ha estado sometida durante los últimos 27 años (1973 – 1983 - 2000).

Para reducir las variaciones de escena a escena por geometría solar, humedad del suelo, condiciones atmosféricas y diferencias por fenología vegetal, las imágenes procesadas fueron capturadas en el mes de marzo.

El análisis consistió en evaluar los cambios de cobertura vegetal, para ello se calculó el Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI) en las tres

imágenes. Debido a la diferencia en resolución espacial entre los sensores MSS (60x60 m) y TM (30x30 m), se remuestreó la imagen TM original de 2000, incrementando su tamaño de píxel hasta igualarla con las MSS.

Las ventajas de realizar comparaciones multitemporales con índices de vegetación, son principalmente el hecho de que se minimizan las variaciones por condiciones de iluminación local, su correlación existente con el índice de área foliar y/o índice de densidad de copas, salud y vigor, estimación de biomasa verde, así como su facilidad y rapidez de cálculo. Pueden ser calculados con cualquier tipo de imagen que tenga al menos una banda en la región del rojo y una en la región del infrarrojo.

Una técnica de calibración radiométrica fue aplicada a cada banda de cada imagen. Esta incorporó métodos de regresión lineal reportados por Eckhardt *et al.*, 1990 y Jensen *et al.*, 1995. La imagen Landsat-ETM+ de 2000 fue utilizada como imagen base para normalizar los valores de las imágenes de 1973. El proceso de la normalización de histogramas fue seleccionar áreas con valores extremos (valores muy bajos como agua, y valores muy altos como suelos desnudos) para tener igualdad y poder calibrar los valores digitales.

Una vez normalizadas las imágenes se calculó el NDVI, la ecuación utilizada es una variante de la originalmente propuesta, el propósito de la misma es cambiar los valores originales obtenidos de -1 a +1, para transformarlos a valores de 0 a 255 y obtener como resultado una imagen de 8 bits.

$$\text{NDVI} = \left[ \frac{\text{IR} - \text{R}}{\text{IR} + \text{R}} + 1 \right] \times 127$$

Donde:

NDVI = Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación

IR = Valor en la región del infrarrojo de cada píxel de la imagen

R = Valore en la región del rojo de cada píxel de la imagen

Una vez calculado los valores de NDVI de cada imagen, estos fueron agrupados en 50 clases mediante un proceso de clasificación no supervisada con el algoritmo de ISODATA de Imagine ERDAS. Estos valores fueron categorizados en 7 tipos de densidad, muy alta, alta, media alta, media, media baja, baja, y muy baja, basados en los muestreos de campo y la distribución de valores en el histograma NDVI, separando cada tipo a partir de la media  $\pm 0.5$  el valor de la desviación estándar.

El resultado de los 7 tipos de densidad de cada imagen fueron integrados en una sola imagen de tres capas tipificando los tipos de densidad de vegetación de cada imagen, donde la primera capa corresponde a NDVI 1973, la segunda a NDVI 1986 y la tercera a NDVI 2000.

Las áreas que registraron los mismos valores de densidad en las tres fechas analizadas quedaron clasificadas como no alteradas o sin cambio alguno. En cambio, las áreas que registraron disminución en sus valores de densidad quedaron clasificadas dependiendo del grado de disminución como deforestado o muy deforestado. Por el contrario, las áreas que registraron incremento en sus valores de densidad quedaron clasificadas dependiendo del grado de incremento como reforestado o muy reforestado.

---

#### **4.8.2. Modificación de escurrimientos por deterioro de la cobertura forestal**

A partir del MDE se elaboró un modelo hidrológico, el cual se desarrolla mediante varios procesos:

**Corrección de MDE:** para realizar de forma adecuada una modelación hidrológica, el MDE debe de ser revisado, ya que existen celdas cuyo valor presenta inconsistencias (errores) de valor, debido principalmente a la resolución espacial y por redondeos de valores enteros (Hutchinson, 1988). Esto genera un conjunto de pequeñas depresiones y crestas a corregir para asegurar la adecuada delimitación y trazo de áreas de captación y cauces. De lo contrario, los cauces modelados presentan una red de drenaje segmentada (discontinua) y la delimitación de cuencas sería imposible.



**Dirección de flujo:** a partir del MDE corregido, se determina la dirección de los escurrimientos para cada celda, esto es, en que dirección se movería el agua captada en dicha celda. Es un proceso que utiliza las mismas bases con las que se calcula la orientación de las pendientes o exposición.

**Flujo acumulativo:** para este punto se tomó como base la subcuenca del Río Baluarte, se delimitó su área de captación y se revisó la información registrada en la carta hidrológica de aguas superficiales F13-2, escala 1:250,000 de INEGI, referente a los datos de las estaciones meteorológicas e hidrométricas ubicadas en el ejido Pueblo Nuevo, con las que se calculó el promedio de precipitación media anual en la cuenca. Al multiplicar la superficie calculada de la cuenca, por la precipitación media anual se obtuvo el volumen promedio anual de lluvia captada, el cual, al compararse con el volumen medio anual drenado se obtiene el coeficiente medio de escurrimiento de la cuenca.

**Modelo de distribución de la precipitación media anual:** utilizando la información temática de isoyetas, misma que fue interpolada y transformada a formato raster mediante el algoritmo TOPOGRIG de ARC/INFO, resultando en una matriz con valores de precipitación media anual gradados de forma continua, con el mismo número de columnas y renglones a los modelos digitales de elevación y a las imágenes Landsat.

Los valores de precipitación media anual modelados para cada píxel fueron convertidos de milímetros a metros y multiplicados por la superficie en metros cuadrados ( $225 \text{ m}^2$ ), para de esta forma calcular el volumen de precipitación media anual captada en metros cúbicos en cada píxel.

El siguiente paso es determinar el coeficiente de escurrimiento, este valor es, el porcentaje del agua captada por unidad de área (píxel) que no es infiltrada en el suelo y escurre superficialmente a otros puntos de la cuenca, las tablas de escurrimiento ponen especial énfasis en el uso de suelo y cobertura vegetal existente, como el factor de mayor influencia en las ecorrientías (Chow *et al.* 1988). Dado que los valores climáticos e hidrométricos datan de 1973, se trabajó con la imagen Landsat-MSS de 1973, la cual fue recortada, extrayendo sólo el área de la subcuenca del Río Baluarte y se calculó el Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI) para dicha zona, como indicador de la

densidad de cobertura vegetal, dada su importancia en el proceso de escurrimiento pues afecta la infiltración, erosión y evapotranspiración.

Posteriormente se compararon los valores de NDVI, con los citados en la tabla de coeficientes de escurrimiento de Chow *et al.* 1988, para determinar la ecuación polinomial de ajuste entre estos valores, de tal forma que el máximo valor de NDVI coincida con un índice de escurrimiento de 0.20 (el mínimo para áreas boscosas), el valor promedio de NDVI coincida con el índice de escurrimiento medio para toda la cuenca, y el mínimo valor de NDVI coincida con un índice de escurrimiento de 0.99 (en las laderas rocosas de escasa vegetación).

La **ecuación de ajuste** calculada fue aplicada a los valores de NDVI que cubren la totalidad del ejido Pueblo Nuevo, resultantes de las imágenes Landsat MSS de 1973 y Landsat-ETM+ de 2000. Para de esta forma obtener los índices de escurrimiento para el área de estudio en las dos fechas.

Estos índices fueron aplicados a los valores de escurrimiento potencial o volumen medio anual captado calculado en cada píxel y así determinar el valor de escurrimiento neto por píxel en metros cúbicos, para a continuación aplicar el algoritmo de flujo acumulado.

Adicionalmente se calculó para cada píxel la **distancia que el escurrimiento** tiene que recorrer siguiendo los cauces hasta la salida de la subcuenca (distancia de flujo), a partir del cual se puede calcular el tiempo de concentración de los escurrimientos (Talboton *et al.* 1991).

Para la elaboración de **hidrogramas** se graficó en el eje de las X la distancia de flujo (tiempo de concentración) y en el eje de la Y el volumen de escurrimiento neto promedio anual en  $m^3$ , mismos que fueron comparados para evaluar el grado de deterioro en términos hidrológicos.

Para obtener el indicador del **grado de riesgo** en microcuencas se utilizó el índice de compacidad. Este índice es la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo que tenga la misma área de la cuenca.

Cuando la forma de la cuenca es circular registra fuertes caudales y tiempos de concentración muy cortos, más aún cuando disminuye su cobertura forestal y se incrementa el índice de escurrimiento, aumentando su peligrosidad aguas abajo.

Para obtener el valor de compacidad se utiliza la siguiente fórmula:

$$K = \frac{P}{P_e}$$

Donde:

K = Índice de compacidad

P = Perímetro de la cuenca

P<sub>e</sub> = Perímetro de un círculo

Mediante una transformación de las variables se obtiene una fórmula alternativa:

$$K = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Donde:

K = Índice de compacidad

P = Perímetro de la cuenca

A = Área de la cuenca

Cabe señalar que los perímetros y áreas son para microcuencas completas, independientemente de que parte de ellas estén fuera del área estudio. Esto es para obtener valores reales de las mismas.

Los resultados son utilizados para determinar el impacto de la deforestación a los coeficientes de escurrimiento y el incremento en los volúmenes de avenidas, los cuales permiten determinar cuales cuencas requieren de mayor atención para orientar los esfuerzos de conservación. *Para mayor información vea Anexo IV Modelación Hidrológica.*

#### **4.8.3. Análisis de distribución de la población y sus actividades respecto a la problemática de subcuencas en el ejido Pueblo Nuevo.**

Para este tipo de análisis se integró la información por localidad del conteo de población y vivienda de 1995 y el censo de población y vivienda de 2000, ambos en formato tabular con coordenadas geográficas de cada localidad. Los cuales fueron ubicados mediante la utilería de creación de temas de eventos de Arc/View 3.2. Una vez integradas las bases de datos se calculó la diferencia de población entre ambas fechas para determinar los cambios demográficos y ser categorizadas como atractoras (+) o expulsoras (-). Así mismo, las condiciones del deterioro de las submicrocuencas en las que se encuentran ubicadas.

#### **4.9. Modelo de estratificación de la masa forestal (rodalización)**

El manejo forestal, reconoce a las submicrocuencas como la unidad hidrológica elemental utilizada como marco para la evaluación, acotamiento y monitoreo del posible impacto ambiental generado por los aprovechamientos forestales. Con base en ello el primer paso fue integrar la información de submicrocuencas modeladas, documentado con anterioridad en este documento.

Otro de los factores determinantes en la distribución de los tipos de vegetación en la región, es la exposición u orientación de la pendiente, la cual genera condiciones microclimáticas que favorecen el establecimiento de ciertas comunidades.

Por tal motivo se analizó la posible influencia de la exposición en los patrones de distribución preferenciales de los tipos de vegetación y usos de suelo resultado de la clasificación de la imagen Landsat-ETM+, contra el modelo de exposiciones.

Para ello se utilizó la información del modelo de exposiciones de esta metodología. Se reconocieron dos patrones preferenciales de distribución, se modificó el modelo de exposiciones de ocho originalmente generados (8 puntos cardinales) a dos preferenciales.

Esta información en formato raster fue vectorizada, e integrada al de submicrocuencas modeladas para generar el archivo de rodales modelados mediante el algoritmo UNION de Arc/Info®.

El resultado de la clasificación de la imagen Landsat-ETM+ de 2000 en formato raster fue filtrada mediante una ventana de 3x3 píxeles y el criterio de mayoría para limpiarla de píxeles aislados y permitir mejor definición de las comunidades, para luego ser transformada a formato vector, y de esta forma ser integrada a los rodales modelados para así obtener los subrodales.

Estos a su vez fueron filtrados de nuevo para eliminar polígonos menores a 2 hectáreas (tamaño mínimo de subrodal preestablecido por STFPN) mediante el algoritmo ELIMINATE de Arc\_Info®.

Las principales diferencias entre el método tradicional y el que aquí se propone se muestran en la tabla 16.

Característica	METODO	
	Tradicional	SR/SIG
<b>1. Percepción Remota</b>		
Distorsión	Fuerte (corrección muy laboriosa)	Muy débil (corrección sencilla)
Resolución Espacial	de 2 a 5 metros	15 a 30 metros
Resolución Espectral	Pancromática	Pancromática, 3 visibles, 3 infrarrojas.
Capacidad Óptica	64 tonos de grises	7 bandas (0 a 255 c/u)
Sistema de Coordenadas	Difícil definición y transformación	Fácil definición y transformación
Cobertura	Limitada	Muy amplia
Evaluación de Vegetación	cada inventario (10 años)	cada 16 días (multitemporal)
<b>2. Trazo de polígonos</b>		
Definición de pendiente, exposición, cuencas, cauces y subrodales.	Fotointerpretación (a criterio)	Analítica
Cálculo de distancia y superficie	Curvimetro, malla, planimetro.	Analítica
Modelado	Difícil implementación	Fácil y repetible

Tabla 16. Principales ventajas y desventajas entre métodos.

Con el propósito de evaluar la definición de subrodal digitalizados con el método tradicional y los modelados con el método desarrollado en el presente trabajo, se calculó la variación de clases dentro de cada subrodal, y el promedio de varianzas de todos los subrodal

#### 4.9.1. Definición de zonas de protección dentro del subrodal (segregación)

De forma complementaria se utilizó la información de INEGI 1:50,000 sobre vías de comunicación, líneas de transmisión y red de cauces modelada, para a partir de ellos, trazar sus zonas de influencia, protección o políticas de manejo (tabla 17), calculando su longitud y densidad para posteriormente ser segregada de los subrodal.

Característica	Distancia de segregación a cada lado
Escurrimientos superficiales	12.5 metros
Terracería y Brechas	8 metros
Veredas	6 metros
CFE Alta tensión	40 metros
CFE, Telmex	25 metros

Tabla 17. Valores para definir superficies de segregación en subrodal.

#### 4.10. Integración de información modelada a la dasocrática existente

La información resultante de geología, edafología, así como la modelación de altura sobre el nivel del mar, pendiente, exposición, temperaturas, precipitación, cuencas, subcuencas, microcuencas, submicrocuencas, cauces, uso de suelo y vegetación actual, densidad actual y variaciones temporales de la misma, infraestructura de caminos y líneas de transmisión fueron integrados para cada subrodal.

La información de geología, edafología, cuencas, subcuencas, microcuencas, submicrocuencas, uso de suelo y vegetación actual, fueron determinadas por el valor estadístico de moda, o el valor mas frecuentemente encontrado dentro de cada subrodal. La información de altura sobre el nivel del mar, pendiente,

exposición, temperaturas, precipitación, fueron determinados por el valor estadístico de la media aritmética de los valores contenidos en cada subrodal.

La información de cauces, caminos y líneas de transmisión, fueron determinadas mediante la sumatoria de longitud de cada uno de los tramos contenidos dentro del área de cada subrodal, para posteriormente calcular la densidad de los mismos. Por último, la información de densidad actual y variaciones temporales de la misma, fueron integradas por categorías en campos independientes por año de escena.

A continuación se describe de forma esquemática, cada uno de los procesos realizados en el desarrollo de la presente investigación y se muestran de forma esquemática en la figura 14.

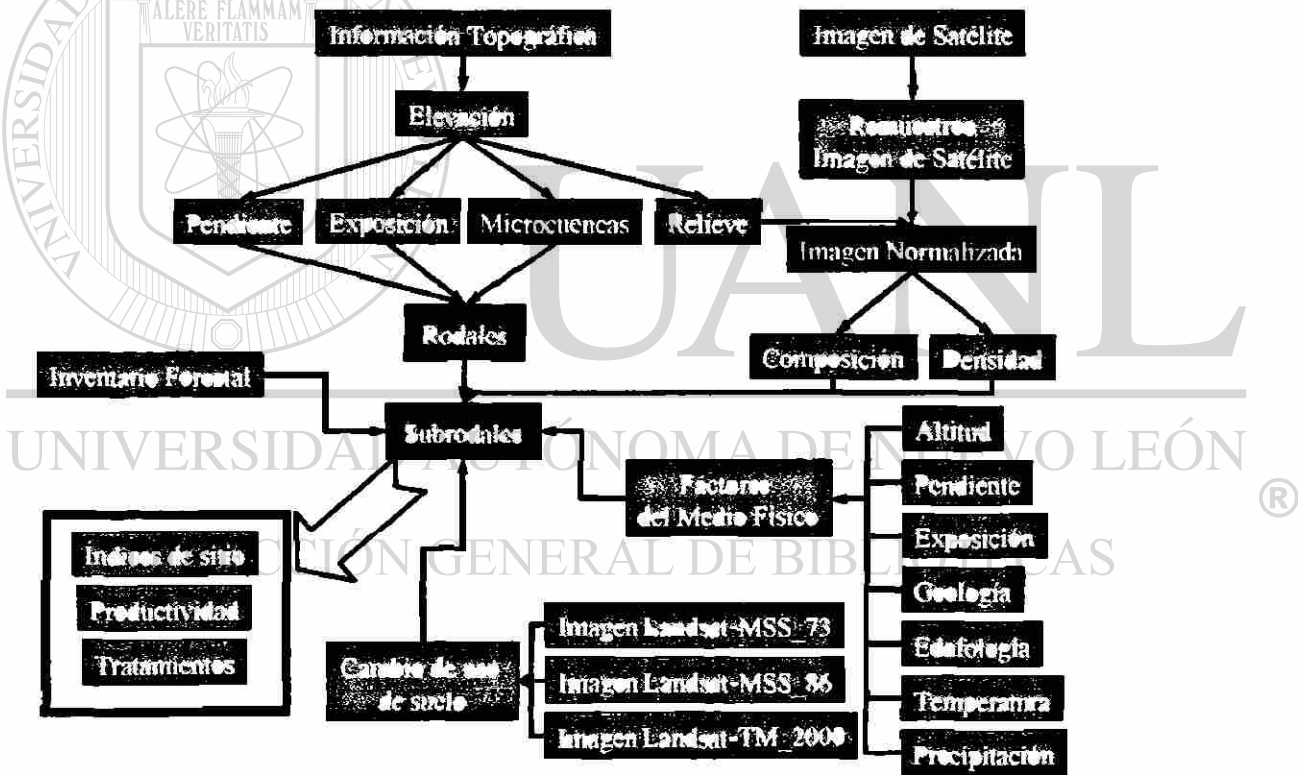


Figura 14. Esquema de procesos desarrollados de la presente investigación.

## 5. Resultados

### 5.1. Modelo Digital de Elevación

Modelo Digital de Elevación (MDE) con un tamaño de celda de 15x15 metros en una matriz de 4,261 columnas y 4,314 renglones (figura 15).

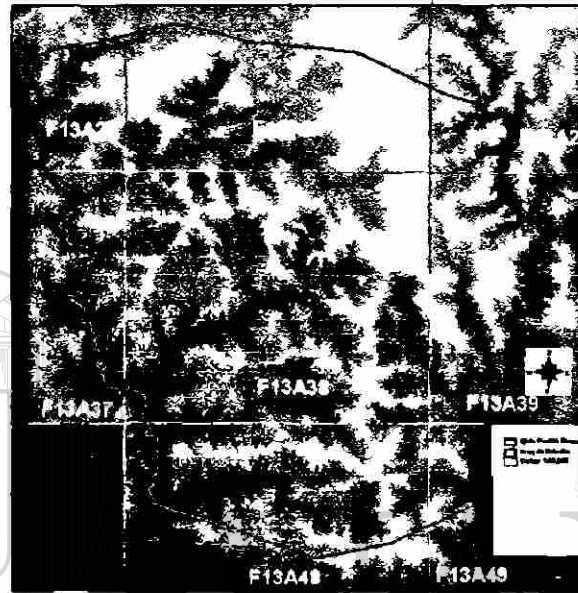


Figura 15. Modelo Digital de Elevación de la zona de estudio.

### 5.2. Pendiente

El Resultado del cálculo de superficie ocupada por cada rango de pendiente se cuantifica porcentualmente (tabla 18). Casi el 70% de la superficie se encuentra en pendientes de escarpadas a muy escarpadas, mientras que la superficie ocupada por terrenos planos es casi nula.

Pendiente	% de cobertura
Plana	0.43
Rel. Plana	5.18
Media	7.04
Fuerte	18.30
Escarpada	22.65
Muy Escarpada	46.39

Tabla 18. Porcentajes de pendiente en la zona de estudio.

Los mayores grados de inclinación se ubican con marcada tendencia hacia el sur y suroeste, con pendientes muy escarpadas, con algunas áreas de



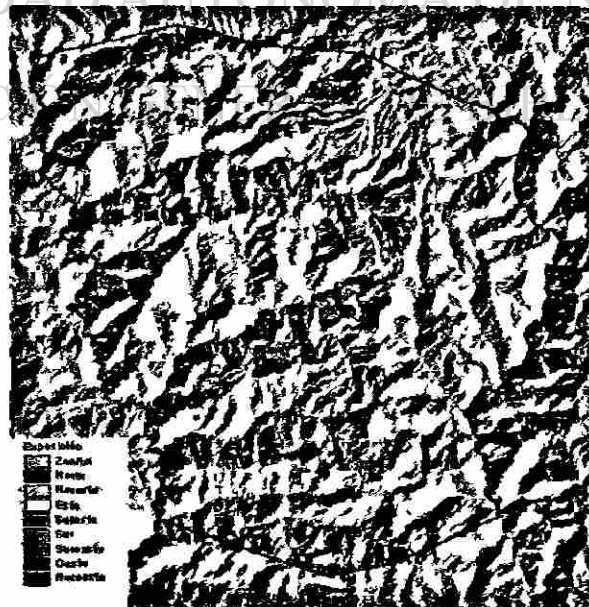
escapadas a fuertes, en cambio, la topografía del terreno es menos abrupta hacia el norte y noreste del área de estudio, donde se encuentran las pendientes medias y relativamente planas (figura 16).



*Figura 16. Distribución de la pendiente en la zona de estudio.*

### **5.3. Exposición**

Como puede apreciarse en la figura 17 el área de estudio presenta una gran variedad de exposiciones y no existe una dominancia definida.



*Figura 17. Distribución de exposiciones en la zona de estudio.*

#### **5.4. Determinación de la cobertura forestal actual**

El resultado del procesamiento geométrico aplicado a la imagen Landsat-ETM+, se obtuvo una imagen multiespectral de 6 bandas (3 visibles y 3 infrarrojas), con una resolución espacial de 30x30 metros, y una pancromática con resolución espacial de 15x15 metros (figuras 18 y 19).



*Figura 18. Imagen Landsat-TM Original, composición de falso color TM4-R, TM5-V, TM3-A.*



*Figura 19. Imagen Landsat-Pancromática Original.*

#### 5.4.1. Procesamiento de imágenes Landsat.

De la aplicación del procesamiento espacial para mejorar la resolución y obtener una imagen multispectral con resolución espacial de 15x15 se presenta en la figura 20.

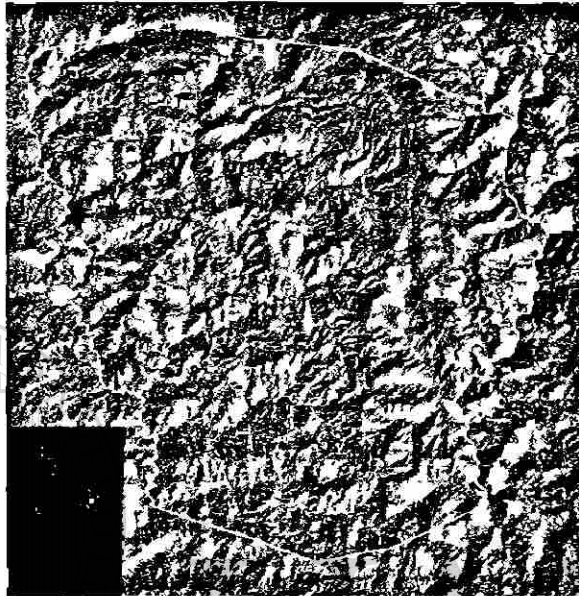


Figura 20. Imagen Landsat-ETM+ remuestreada composición de falso color TM4-R, TM5-V, TM3-A.

El procesamiento espectral de normalización topográfica requiere de un modelo de iluminación atendiendo a las variables de azimut y elevación solar (figura 21), el cual fue integrado para probar cuatro diferentes modelos de corrección.

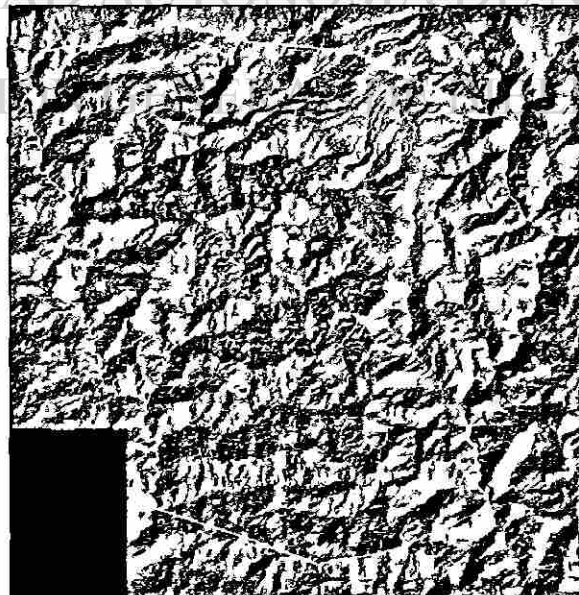


Figura 21. Modelo de iluminación

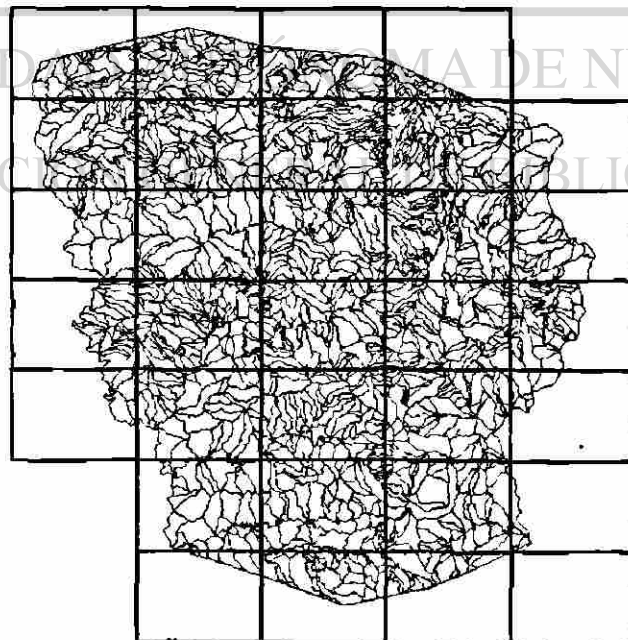
Derivado del análisis anterior y aplicando el modelo modificado de Civco, 1989, se presenta a la imagen Landsat-ETM+ de la figura 22.



*Figura 22. Imagen landsat-ETM+ remuestreada y normalizada*

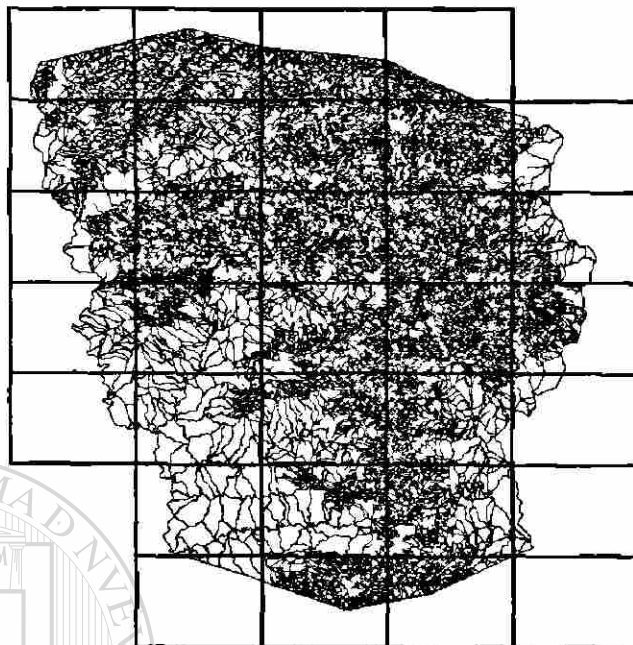
#### **5.4.2. Integración de información dasocrática existente**

La cobertura digital para rodales con 1,402 polígonos (figura 23).



*Figura 23. Cobertura digital de la información dasocrática de rodales.*

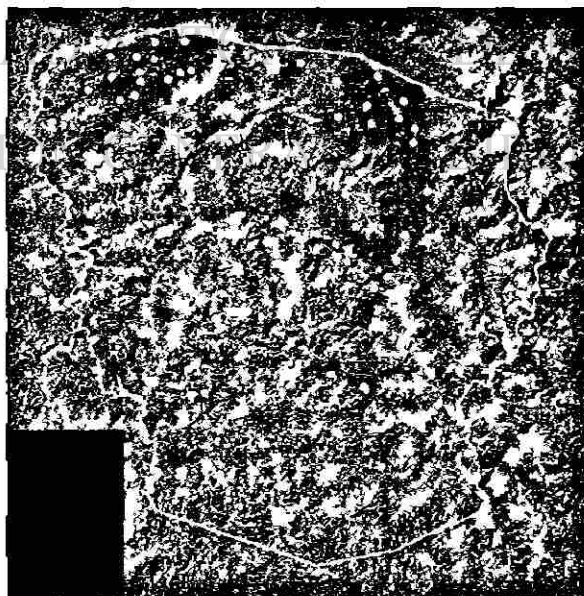
La cobertura digital para subrodiales con 14,092 polígonos (figura 24).



*Figura 24. Cobertura digital de la información dasocrática de subrodiales.*

### **5.4.3. Selección de áreas para muestreo de campo**

Ubicación de las 62 zonas de muestreo para los 16 tipos de vegetación y uso de suelo (figura 25).



*Figura 25. Ubicación de las 62 zonas de muestreo para la definición de polígonos de entrenamiento.*

#### 5.4.4. Firmas espectrales y validación

Para mostrar los resultados el análisis de firmas espectrales, se generaron tres grupos:

- Grupo con tipo de vegetación de clima templado (figura 26)
- Grupo con tipo de vegetación de clima cálido (figura 27)
- Grupo con otros tipos de vegetación o uso de suelo (figura 28)

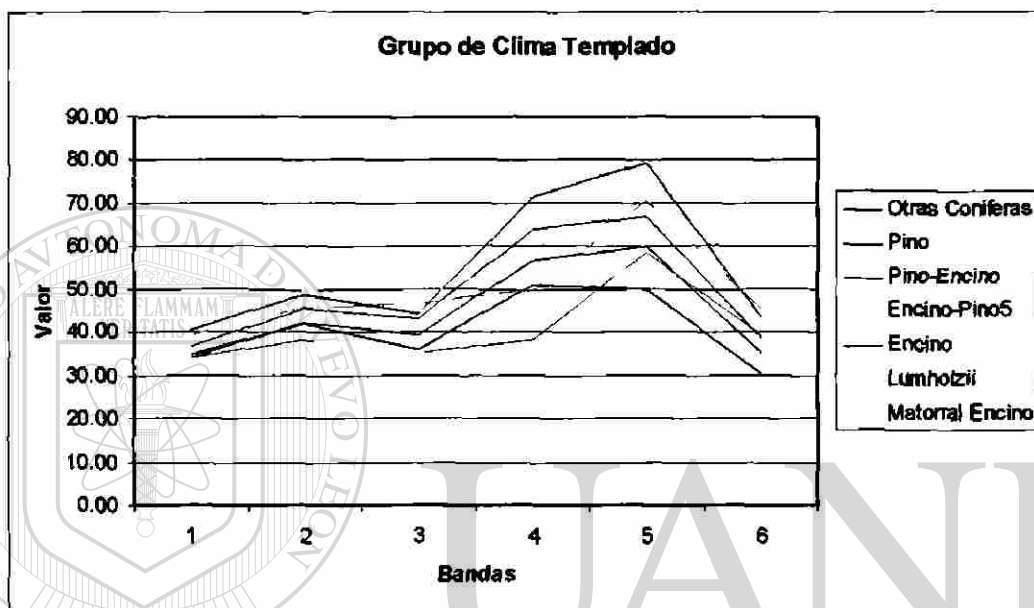


Figura 26. Patrón digital para cada tipo de vegetación del grupo de clima Templado.

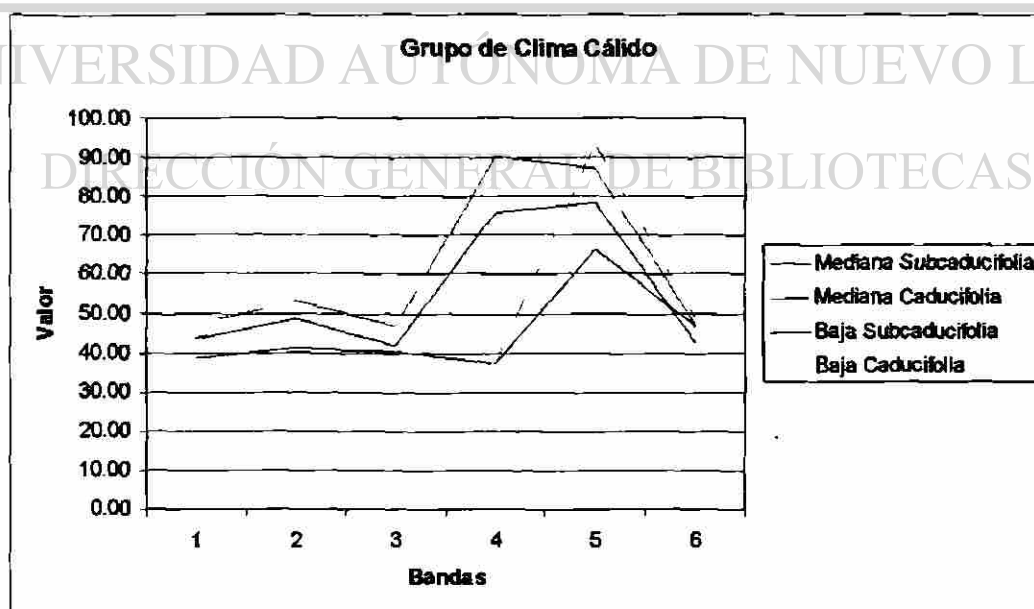


Figura 27. Patrón digital para cada tipo de vegetación del grupo de clima Cálido.

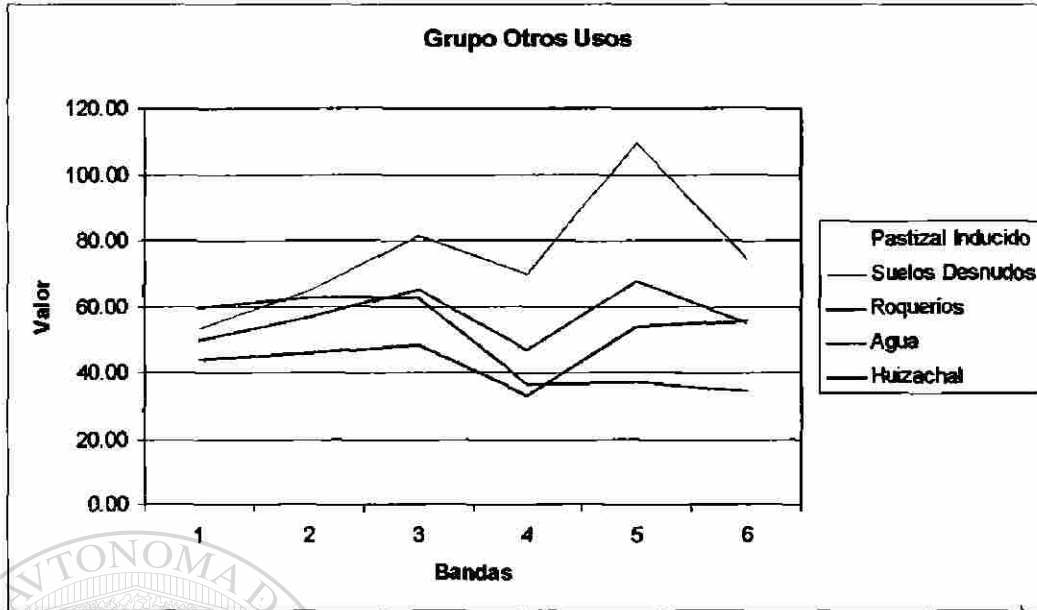


Figura 28. Patrón digital para otros tipos de vegetación y usos de suelo.

#### 5.4.5. Clasificación de imagen Landsat-ETM+ 2000

Se procesó la imagen Landsat-ETM+ en dos sistemas de clasificación:

- Atendiendo a los tipos de vegetación y uso de suelo descritos en la información cartográfica digital del Inventario Nacional Forestal 2000, para su posterior comparación (figura 29).
- Atendiendo a las necesidades de clasificación de vegetación y usos de suelo de los prestadores de servicios técnicos forestales del ejido Pueblo Nuevo (figura 30).

Entre los resultados que más destacan (tabla 19) es el haber alcanzado un 94.16% de precisión en la clasificación general y 95.44% promedio por clase, derivado del proceso espacial y espectral aplicados a la imagen. Casi todas las clases sobrepasaron el 90% de precisión, con excepción del bosque de pino-encino con 85.98% y bosque de encino con 77.28%

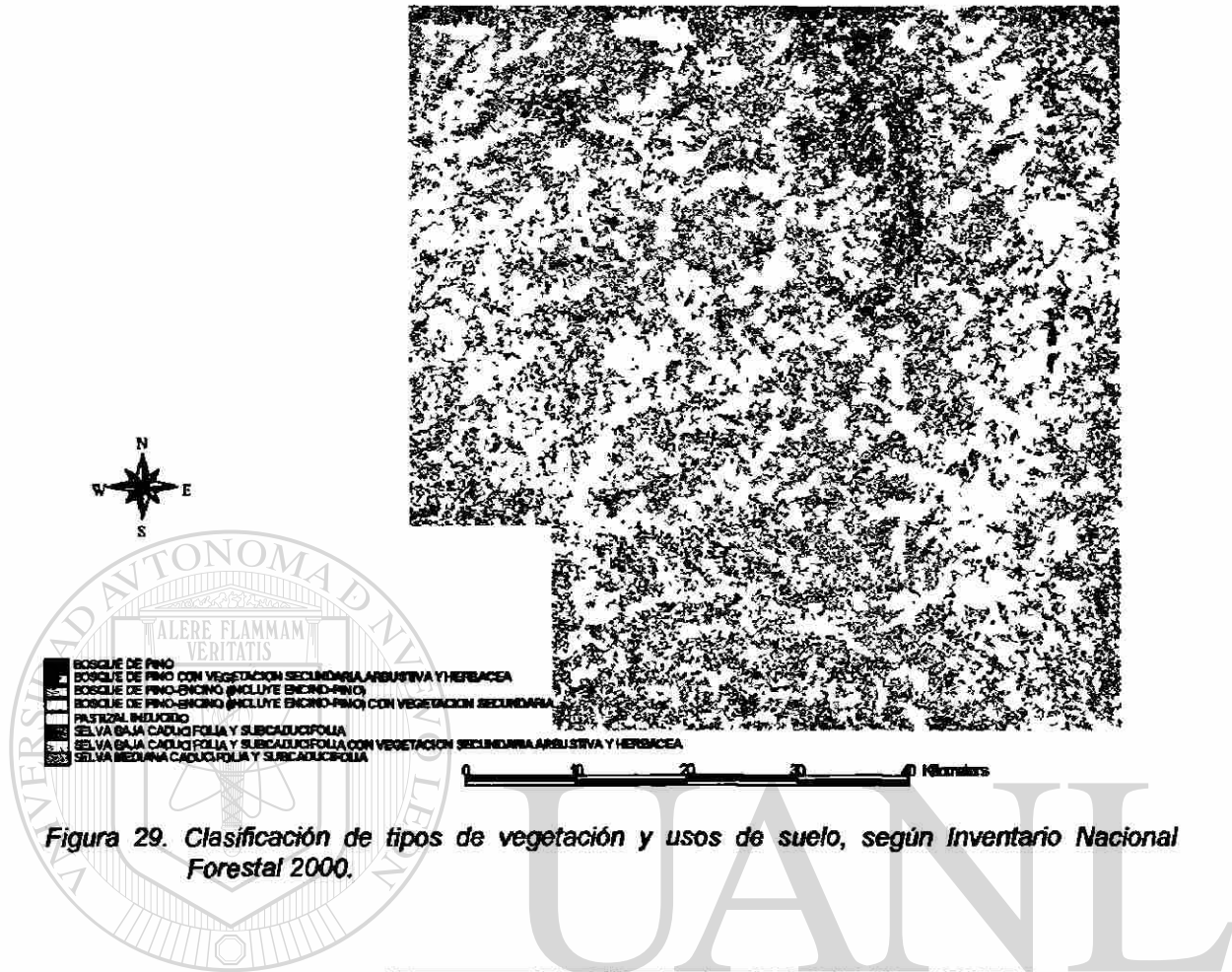


Figura 29. Clasificación de tipos de vegetación y usos de suelo, según Inventario Nacional Forestal 2000.

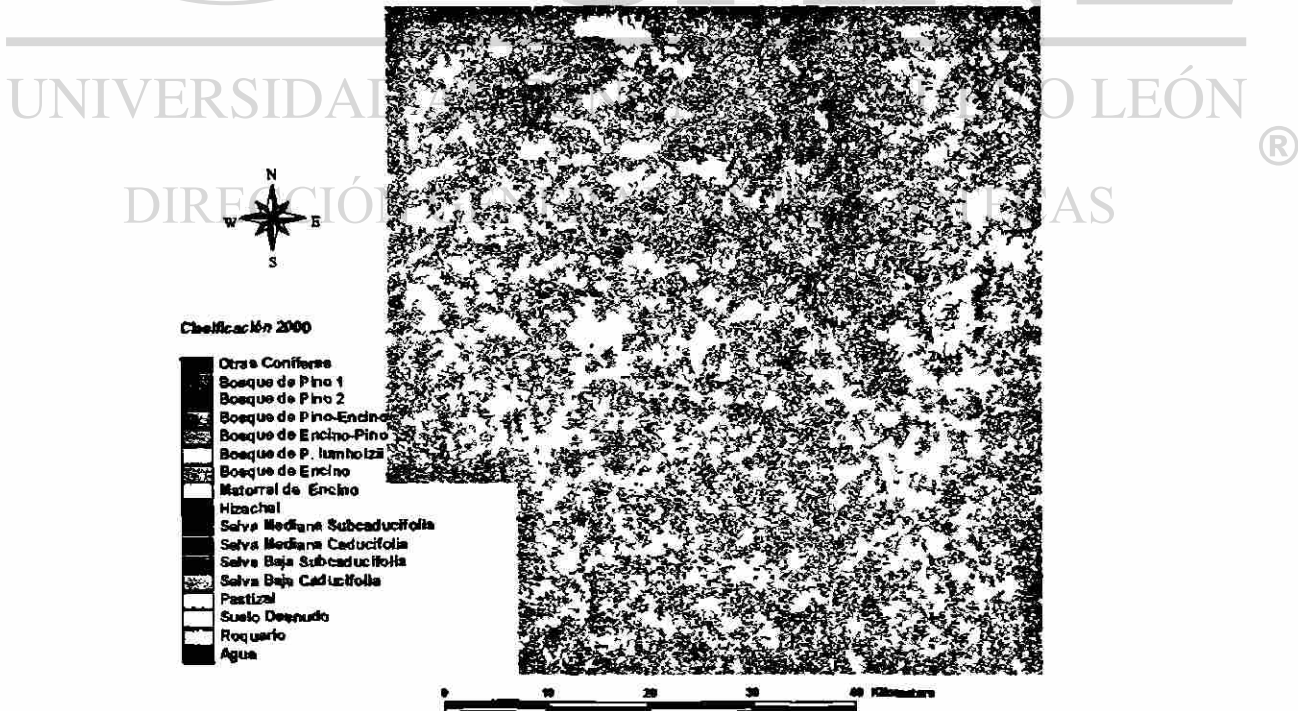


Figura 30. Clasificación de tipos de vegetación y usos de suelo para el ejido Pueblo Nuevo.



Valores Clasificados	Valores de Confusión													Sum. Col.	Sum. Dias	Sum %	Presión Total	Presión Prom. Clase
	DC	P1	P2	P0	OP	PL	D	MD	Huz	SMS	SMC	SBS	SBC					
DC	2742	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P1	97	7220	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P2	0	0	2283	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P0	0	0	0	6332	0	0	1580	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
OP	0	0	0	0	3570	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PL	0	0	0	0	0	71	5113	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D	0	0	0	0	0	292	14824	238	0	177	300	0	0	0	0	0	0	0
MD	0	0	0	0	0	0	150	5550	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Huz	0	0	0	0	0	0	0	0	1375	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SMS	0	0	0	0	0	0	0	379	79	3520	18	0	0	0	0	0	0	0
SMC	0	0	0	0	0	0	0	2081	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SBS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12580	0	0	0	0	0	0
SBC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9062	0	0	0	0	0
P.Mt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	63	4583	0	0	0
Sb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7909	0	0
R	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20270	0
A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Total</b>	<b>2887</b>	<b>7370</b>	<b>2407</b>	<b>6601</b>	<b>4392</b>	<b>6342</b>	<b>19236</b>	<b>5865</b>	<b>1375</b>	<b>3703</b>	<b>9107</b>	<b>12747</b>	<b>9724</b>	<b>4083</b>	<b>7910</b>	<b>20204</b>	<b>284</b>	<b>284</b>
<b>Presión Clase</b>	<b>2742</b>	<b>7220</b>	<b>2283</b>	<b>6332</b>	<b>3570</b>	<b>5113</b>	<b>14824</b>	<b>5550</b>	<b>1375</b>	<b>3520</b>	<b>18</b>	<b>12580</b>	<b>9062</b>	<b>4083</b>	<b>7909</b>	<b>20270</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>%</b>	<b>95.31%</b>	<b>97.67%</b>	<b>94.93%</b>	<b>90.29%</b>	<b>80.88%</b>	<b>80.71%</b>	<b>77.28%</b>	<b>84.27%</b>	<b>100.00%</b>	<b>95.22%</b>	<b>99.12%</b>	<b>99.26%</b>	<b>99.30%</b>	<b>100.00%</b>	<b>99.80%</b>	<b>99.91%</b>	<b>100.00%</b>	<b>100.00%</b>
													<b>2753.07</b>	<b>123.652</b>	<b>116.971</b>	<b>1022.42%</b>	<b>94.16%</b>	<b>95.44%</b>
													<b>Superficie Total Muestreada (Hac.)</b>					

Tabla 19. Matriz de confusión para evaluar la precisión de clasificación.

### 5.5. Estimación de densidad de la masa forestal

A continuación se muestran los resultados de a).- Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI, figura 31), b).- la segunda banda del Análisis de Componentes Principales (PCA2, figura 32), y c).- la dimensión de verdor (Greenness) de Tasseled Cap (figura 33).

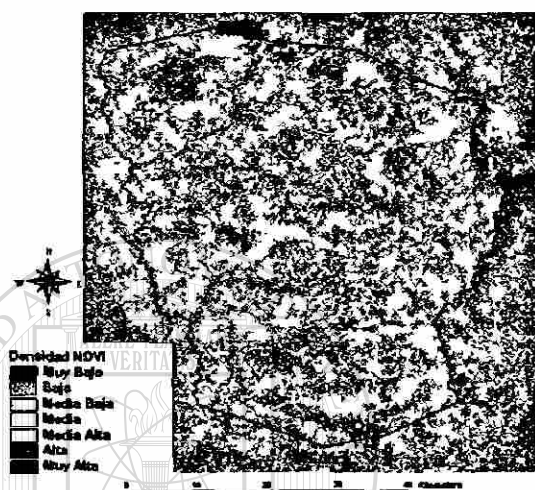


Figura 31. Densidad con NDVI.

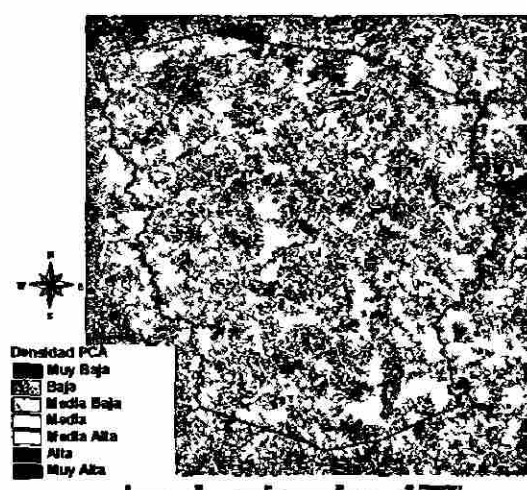


Figura 32. Densidad con PCA2.

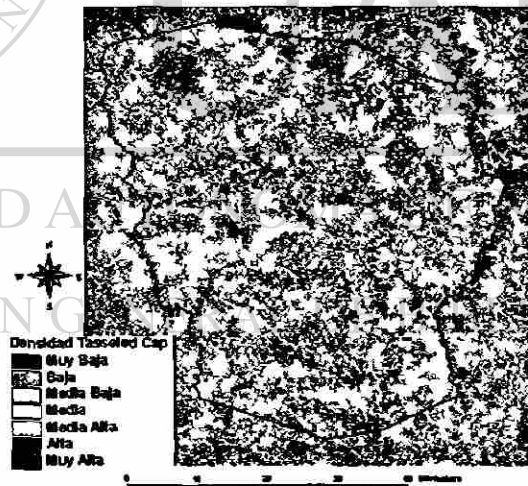


Figura 33. Densidad con Tasseled Cap.

En la tabla 20 se muestran los valores de correlación entre el índice de Reineke y los tres índices de cobertura vegetal comúnmente utilizados en percepción remota para evaluar densidad. Adicionalmente se evaluó la correlación entre índices de cobertura vegetal para determinar su posible diferenciación, (tabla 21).

Coeficientes de Correlación			
Año	NDVI	PCA2	Tasseled Cap
1	0.37283206	0.34834030	0.42024600
2	0.30427267	0.28087765	0.36011808
3	0.44306673	0.41909250	0.49918614
4	0.46726073	0.45968050	0.49654258
5	0.41635386	0.37066868	0.44481505
6	0.41271444	0.38297035	0.43597410
7	0.45282127	0.41601313	0.47873176
8	0.44588651	0.42569650	0.44662114
9	0.38905774	0.36021440	0.42378076
10	0.34856479	0.32864611	0.35302463

Tabla 20. Coeficientes de correlación entre el índice de densidad de Reineke y distintos Índices común mente utilizados en percepción remota para evaluar la cobertura vegetal.

	NDVI-PCA2	NDVI-Tass	PCA2-Tasseled
Coef de Correlación	0.92316994	0.94592794	0.94751718
Coef R <sup>2</sup>	0.85224274	0.89477968	0.89778880

Tabla 21. Coeficientes de correlación y R<sup>2</sup> entre índices de densidad calculados.

La densidad de cobertura vegetal Tasseled Cap, se comparó para cada tipo de vegetación y uso de suelo y sus resultados se muestran en forma porcentual respecto del total en la figura 34.

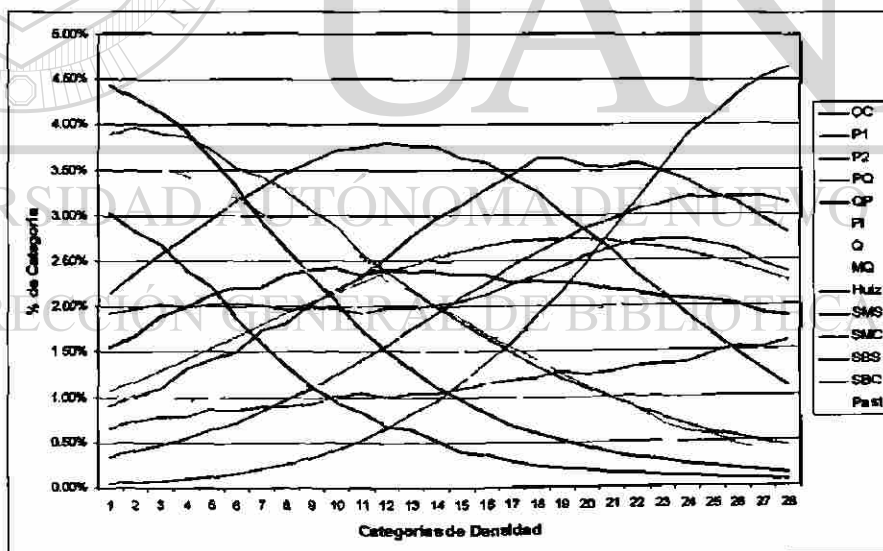


Figura 34. Tipos de vegetación y su densidad.

Adicionalmente se calculó la correlación existente entre índices de cobertura vegetal y otras variables registradas durante el inventario como: índice de sitio, cobertura de copas, incremento corriente anual e incremento medio anual (tabla 22 y figura 35).

Parámetros	Valores promedio por subrodal		
	NDVI	PCA2	Tasseled Cap
Índice de Sitio	0.431	0.356	0.428
Cobertura de Copas	0.457	0.437	0.464
Índice de densidad de Reineke	0.488	0.460	0.497
ICA	0.478	0.426	0.487
IMA	0.472	0.414	0.475

Tabla 22. Correlación entre parámetros del inventario y valores asociados a cobertura vegetal calculados de la imagen Landsat-ETM+ de 2000.

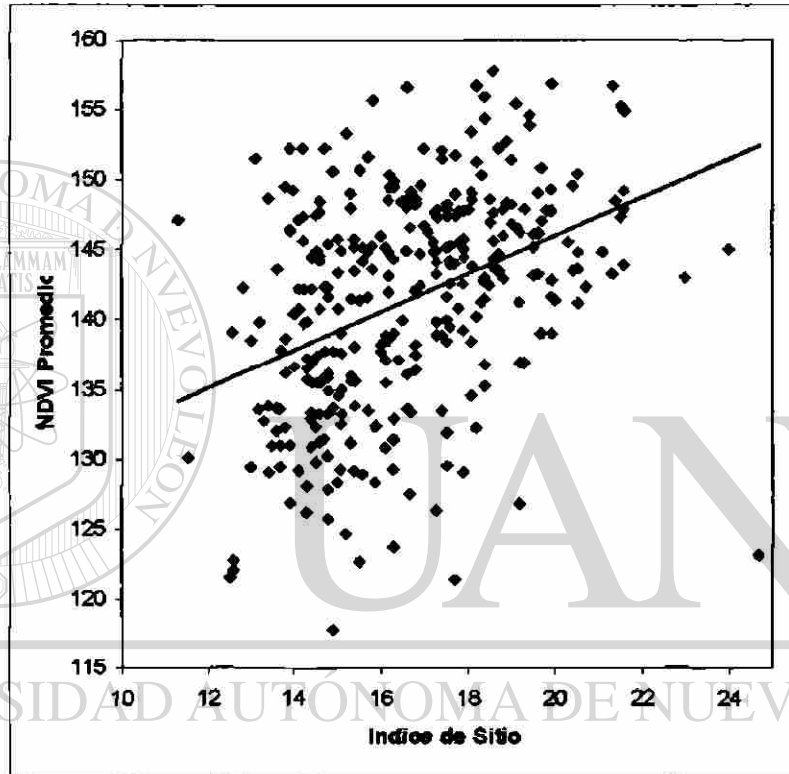


Figura 35. Correlación entre valores de Índice de sitio y NDVI promedio para cada subrodal.

Comparando el NDVI contra los índices de sitio para subrodales de la cuarta anualidad desagregados por tratamiento (figura 36), se muestra: Aclareos (ACL), Corta de liberación (CL), Corta de regeneración (CR), Selección definida y condicionada por composición de pino (SELC), Selección definida y condicionada por pendiente (SELF) Selección definida y condicionada por pobreza de sitio (SELP).

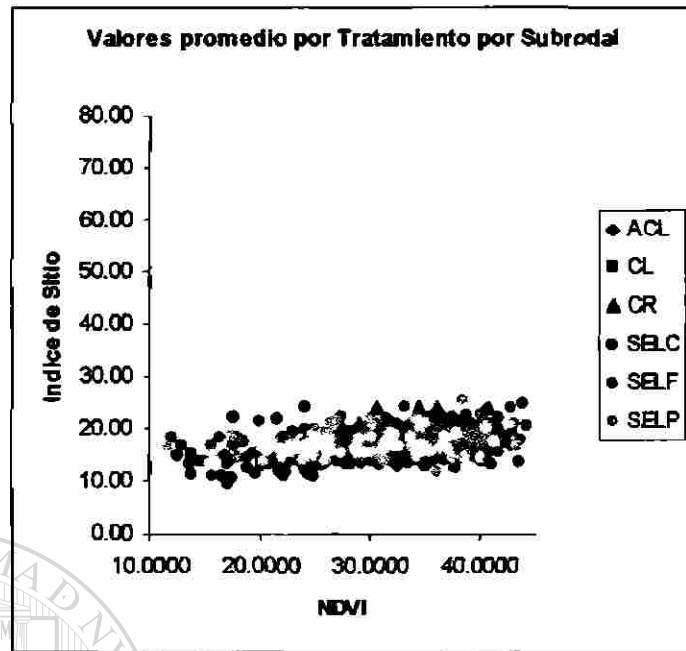


Figura 36. Comparación entre Índice de sitio e Índice de diferencia normalizada de vegetación para la cuarta anualidad por tratamiento a aplicar.

La comparación de la variable cobertura de copas en la figura 37.

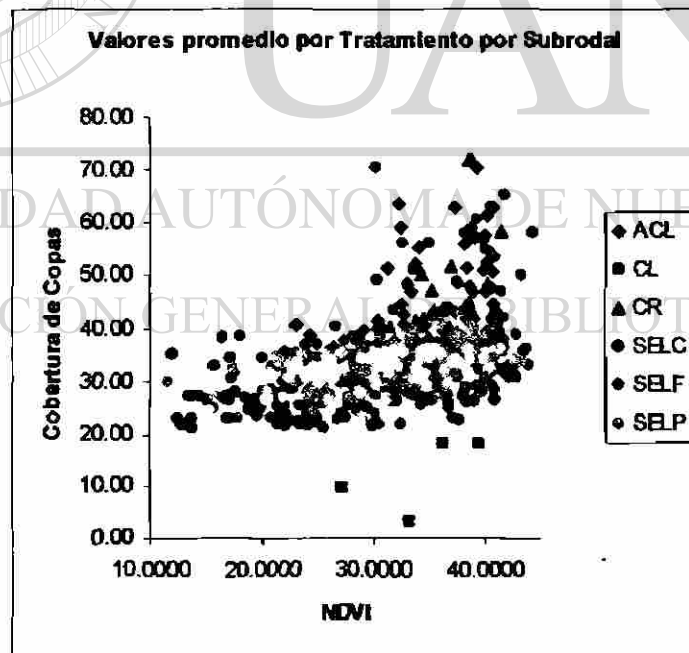


Figura 37. Comparación entre cobertura de copas e Índice de diferencia normalizada de vegetación para la cuarta anualidad por tratamiento a aplicar.

## 5.6. Evaluación multitemporal

En las figuras 38, 39 y 40 se muestran las tres imágenes Landsat y sus correspondientes valores de NDVI normalizados en las figuras 41, 42 y 43.



Figura 38. Landsat-MSS 1973



Figura 39. Landsat-MSS 1986



Figura 40. Landsat-TM 2000.

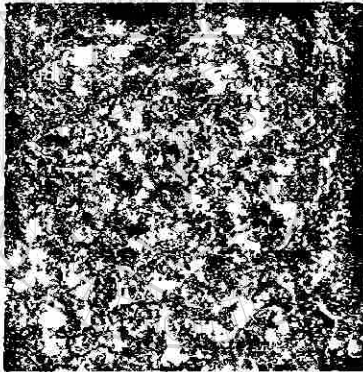


Figura 41. NDVI 1973 (Azul)



Figura 42. NDVI 1986 (Verde)

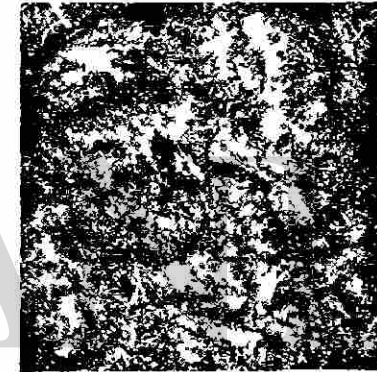


Figura 43. NDVI 2000 (Rojo).

La integración de los tres NDVI categorizados en una sola imagen se muestran en la figura 44.



Figura 44. Imagen que integra los 3 NDVI's para el análisis multitemporal.

Para comprender la imagen anterior se presenta un esquema en la figura 45, de la cual se derivan cuatro grupos de variación de la cobertura forestal:

- Áreas sin variación aparente:
  - Blanco.- áreas con densidad alta en todas las escenas.
  - Gris.- áreas con densidad media en todas las escenas.
  - Negro.- áreas con densidad baja en todas las escenas.
- Áreas con tendencias de deforestación:
  - Azul.- áreas que experimentaron alta deforestación en la primera década
  - Cian.- áreas que experimentaron alta deforestación en la segunda década
- Áreas con tendencias de reforestación:
  - Amarillos.- áreas que experimentaron alta reforestación en la primera década
  - Rojos.- áreas que experimentaron alta reforestación en la segunda década
- Áreas con variación temporal discontinua:
  - Verde.- áreas que experimentaron reforestación en la primera década y deforestación en la segunda década.
  - Magenta.- áreas que experimentaron deforestación en la primera década y reforestación en la segunda década.

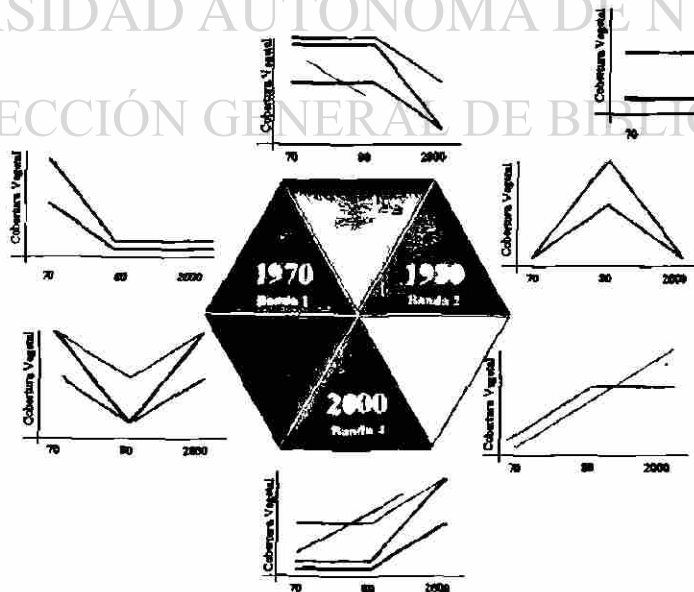


Figura 45. Esquema para la interpretación colorimétrica de la imagen compuesta por NDVI's, basada en la densidad de cobertura forestal entre fechas de escenas.

El resultado de la clasificación no supervisada y sobreposición de subrodales de producción se muestra en la figuras 46 y 47, así como en las tablas 23 y 24.

Patrón	Superficie Total (Has.)		Superficie de Producción (Has.)	
Sin Cambio Densidad Alta	12,970.08	5.39%	4,082.27	7.13%
Reforestación Alta	37,595.21	15.62%	16,733.12	29.24%
Reforestación Baja	44,381.36	18.44%	13,863.67	24.23%
Sin Cambio Densidad Media	18,401.15	7.64%	4,636.40	8.10%
Deforestación Baja	30,684.94	12.75%	8,503.47	14.86%
Sin Cambio Densidad Baja	27,735.89	11.52%	2,525.38	4.41%
	240,739.76		57,223.24	

Tabla 23. Cambios de cobertura forestal del área de estudio y de subrodales de producción.

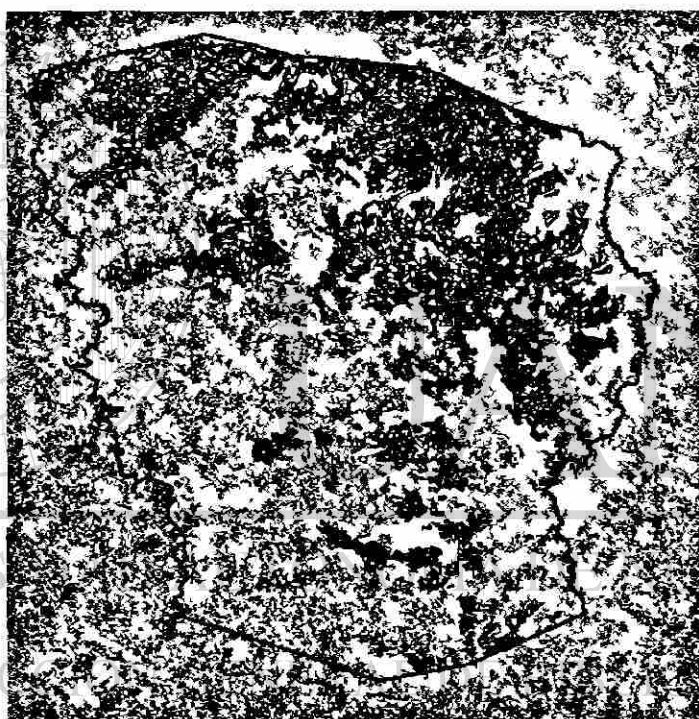


Figura 46. Cambios de cobertura forestal experimentada en el área de estudio y subrodales de producción.

Patrón	Superficie de Producción (Has.)		Superficie no Manejada (Has.)	
Sin Cambio Densidad Alta	4,082.27	7.13%	8,887.82	4.84%
Reforestación Alta	16,733.12	29.24%	20,862.09	11.37%
Reforestación Baja	13,863.67	24.23%	30,517.70	16.63%
Sin Cambio Densidad Media	4,636.40	8.10%	13,764.76	7.50%
Deforestación Baja	8,503.47	14.86%	22,181.47	12.09%
Sin Cambio Densidad Baja	2,525.38	4.41%	25,210.51	13.74%
	6,878.95	12.02%	62,092.19	33.83%
	57,223.24		183,516.53	

Tabla 24. Cambios de cobertura forestal en subrodales de producción y áreas no manejadas.



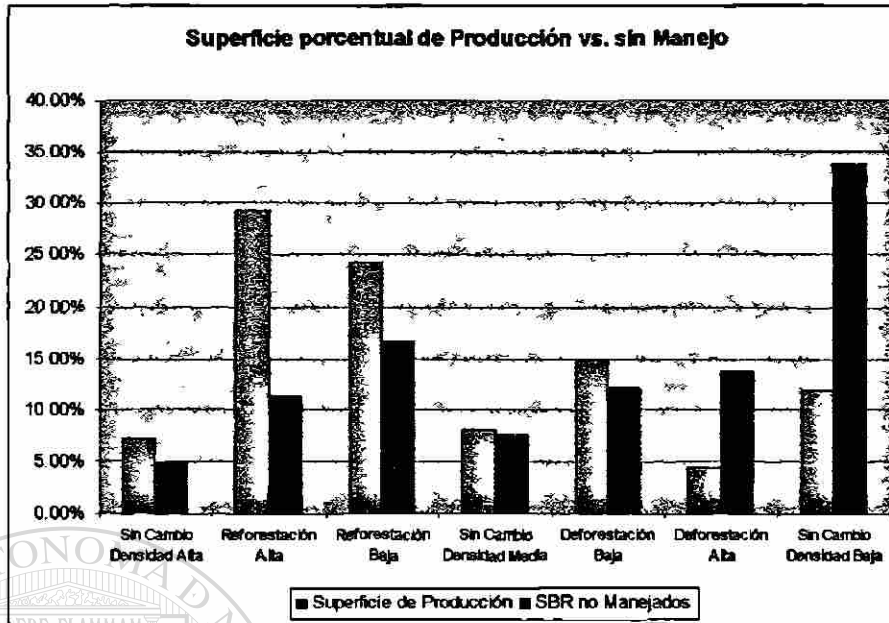


Figura 47. Comparación porcentual del cambio de cobertura forestal en subrodales de producción y áreas no manejadas.

Su desagregación por tratamientos para la cuarta anualidad se muestra en la tabla 25 y figura 48.

Patrón	SELP	SELF	SELC	ACL	CR	CL
Sin Cambio Densidad Alta	17.78	323.06	76.12	60.44	18.00	0.86
Reforestación Alta	126.90	1,152.16	171.83	329.56	109.42	9.92
Reforestación Baja	189.79	950.47	348.32	185.94	51.26	6.89
Sin Cambio Densidad Media	65.43	355.95	99.92	84.33	17.37	1.42
Deforestación Baja	112.05	574.72	274.52	141.41	31.39	13.91
Sin Cambio Densidad Baja	21.35	197.96	124.27	23.38	2.70	4.66
	758.66	3,939.35	1,662.08	852.37	235.24	39.47

Tabla 25. Superficie en hectáreas por tratamiento para la cuarta anualidad y patrón de densidad 1973-1986-2000.

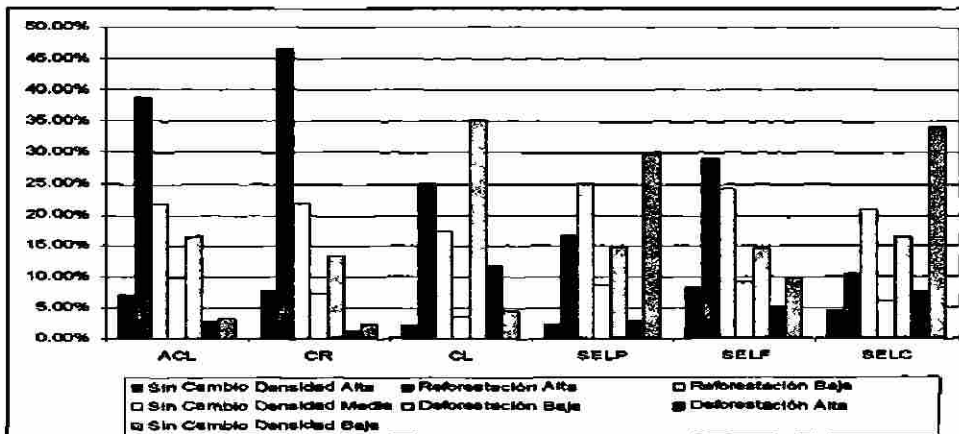


Figura 48. Comparación porcentual de la superficie por tratamiento para la cuarta anualidad y patrón de densidad 1973-1986-2000.

### 5.7. Modificación de escurrimientos por deterioro de la cobertura forestal

Los resultados de la modelación hidrológica se muestran de la figura 49 a la 60 y tablas de la 26 a la 28.



Figura 49. Cuenca del Río Baluarte, estaciones meteorológicas e hidrométrica ubicadas dentro de la cuenca, principales escurrimientos y límite del área de estudio.

Estaciones Climatológicas para 1973

Estación	Clave DGGTN	Temp. Med. Anual	PPT. Med. Anual	PPT. Máx. Año	PPT. Mín. Año	Años	Dependencia
La Ciudad	10-009	10.70	1,479.06	2078.10 -1963	1011.50 -1956	20	CFE
La Peña	10-072	10.00	1,374.25	18.62.10 -1963	1015.60 -1971	13	SARH
El Palmilo	25-038	16.67	1,240.01	2336.00 -1958	760.50 -1965	20	CFE
Potrerillos	25-118	19.62	1,292.91	1463.80 -1974	1163.10 -1975	7	SARH
Pueblo Nuevo	10-076	18.51	1,435.67	2111.10 -1968	1025.10 -1975	11	SARH
Piomasas	25-117	22.09	1,499.79	1935.80 -1973	1100.40 -1972	12	SARH
Las Habitas	25-099	25.16	1,141.29	1511.90 -1969	763.70 -1966	12	SARH

PPT. Promedio 1,351.85

Tabla 26. Datos de estaciones meteorológicas ubicadas dentro de la cuenca del Río Baluarte.

Estación	Las Habitas
Corriente	Río Baluarte
Area Cuenca Km2	3,535.00
Escurrimiento anual (millones m3)	2,007.04
Volumen Medio Anual (m3/seg)	7.11
Gasto Medio Anual m3/seg	292
Gasto Máximo m3/seg	0.68
Periodo	1964-1973
Dependencia	SARH

Tabla 27. Datos de la estación hidrométrica "Las Habitas".

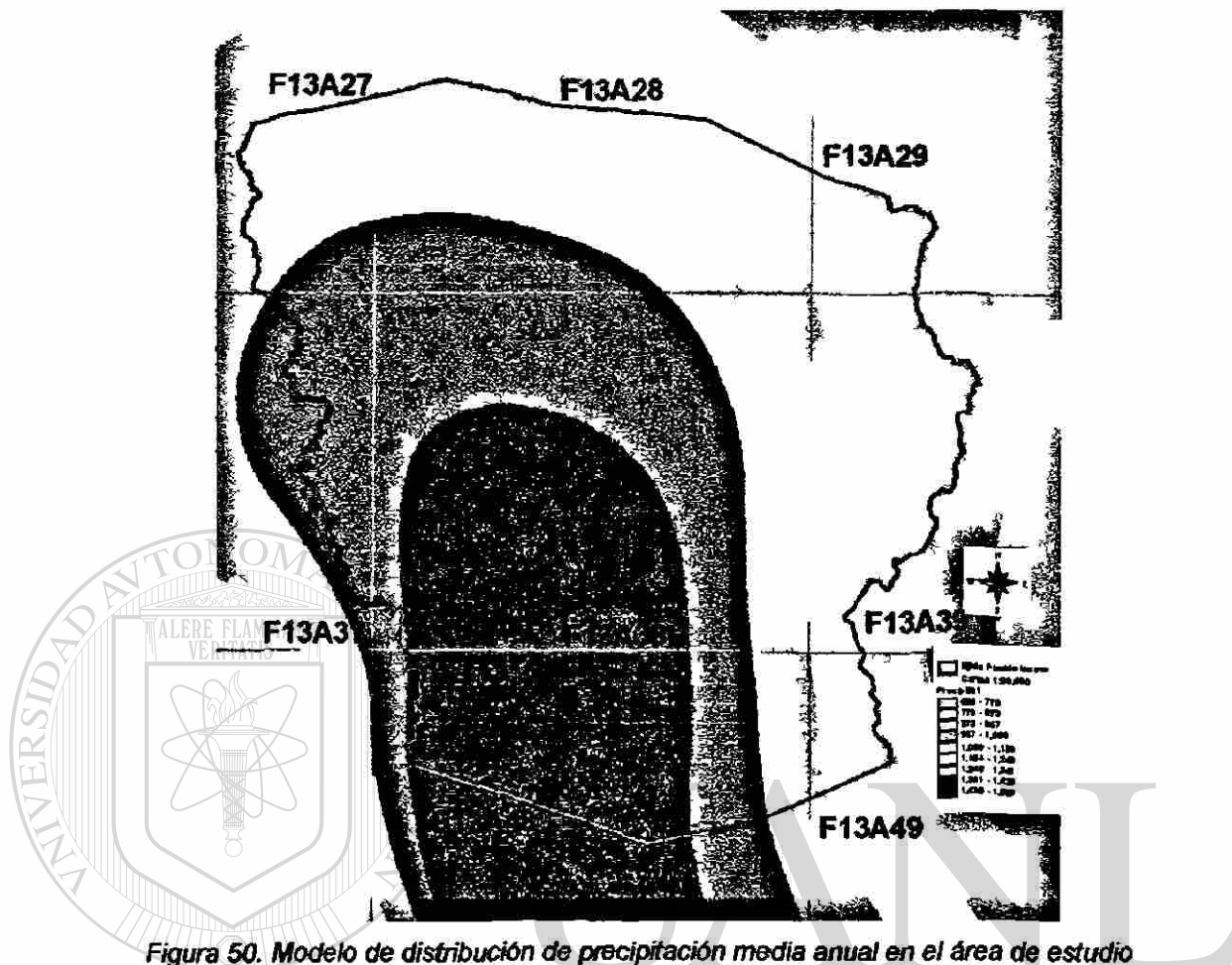
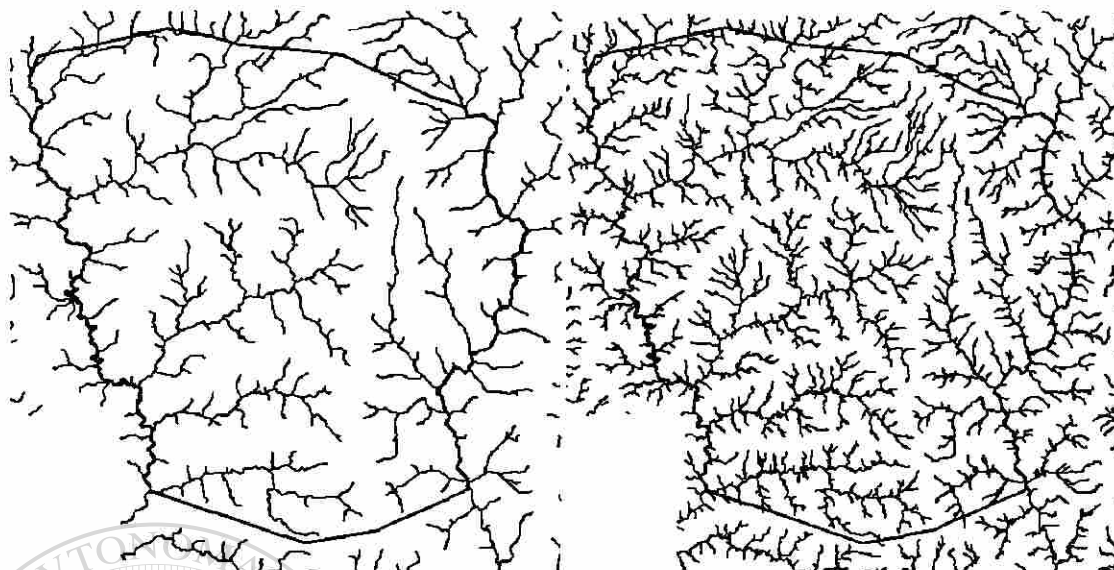


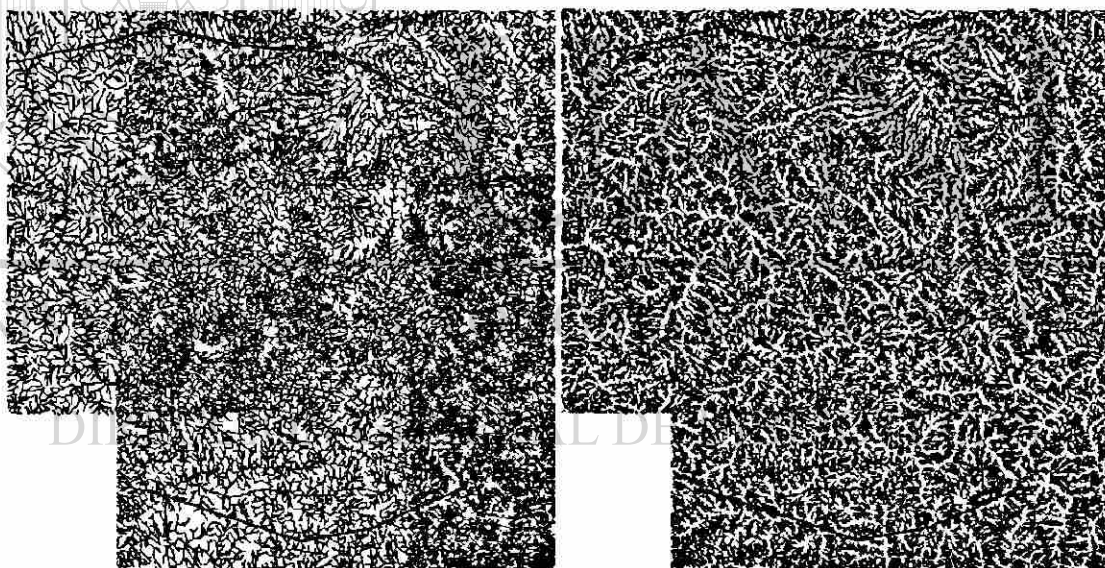
Figura 50. Modelo de distribución de precipitación media anual en el área de estudio

Pendiente	Uso de Suelo	Periodo de Retorno						
		2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	500 años
	Asfalto	0.73	0.78	0.82	0.87	0.91	0.96	1.00
	Cemento	0.75	0.79	0.83	0.88	0.92	0.96	1.00
0 - 2 %	Cultivos	0.31	0.35	0.40	0.44	0.48	0.53	0.57
2 - 7 %		0.35	0.39	0.43	0.48	0.52	0.56	0.60
> 7 %		0.39	0.43	0.46	0.50	0.54	0.57	0.61
0 - 2 %	Pastos	0.25	0.30	0.34	0.39	0.44	0.48	0.53
2 - 7 %		0.33	0.37	0.41	0.46	0.50	0.54	0.58
> 7 %		0.37	0.41	0.45	0.49	0.52	0.56	0.60
0 - 2 %	Bosques	0.22	0.26	0.31	0.35	0.39	0.44	0.48
2 - 7 %		0.31	0.35	0.39	0.44	0.48	0.52	0.56
> 7 %		0.35	0.39	0.43	0.47	0.50	0.54	0.58
0 - 2 %	Z. Verdes Pobre < 50 % cobertura	0.32	0.36	0.41	0.45	0.49	0.54	0.58
2 - 7 %		0.37	0.41	0.45	0.49	0.53	0.57	0.61
> 7 %		0.40	0.44	0.47	0.51	0.55	0.58	0.62
0 - 2 %	Z. Verdes Media > 50 < 75 %	0.25	0.30	0.34	0.39	0.44	0.48	0.53
2 - 7 %		0.33	0.37	0.41	0.46	0.50	0.54	0.58
> 7 %		0.37	0.41	0.45	0.49	0.52	0.56	0.60
0 - 2 %	Z. Verdes Buena > 75 %	0.21	0.26	0.30	0.35	0.40	0.44	0.49
2 - 7 %		0.29	0.34	0.38	0.43	0.47	0.52	0.56
> 7 %		0.34	0.38	0.42	0.46	0.50	0.54	0.58

Tabla 28. Porcentajes de escurrimiento por tipo de uso de suelo y pendiente.



**Figura 53. Cauces digitalizados comparados contra modelados escala 1:250,000.**



**Figura 54. Cauces digitalizados comparados contra modelados escala 1:50,000.**

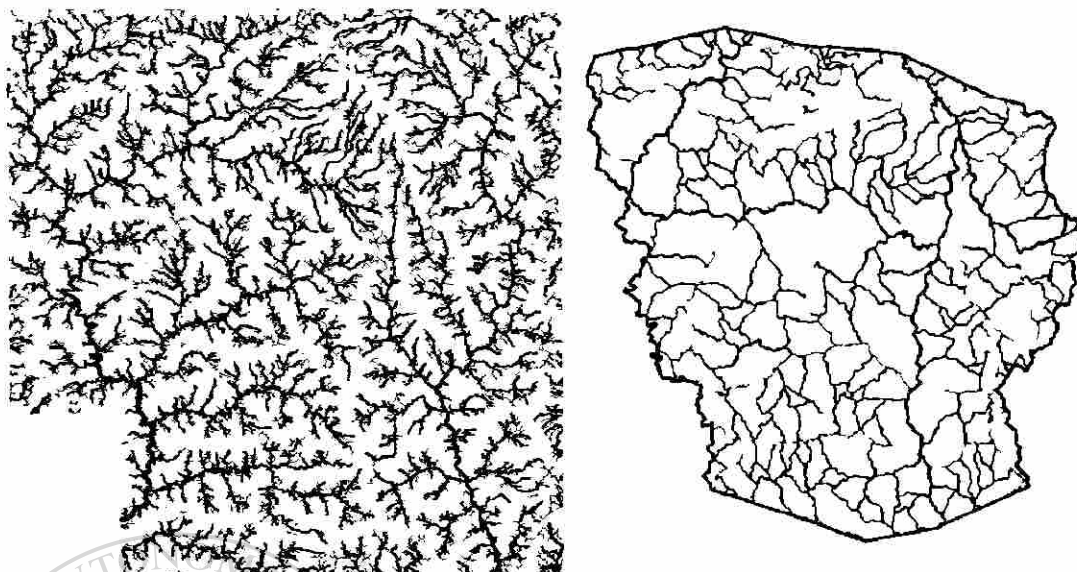


Figura 55. Definición de submicrocuencas del modelado hidrológico comparado contra información hidrológica de áreas de captación del ejido Pueblo Nuevo.

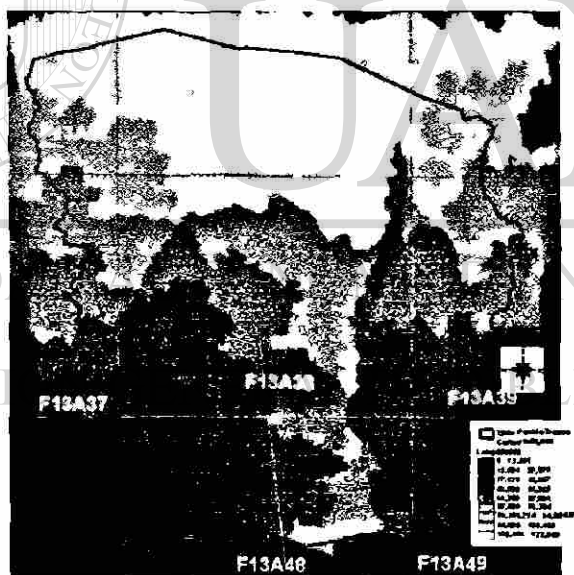


Figura 56. Longitud de flujos para las dos subcuencas del área de estudio.

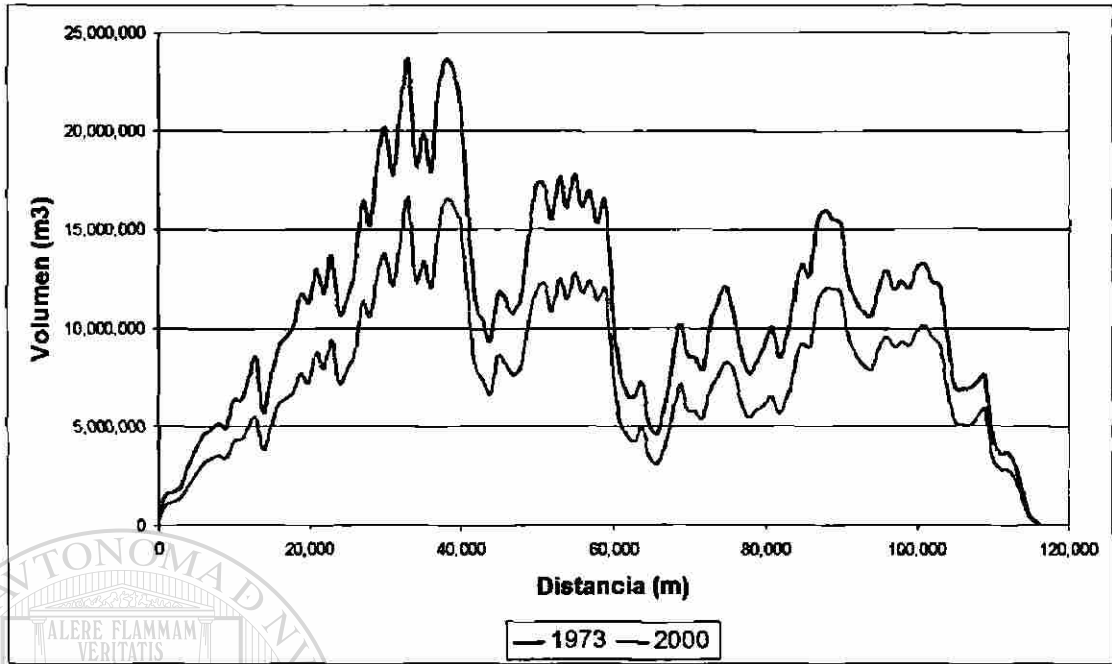


Figura 57. Hidrogramas 1973-2000 para la cuenca del Río Baluarte.

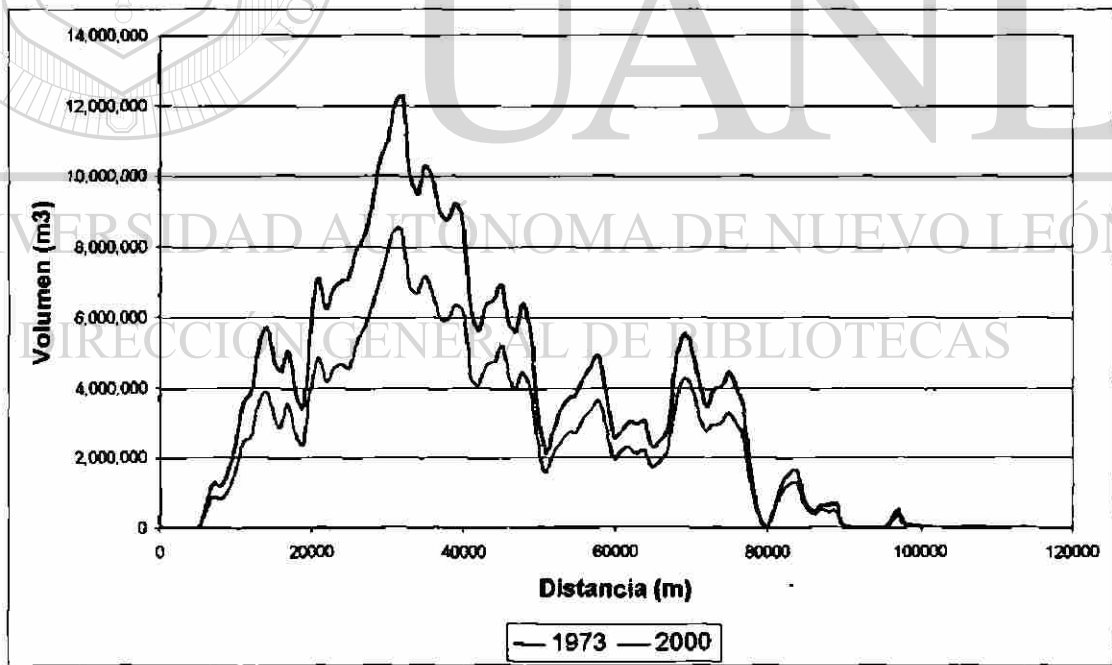


Figura 58. Hidrogramas 1973-2000 para la cuenca del Río San Diego..

Los coeficientes de escurrimiento de ambas fechas fueron comparados para determinar cambios y evaluar el grado de deterioro por microcuena (figura 59).

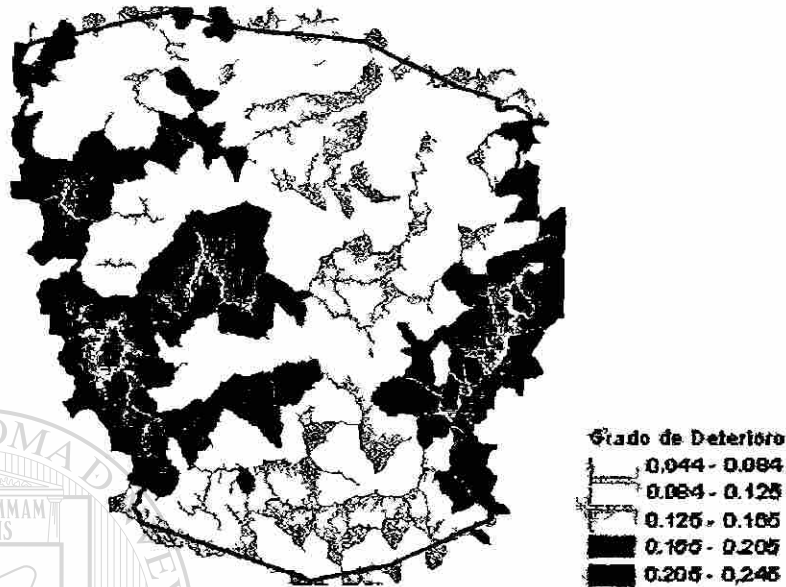


Figura 59. Grado de deterioro expresado en incremento de índices de escurrimiento.

A partir del índice de compacidad y el grado de deterioro, se evaluó el riesgo hidrológico por microcuena (figura 60).

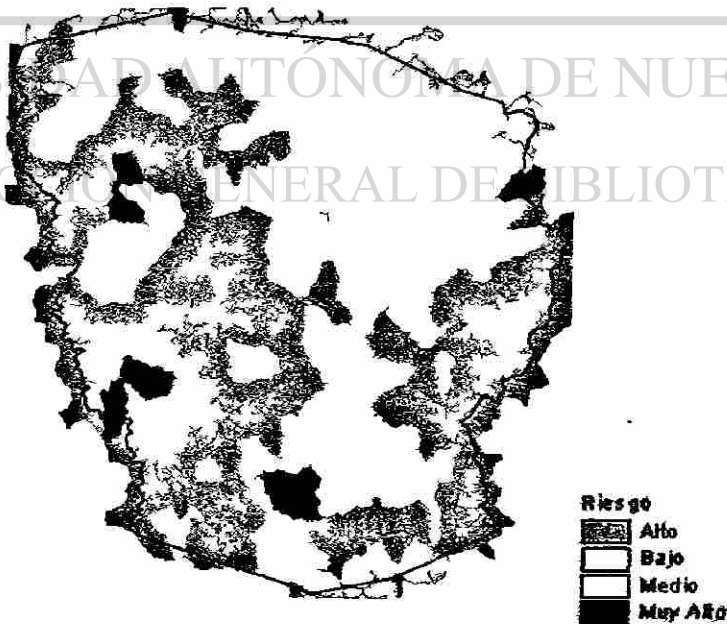


Figura 60. Categorías de riesgo hidrológico por microcuena.

### 5.8. Análisis de distribución de la población y sus actividades respecto a la problemática de subcuencas en el ejido Pueblo Nuevo.

Grado de deterioro de las microcuencas respecto a la distribución de localidades y cantidad de población. Para el año 2000 dos de ellas superan los 600 habitantes, La Peña y Mesa de San Pedro (figura 61).

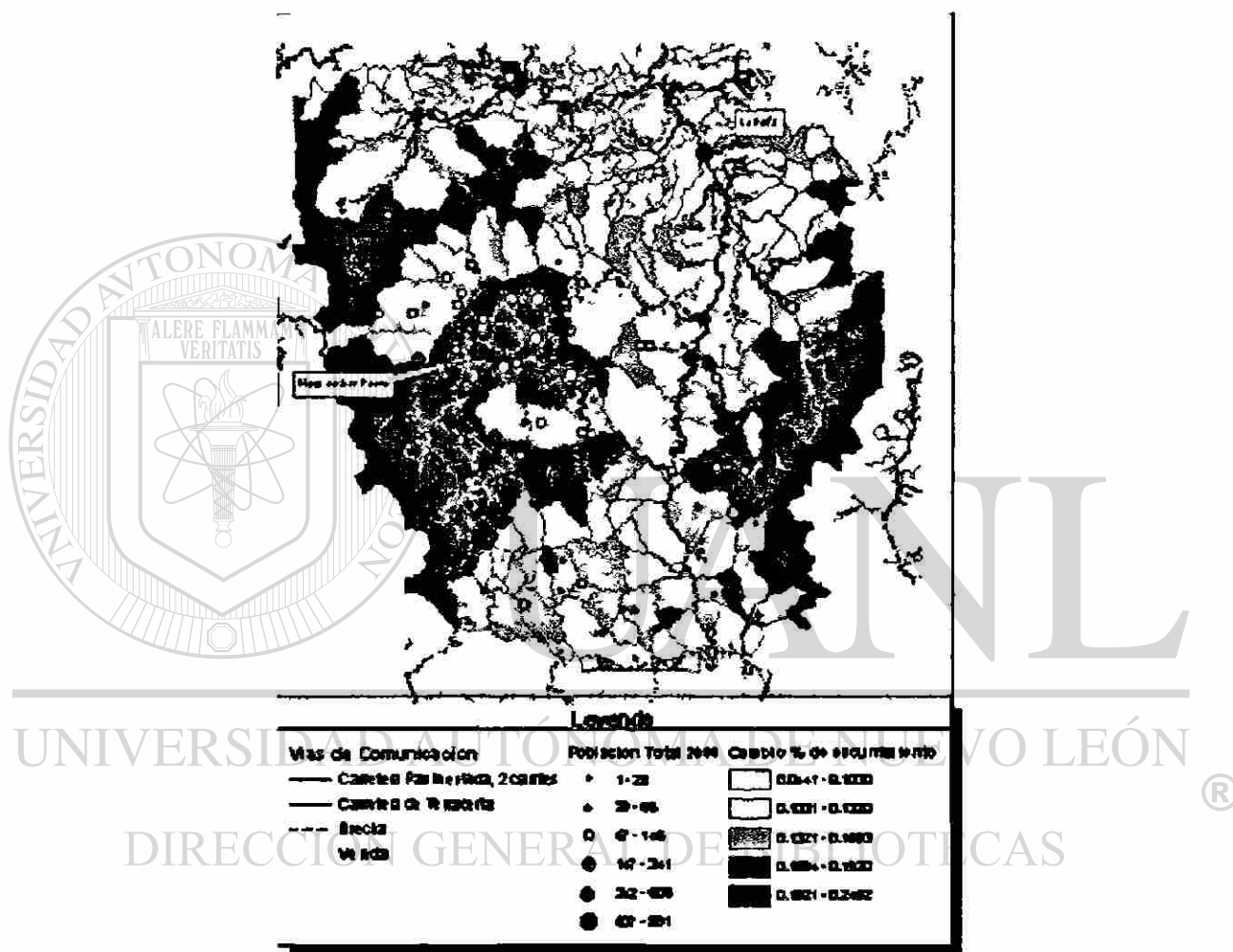


Figura 61. Distribución de localidades y total de población respecto al deterioro de submicrocuencas.

Estas localidades definen dos aspectos de las actividades productivas del ejido, La Peña y las poblaciones localizadas a lo largo de las carreteras principales sobre las mesetas altas que corren hacia el sur y al oeste, dedicadas principalmente al sector forestal, mientras que la Mesa de San Pedro agrupa un conjunto de poblados de la zona de las quebradas, dedicados principalmente a actividades agropecuarias, con fruticultura y silvicultura de autoconsumo.



Esta zona de las quebradas, tanto de la cuenca del río Baluarte como la del río San Diego han registrado disminución en su cobertura forestal, debido principalmente a incendios forestales y cambios de uso de suelo por la apertura de áreas de cultivo, observados durante los recorridos de campo, un ejemplo de ello se muestra en las figuras 62 y 63.



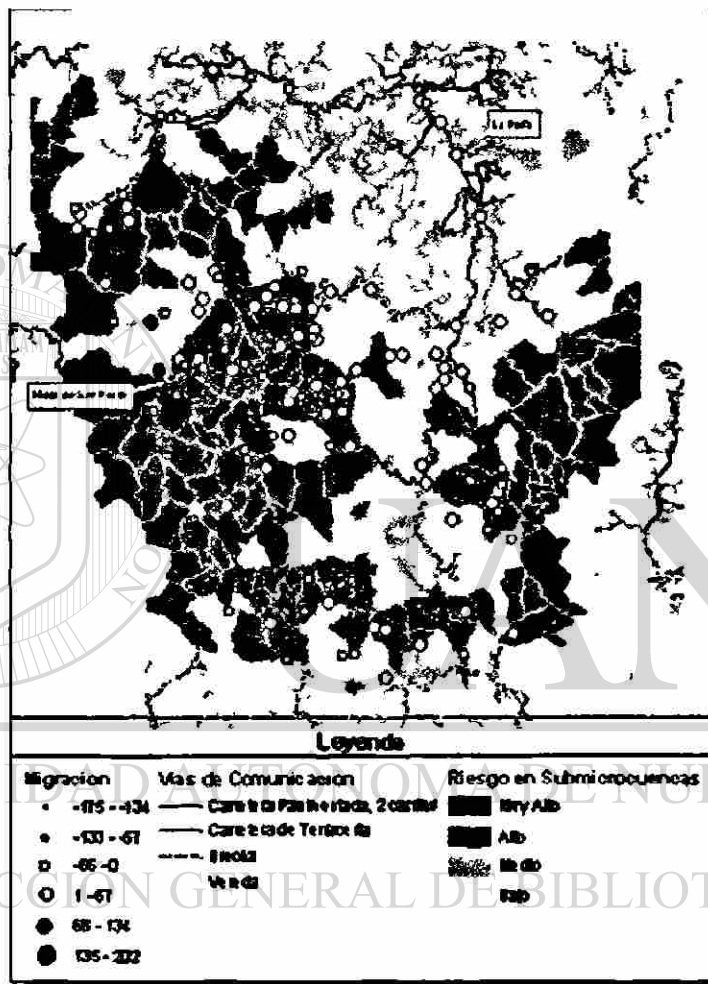
*Figura 62. Establecimiento de áreas agrícolas en zonas forestales (Río Baluarte).*



*Figura 63. Establecimiento de áreas agrícolas en zonas forestales (Río San Diego).*

Comparando los datos de población para los años 1995 y 2000 por localidad (figura 64), se observa que la zona de mayor crecimiento en los últimos cinco años se encuentra ubicada en la Mesa de San Pedro, constituyéndose en la población atractora de mayor crecimiento, seguida de cuatro localidades

satélites cercanas que registraron un crecimiento demográfico significativo, así como un conjunto de localidades de menor crecimiento, las cuales conforman la zona de mayor presión e impacto a cuencas y ecosistemas dentro del ejido, así como a los de aguas abajo en estados vecinos.



*Figura 64. Riesgo de submicrocuencas y crecimiento de localidades en 5 años.*

Con base en los usos de suelo y vegetación derivados del inventario nacional forestal 2000, se realizó un análisis comparativo respecto a los predios de la región suroeste del Estado de Durango (tabla 29).

Donde queda de manifiesto que:

- \* El ejido Pueblo Nuevo registra valores promedio en la región.
- \* La superficie per cápita es ligeramente superior al promedio.
- \* La superficie de Bosque de Pino-Encino per cápita es ligeramente inferior al promedio

- \* La superficie de Bosque de Encino-Pino per cápita es el doble al promedio
- \* La superficie de Agricultura y Pastizal Inducido per cápita es muy baja con respecto al promedio.
- \* Existen ocho predios cuya superficie Agrícola y Pastizal Inducido per cápita superan en mayor o menor grado al promedio

Predio	Superficie per cápita	Bosque de Pino y Encino per cápita	Bosque de Encino y Encino-Pino per cápita	Selva Medianas y Baja Caducifolia per cápita	Agricultura y Pastizal Inducido per cápita
Ejido Antonio Molina Deras	266.17	183.50	76.16	0	
P.P. Lotes 1 y 4 Fraccto. San Francisco	190.55	171.35	17.20	0	0.00
P.P. Lote No. 6 Presitas	165.80	165.80	0.00	0	0.00
P.P. Lotes 1,4,6,13 y 14 Fraccto. Coyotes	115.50	119.29	0.00	0	0.00
P.P. Lotes 2, 3 y 20 Fraccto. Coyotes	113.50	113.69	0.00	0	0.00
P.P. Los Juncoos	148.00	102.33	43.67	0	0.00
P.P. Lote 5 Fraccto Llano Grande	124.20	89.36	0.00	0	
P.P. Lotes 5,7 y 15 Fraccto. Coyotes	79.90	74.30	5.60	0	0.00
P.P. Lotes 12 y 21 Fraccto. Coyotes	78.31	70.50	7.81	0	0.00
Comunidad La Esperanza	73.27	63.75	0.00	0	
Ejido San Antonio de las Basuras	55.13	55.13	0.00	0	0.00
Ejido Adolfo Ruz Cortinez	50.28	44.16	4.08	0	0.78
Ejido Unidos Venceremos	44.17	28.12	8.57	0	
Comunidad Durazno y Picachos	48.05	21.84	10.54	15.62	0.00
Comunidad El Gato	40.98	18.55	0.70	21.72	0.00
Ejido San Esteban y Anexos	28.45	17.39	10.16	0	0.90
Ejido Barones	41.94	16.37	2.56	23.01	0.00
Ejido El Salto y Anexos	28.52	13.90	0.00	0	
Ejido La Cueva y Anexos	13.72	13.04	0.68	0	0.00
Ejido Chavama Nuevo	13.08	12.60	0.48	0	0.00
Ejido Pueblo Nuevo	20.25	10.03	6.12	3.87	0.21
Totales y promedios	18.20	10.94	3.44	1.84	1.86
Ejido Los Negros	11.42	10.63	0.09	0	0.70
Ejido Santa Lucia	17.09	10.58	6.24	0	0.00
Ejido Nueva Patria	16.54	10.54	6.01	0	0.00
Ejido Chavama Viejo	21.77	10.29	0.00	0	
Ejido La Campana	14.96	9.23	2.69	1.95	1.13
Ejido Los Bancos	8.87	8.87	0.00	0	0.00
Ejido Durazno y Picachos	10.32	8.72	0.00	1.60	0.00
Ejido Mil Diez	11.10	8.34	0.00	0	2.76
Ejido San Antonio y Anexos	10.92	7.94	0.00	0	2.97
Ejido Laguna del Progreso	7.64	7.64	0.00	0	0.00
P.P. Lote 3 Fraccto. San Francisco	60.25	7.45		0	0.00
Ejido Sotillos y Anexos	12.64	6.89	5.28	0	0.47
Comunidad Chavama Nuevo	6.74	5.94	0.00	0	0.81
Ejido Banderas del Aguila	10.81	4.50	1.33	0	4.98
Ejido La Ciudad	3.96	3.96	0.00	0	0.00
Ejido José María Morelos	5.24	3.58	0.08	0	1.58
Ejido Borbollones	3.58	2.76	0.00	0.83	0.00
Ejido San José de Animas	42.23	1.12		0	
P.P. Lote 7 y 11 Fraccto. Llano Grande	329.25	0.00		0	
Ejido El Palmarito	117.51	0.00	47.00		0.00
Ejido Villa Corona	91.68	0.00			0.00

Tabla 29. Evaluación de usos de suelo y vegetación per cápita.

### 5.9. Modelo de estratificación de la masa forestal (rodalización)

Como primer criterio de esta metodología se integró la definición de submicrocuencas a partir de la modelación hidrológica previamente descrita (figura 65).

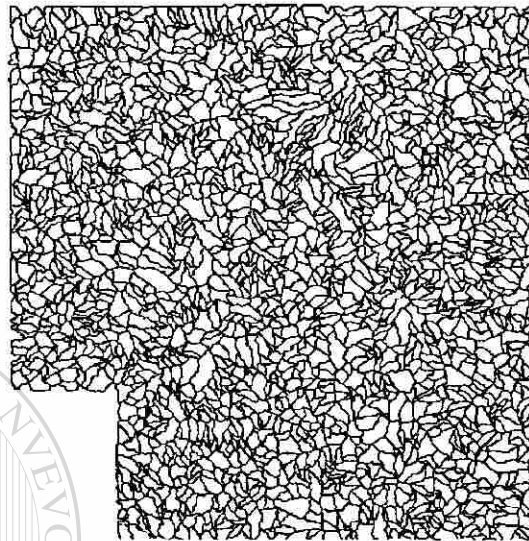


Figura 65. Información vectorial digital de submicrocuencas modeladas.

Para la definición del segundo criterio se comparó los tipos de vegetación y uso de suelo y las exposiciones donde estos se ubican, los resultados se muestran en forma porcentual (figura 66).

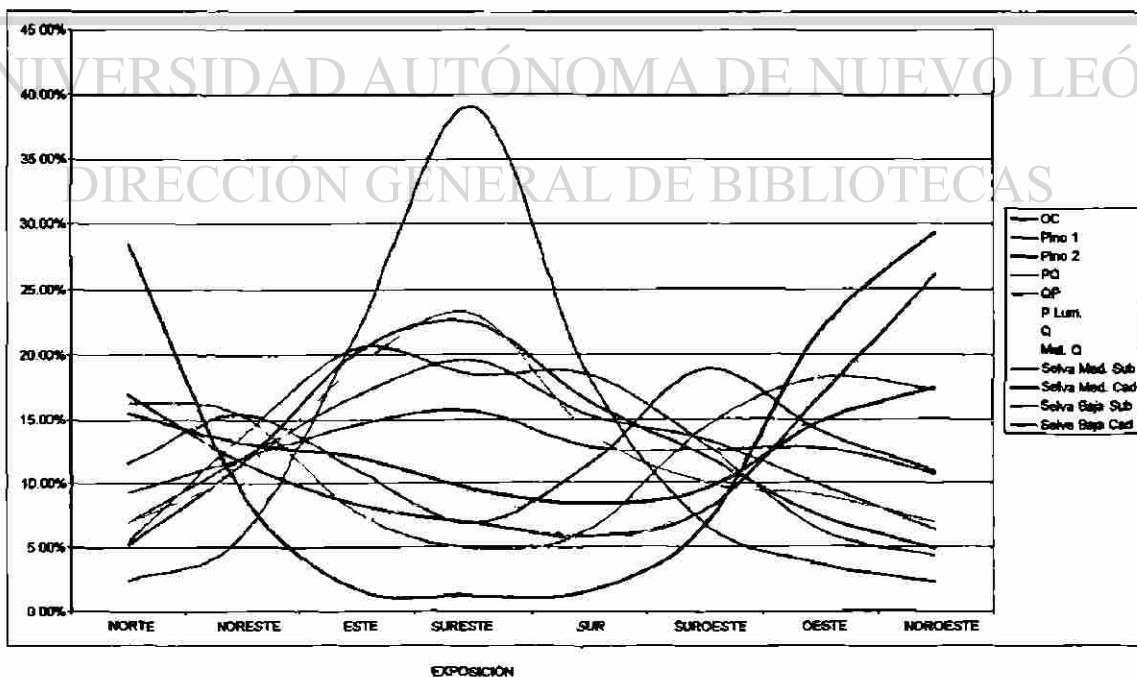
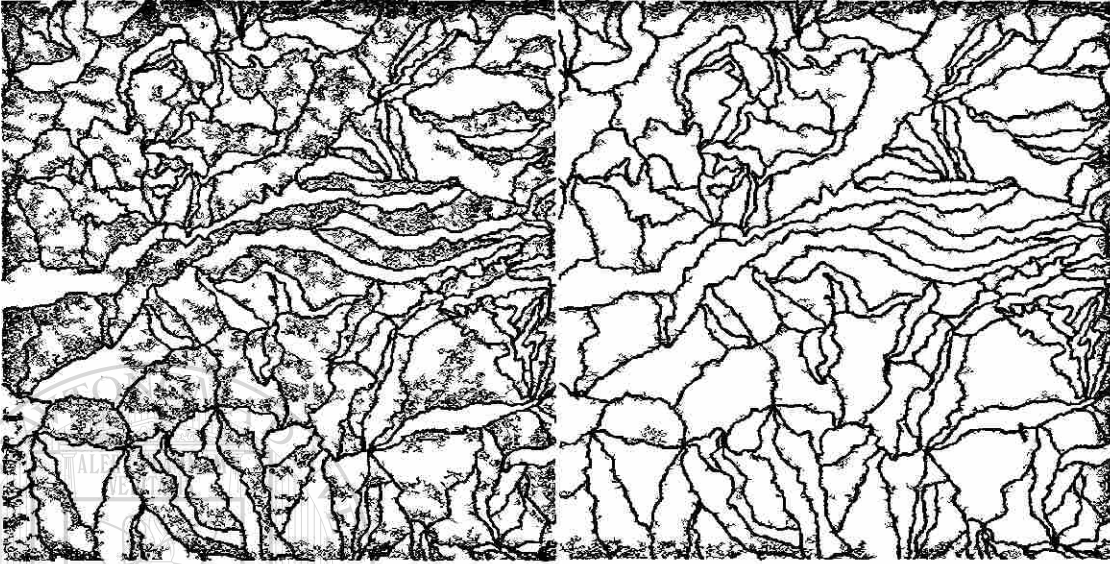


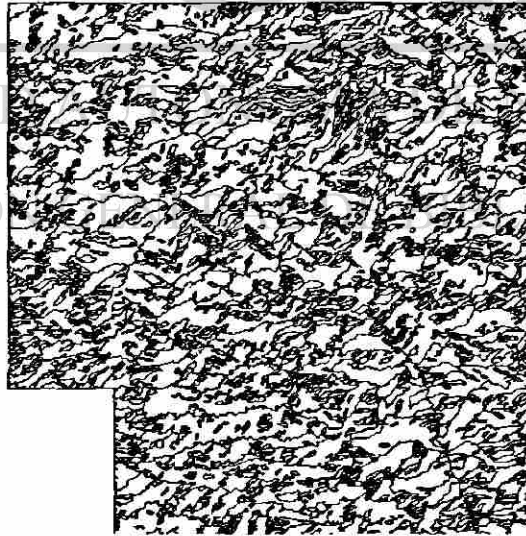
Figura 66. Tipos de vegetación y exposición en porcentajes.

La sobre posición de la información digital de rodales a exposiciones y la separación a exposiciones preferenciales (Noroeste–Sureste) se muestra en la figura 67.



*Figura 67. Comparación de rodales actuales y exposiciones de 8 y 2 clases (NW-SE).*

La recodificación del modelo de exposiciones de 8 a 2 valores y su vectorización (figura 68).



*Figura 68. Información vectorial digital de exposición preferencial.*

La integración al modelo de submicrocuencas para obtener el modelo de rodales (figura 69). Los resultados a detalle en las figuras 70, 71 y 72.

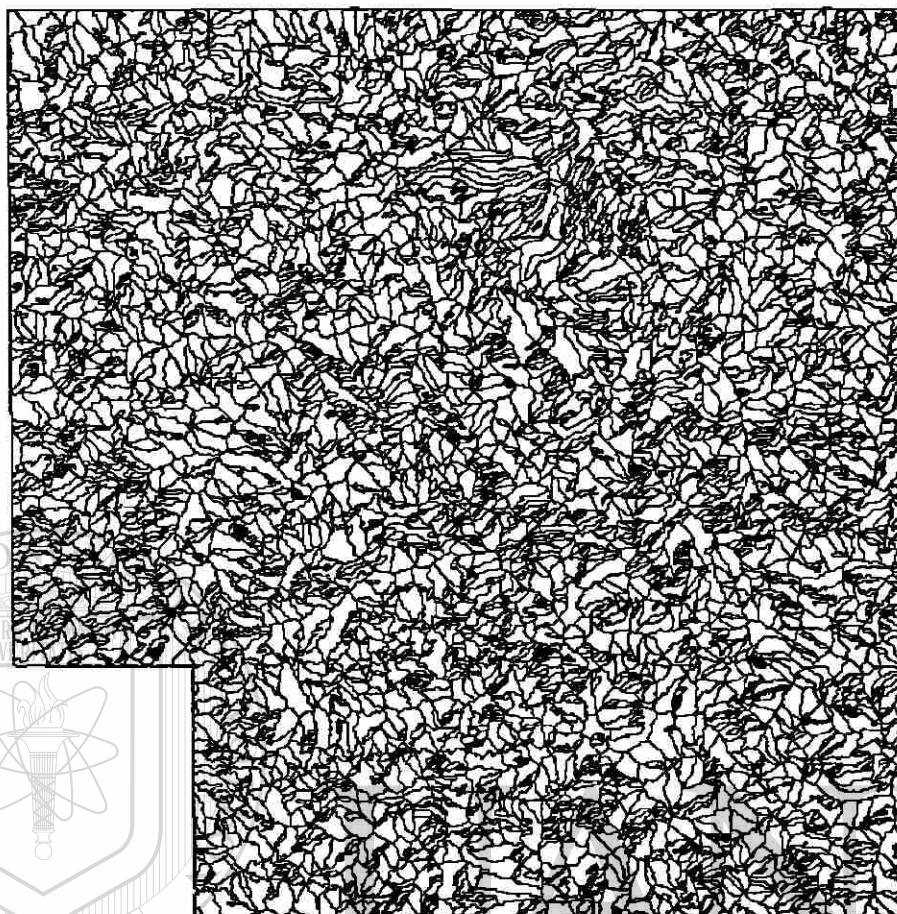


Figura 69. Integración de los dos criterios y generación de los Rodales modelados.

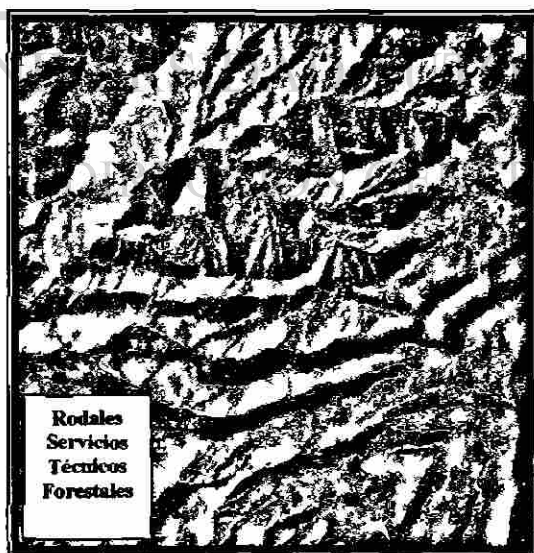


Figura 70. Rodales actuales.

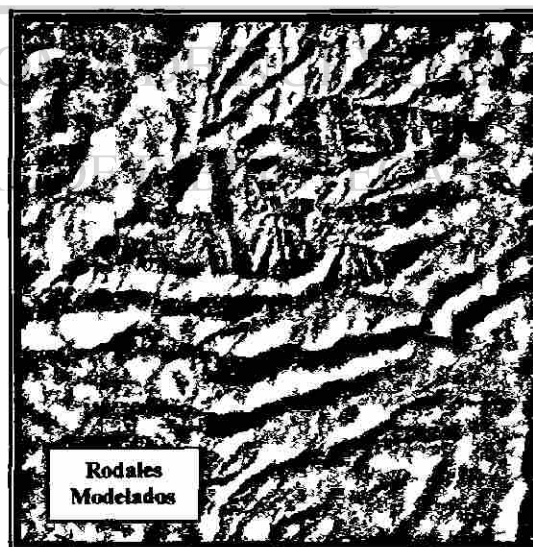
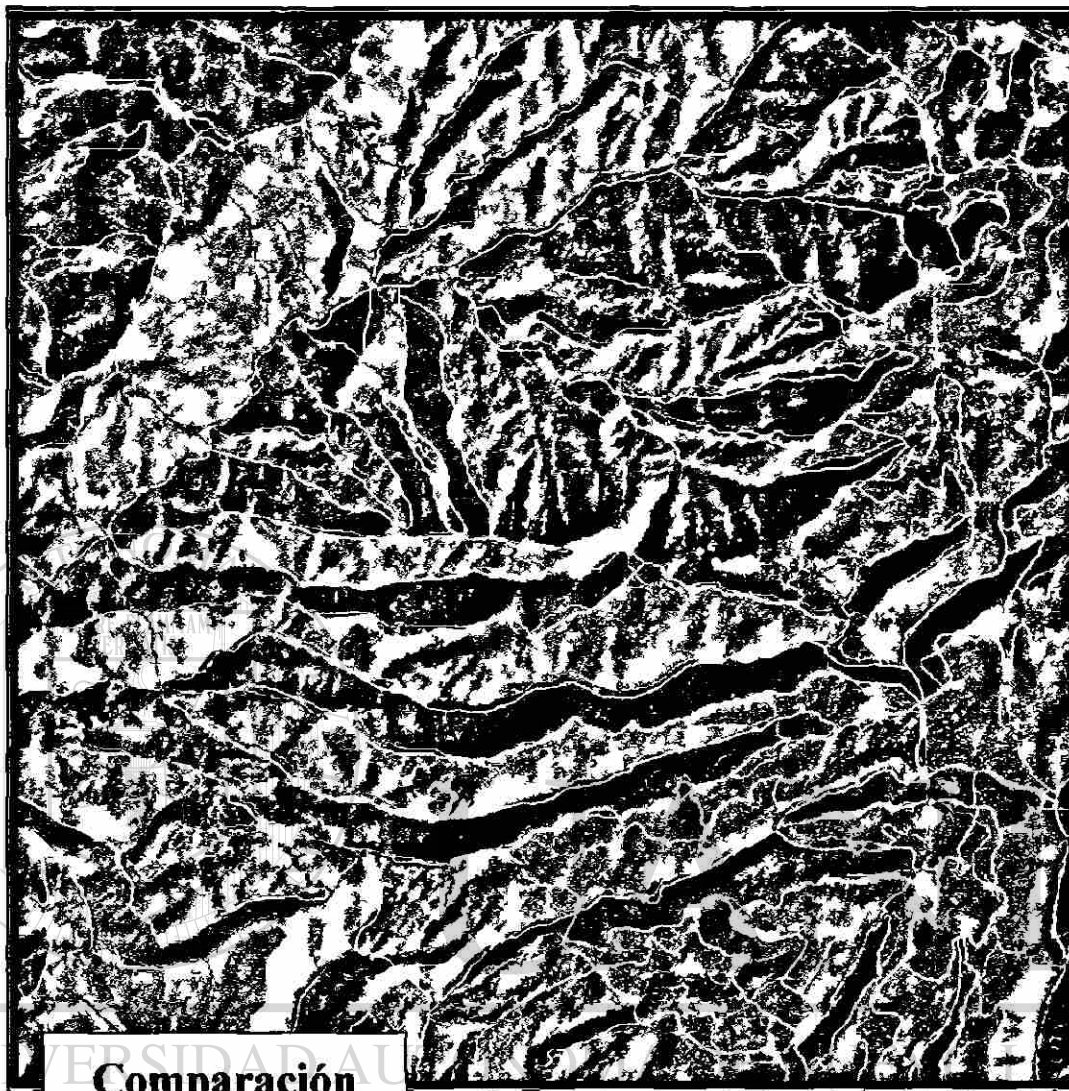


Figura 71. Rodales modelados.



*Figura 72. Sobreposición de Rodales actuales y modelados.*

Para la definición de subrodales se integró la clasificación de la imagen Landsat\_ETM+ de 2000 (transformada a formato vector) a el modelo de rodales, los resultados de la integración de los dos criterios se presentan en la figura 73 y su comparación a mayor detalle en las figuras 74, 75, 76 y 77.

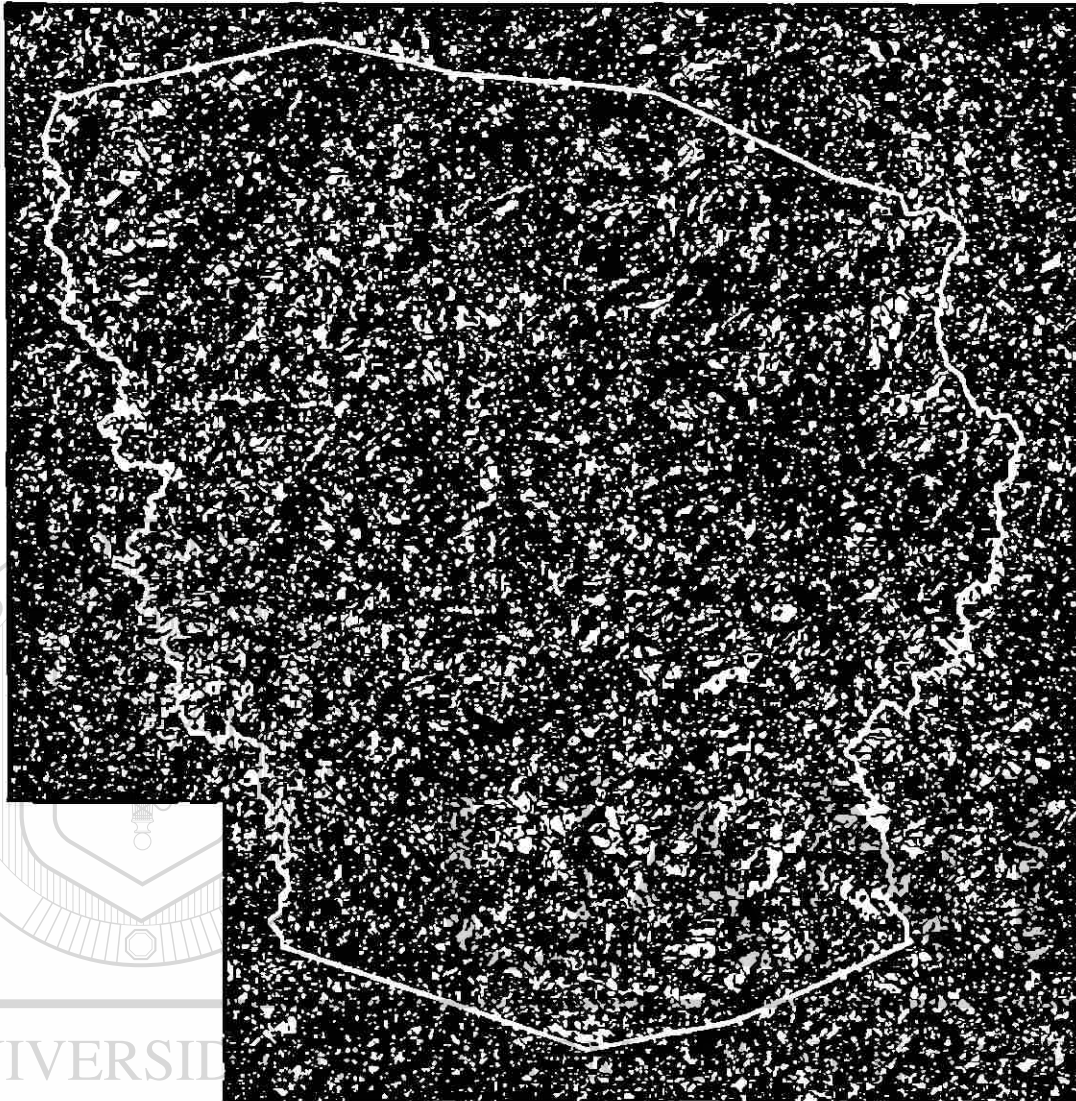


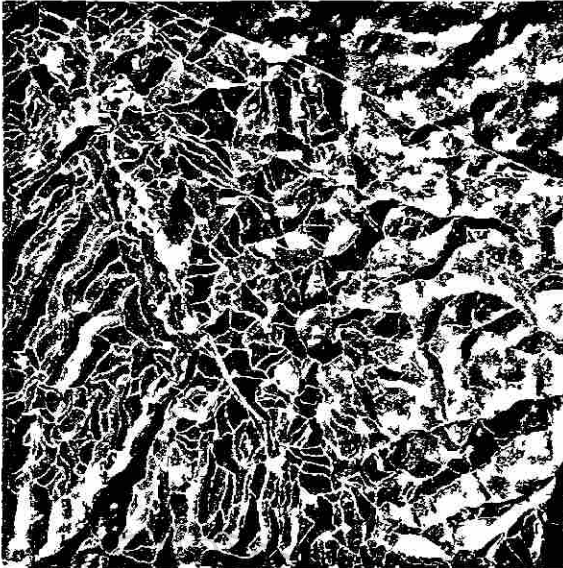
Figura 73. Integración de los dos criterios y generación de los Subrodales modelados.

La evaluación de varianzas entre clases dentro de subrodales digitalizados (método tradicional) y modelados se observan en la tabla 30.

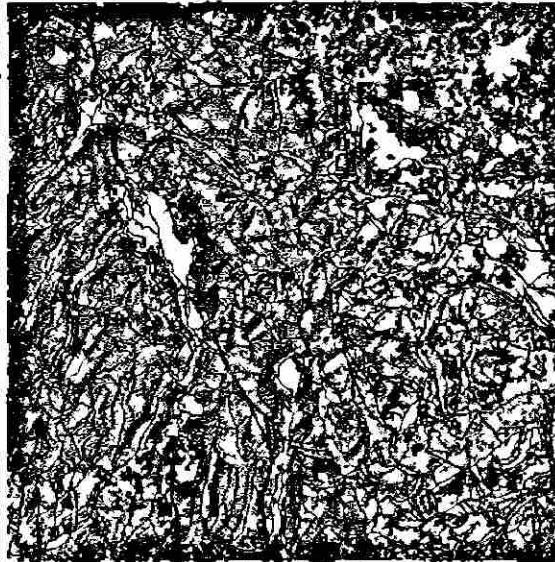
Estratificación.	Varianza promedio	%
En Subrodales digitalizados de toda el área de estudio	10.30	64.43
En Subrodales digitalizados dedicados a producción	8.35	52.19
En subrodales modelados	2.64	8.44

Tabla 30. Variabilidad de clases dentro de subrodales

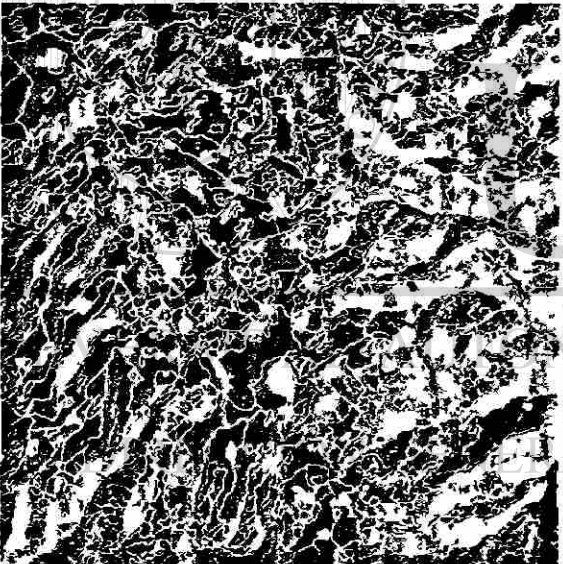




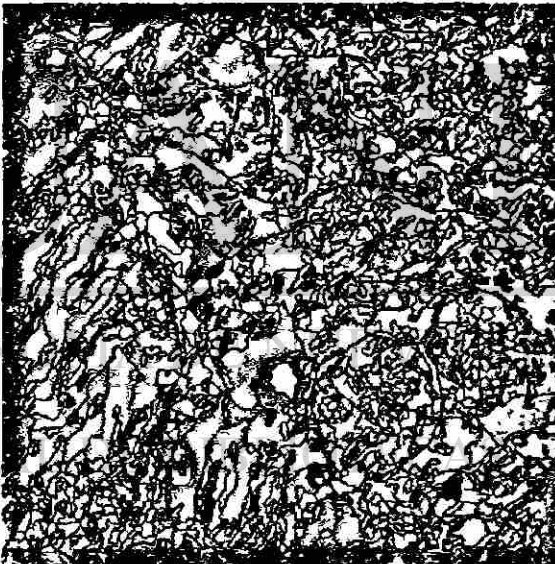
*Figura 74. Subrodales digitalizados sobre imagen Landsat-ETM+.*



*Figura 75. Subrodales digitalizados sobre clasificación.*



*Figura 76. Subrodales modelados sobre imagen Landsat-ETM+.*



*Figura 77. Subrodales modelados sobre clasificación.*

### **5.9.1. Definición de zonas de protección dentro del subrodal (segregación)**

La integración las vías de comunicación y transmisión, así como los cauces modelados para la definición de zonas y superficies de segregación en cada subrodal (figuras 78 y 79).

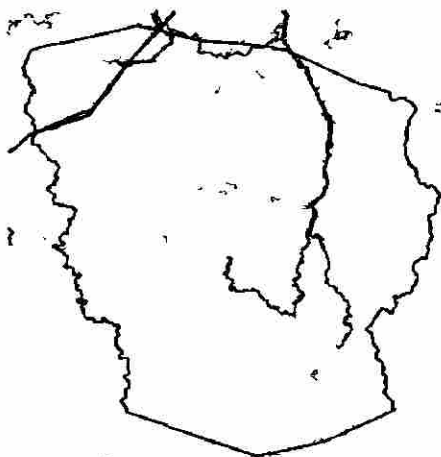


Figura 78. Vías de comunicación y transmisión

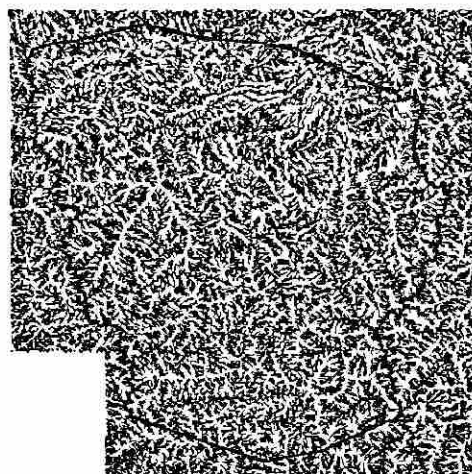


Figura 79. Cauces.

Una comparación gráfica de los trabajos cartográficos existentes y la nueva información dasocrática digital generada se muestra en las figuras 80 y 81.

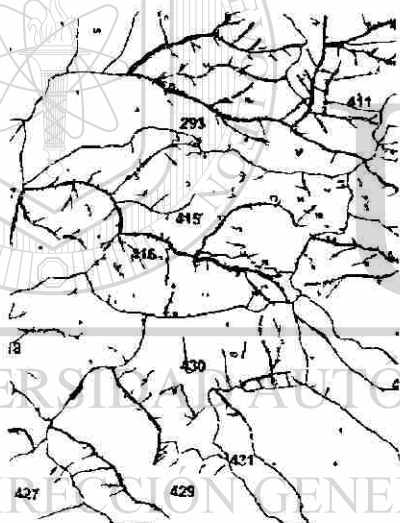


Figura 80. Cartografía dasocrática existente



Figura 81. Información digital generada.

### 5.10. Integración de información modelada a la dasocrática existente

A partir de la información integrada se analizó el efecto de la altura sobre el nivel del mar, temperatura y exposición para caracterizar la Influencia de factores del medio físico en la distribución de la vegetación.

Al comparar el resultado de la clasificación de la imagen Landsat-ETM+, con los pisos altimétricos del modelo digital de elevación (figura 82 y 83), podemos observar:

- Una zona de transición ubicada en los 1,400 m.s.n.m., la cual coincide con la isoterma media anual de los 18°C (figura 67). La cual divide al área de estudio en comunidades de bosques de clima templado frío y selvas cálido húmedas
- La dominancia del bosque de pino entre los 2,600 a 2,800 m.s.n.m.
- Gran cantidad de superficie por debajo de los 1,900 m.s.n.m., presenta escasa cobertura arbórea, dominada principalmente por pastizales (agrupando suelos desnudos y roqueríos).

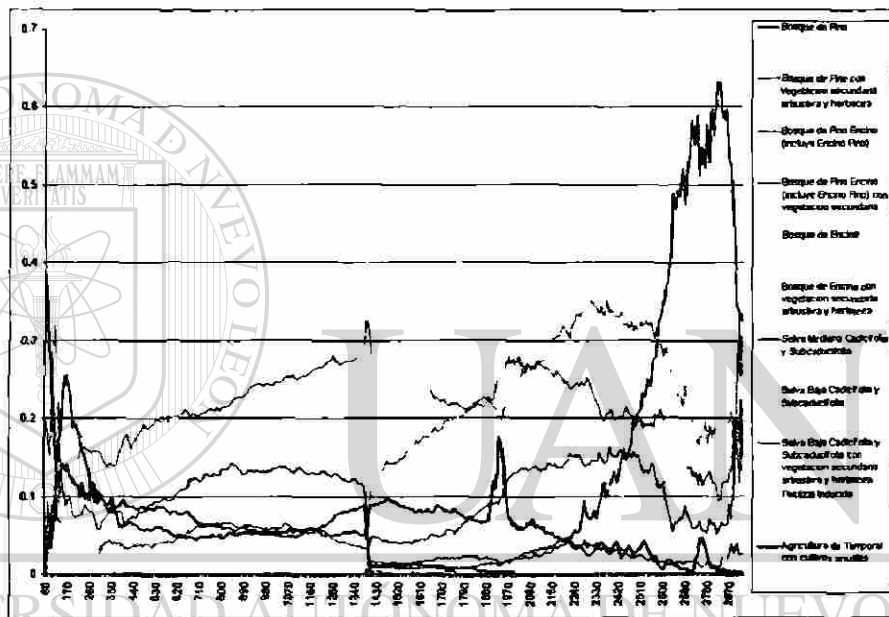


Figura 82. Distribución altitudinal porcentual de tipos de vegetación y uso de suelo.

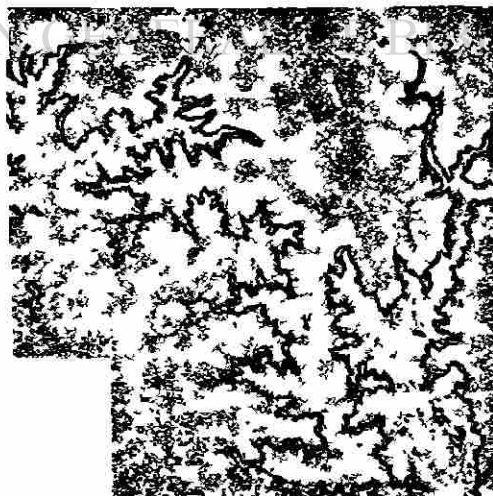


Figura 83. Clasificación de tipos de vegetación y usos de suelo, según Inventario Nacional Forestal 2000, curva de nivel de los 1,400 m.s.n.m. en negro, e isoterma media anual de los 18°C en rojo.

Con base en la información dasocrática se analizó la distribución de las diferentes especies del género *Pinus* en los rodales de producción (figura 84). Así mismo, se evaluó el efecto de elevación-exposición en la distribución de Otras Coníferas (figura 85), *Pinus cooperii* (figura 86), *Pinus durangensis* (figura 87), *Pinus Teocote* (figura 88), *Pinus leiophylla* (figura 89), *Pinus engelmannii* (figura 90), *Pinus herrerae* (figura 91), *Pinus spp.* (figura 92).

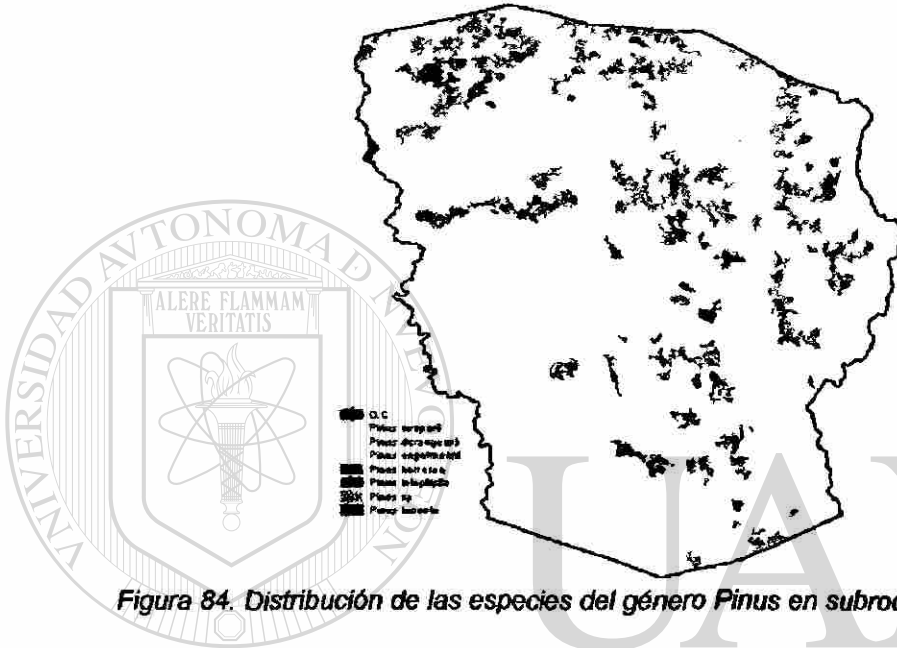


Figura 84. Distribución de las especies del género *Pinus* en subrodales de producción

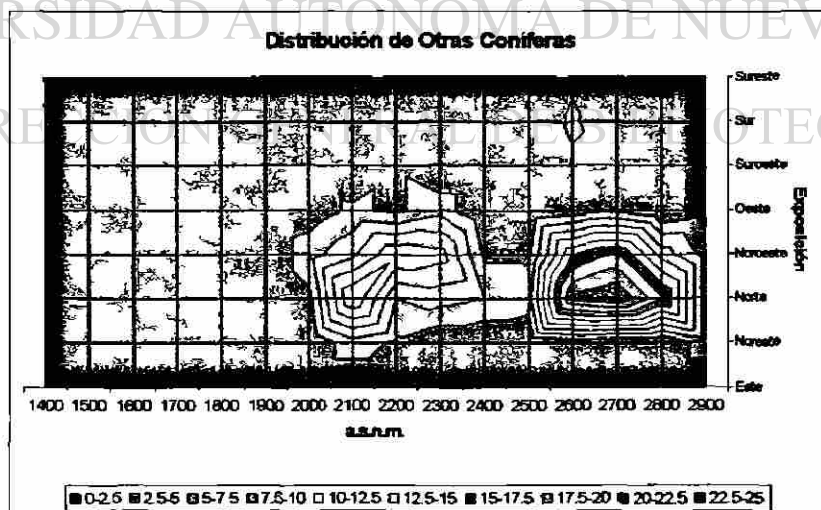


Figura 85. Distribución de Otras Coníferas en subrodales de producción.

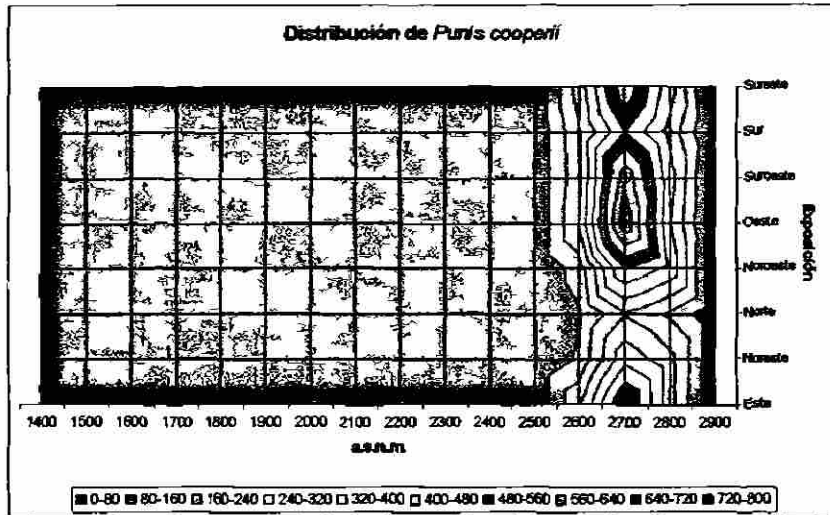


Figura 86. Distribución de *Pinus cooperii* en subrodales de producción.

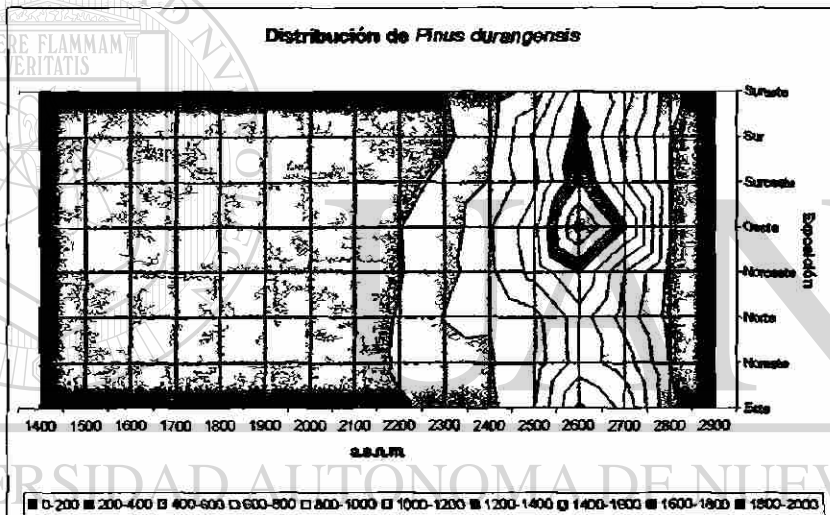


Figura 87. Distribución de *Pinus durangensis* en subrodales de producción.

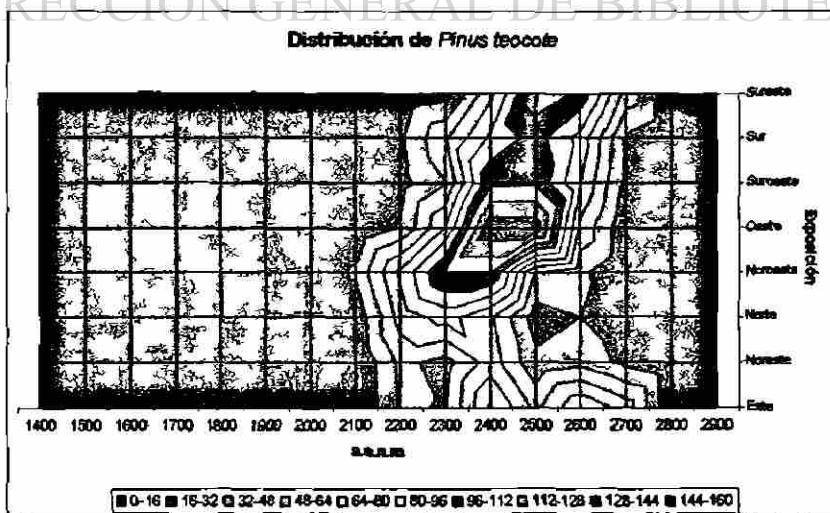


Figura 88. Distribución de *Pinus teocote* en subrodales de producción.

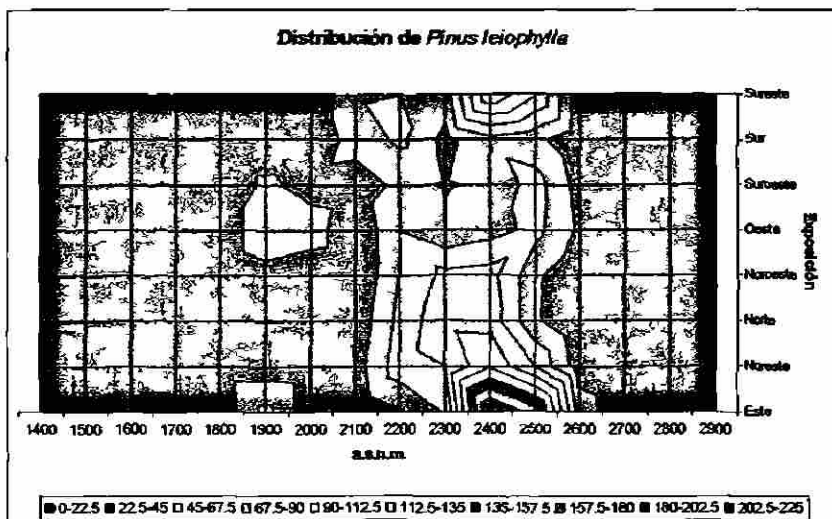


Figura 89. Distribución de *Pinus leiophylla* en subrodales de producción.

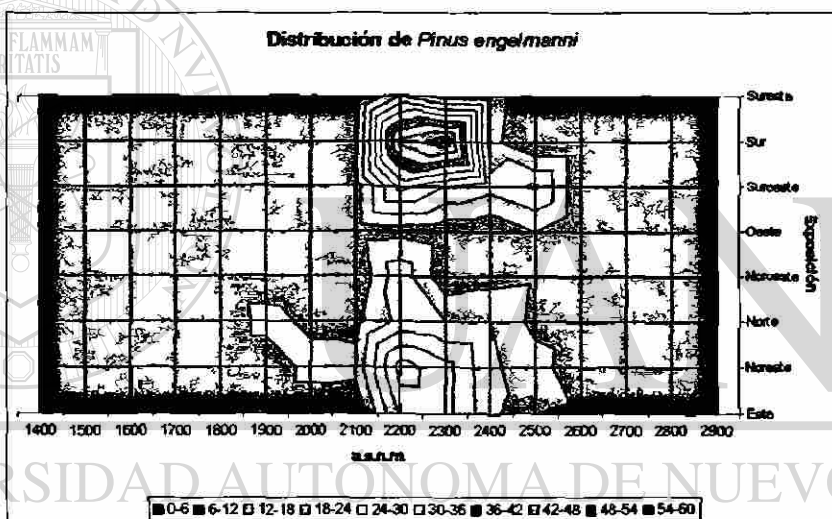


Figura 90. Distribución de *Pinus engelmannii* en subrodales de producción.

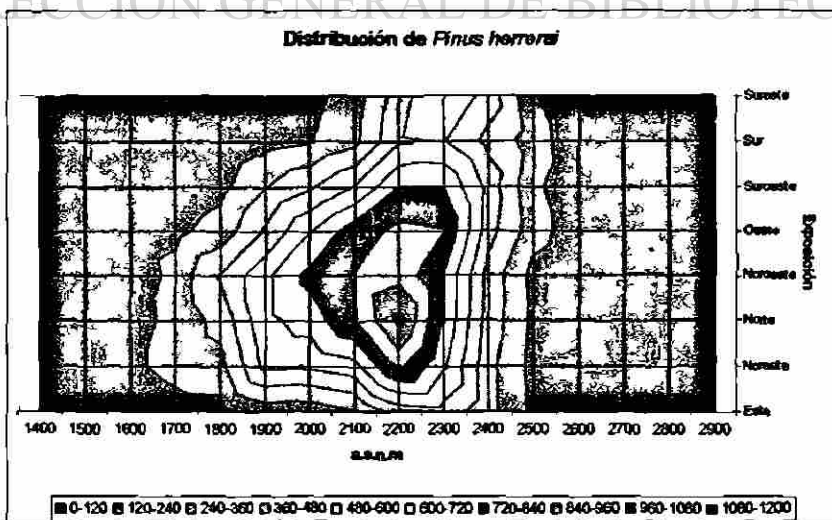


Figura 91. Distribución de *Pinus herrerae* en subrodales de producción.

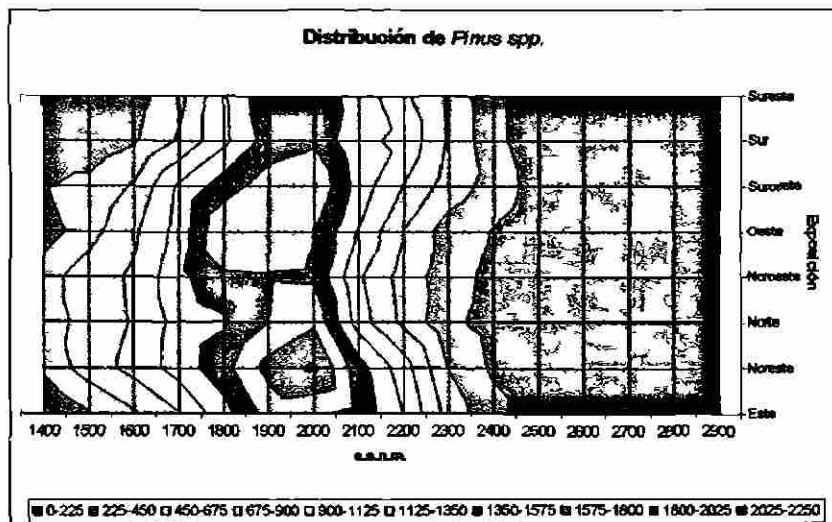


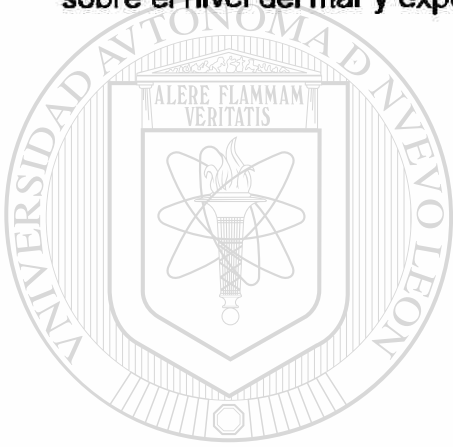
Figura 92. Distribución de *Pinus* spp. en subrodales de producción.

Combinando la influencia de elevación con exposición, queda claramente definida la distribución de especies de la siguiente forma:

- Bosques de Otras Coníferas, registra una marcada preferencia por exposiciones Norte y elevaciones entre 2,600 a 2,720 m.s.n.m.
- Bosque de *Pinus cooperii*, manifiesta una clara preferencia altitudinal de 2,700 m.s.n.m. en dos grupos de exposiciones, mas acentuado al Oeste y otra de menor cantidad al Sureste.
- Bosque de *Pinus durangensis*, con preferencia a exposiciones Oeste, altitudinalmente en 2,600 m.s.n.m. con tendencia de mayor facilidad de distribución a elevaciones menores que mayores.
- Bosque de *Pinus teocote*, de distribución en exposiciones Oeste y altitudes entre 2,370 a 2,510 m.s.n.m.
- Bosque de *Pinus leiophylla*, con marcada exposición Este y elevaciones de 2,400 m.s.n.m.
- Bosque de *Pinus engelmanni* registró preferencias de exposición Sur y elevación de 2,300 m.s.n.m.

- Bosque de *Pinus herreraei*, con una distribución en las zonas entre 2,230 a 2,140 m.s.n.m. y exposición Norte, aunque su cobertura se manifiesta muy extendida.
- Bosque de *Pinus spp.*, refiriéndose a especies de pino no identificadas durante el trabajo de campo del inventario, cuya distribución es muy extendida. Con ligera preferencia a exposiciones Noreste y elevaciones de 1,890 a 2,050 m.s.n.m.

Si juntamos todas las gráficas en una sola, es fácil comprender que cada especie ocupa un lugar determinado en este espacio bidimensional de altura sobre el nivel del mar y exposición.



UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS





## **6. Discusión**

Para la zona de estudio, la información topográfica contenida en los conjuntos de datos vectoriales escala 1:50,000 de INEGI, fue adecuada para la creación del modelo digital de elevación de 15x15 m, de donde se derivó pendientes, exposiciones, modelo digital de iluminación (para normalización topográfica), cuencas, subcuencas, microcuencas, submicrocuencas y cauces. Sin embargo, no es recomendable utilizar los modelos digitales de elevación elaborados por INEGI, porque su resolución espacial es de 50x50m, resultando difícil de integrarlo al análisis de imágenes Landsat.

La información temática de INEGI escala 1:250,000, sobre geología, edafología y climas no es adecuada y debe trabajarse más a detalle si se desea mayor precisión al evaluar su influencia en la dinámica ecológica de la región. Incluso, la información de precipitación y temperaturas (isoyetas e isotermas) podría calificarse de muy genérica; sin embargo, su integración y procesado generó buenos resultados analíticos.

El modelo de normalización topográfica que mejores resultados ofreció fue la modificación propuesta a la ecuación de Civco (1989). Su eficacia se demuestra en la reducción del efecto topográfico y el incremento en la precisión de clasificación.

La ecuación de Civco (1989) es un método sencillo, de fácil aplicación; sin embargo, el coeficiente de corrección puede ser elaborado para cada tipo de vegetación existente, sobre todo en áreas forestales como las de México con tanta diversidad de comunidades. Es por ello que la modificación propuesta en el presente trabajo, sustituyendo el coeficiente de corrección por la constante de Minnaert ofrece mejores resultados, ya que puede ser aplicado en diferentes tipos de imágenes y condiciones ecológicas, debido a que sólo depende del modelo de iluminación y su correlación con cada banda.

La integración de información de inventarios y manejo forestal al sistema permitió obtener datos de primera mano a cerca de las comunidades forestales existentes, así como facilitar la selección sitios de muestreo para la definición de

firmas espectrales de cada tipo de vegetación o uso de suelo y su posterior proceso de clasificación y validación de la misma. Por tal motivo, antes de realizar este tipo de trabajos, es necesario evaluar la disponibilidad, temporalidad, estructura y formato en los que se encuentra esta información, para poder evaluar el tiempo necesario a invertir en su generación, captura e integración. Lo anterior además de posibles trabajos de actualización, propiciados por la disponibilidad de nuevas herramientas e información de mejor calidad.

La planeación para la estructura de la base de datos permitió seleccionar sólo los reportes de manejo necesarios a integrar, buscando evitar redundancias sin perder eficiencia. Por tal motivo, es recomendable hacer un análisis exhaustivo de la información disponible, y así definir las variables necesarias y el orden de las mismas en la estructuración de bases de datos funcionales y suficientes.

Las firmas espectrales registraron independencia estadística y patrones espectrales definidos, pero a su vez muy distintivos entre grupos. Para el grupo de clima templado, otras coníferas, pino, pino-encino y encino, muestran un patrón espectral semejante en todas las bandas pero con incremento de valores respectivamente, típico de coberturas arbóreas (con poca diferencia entre valores de banda4 y banda5). *Pinus lumholtzii*, encino-pino y matorral de encino, también muestran un patrón espectral semejante en todas las bandas típico de coberturas arbustivas (con altos valores en la banda5). Para el grupo de clima cálido, las selvas medianas muestran también un patrón específico del tipo de coberturas arbóreas, en cambio las selvas bajas un patrón específico del tipo de coberturas arbustivas. En el grupo de otros usos, se presentan valores de banda3 superiores a banda4, típicos de superficies con escasa o desprovista de vegetación.

Una comparación entre los resultados de Inventario Nacional Forestal 2000 y la clasificación de cobertura vegetal y uso de suelo (tabla 31), muestra marcadas diferencias, pues destaca la aparición de dos nuevas clases, Roqueríos y Cuerpos de Agua. En especial destaca la clase roqueríos pues ocupa una cuarta parte (24.24%) de la superficie total del predio. El bosque de encino que

reportaba para el inventario el 9.21%, cubre el 30.21%. El bosque de pino-encino que dominaba en el inventario con el 23.85%, registra solo el 13.76%. El bosque de pino con 21.29%, con tan solo el 5.08%.

Las zonas de cultivos y pastizales que cubrían el 1% y 3% respectivamente, resultaron con 5.58% y 4.12%.

COMUNIDAD	Inv. Nac. Ftal. 2000 (Hectáreas)	Clasificación 2000 (Hectáreas)
AGRICULTURA DE TEMPORAL CON CULTIVOS ANUALES Y SUELOS DESNUDOS	2,440	13,443
BOSQUE DE ENCINO	22,170	72,723
BOSQUE DE ENCINO CON VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA Y HERBACEA	31,101	2,523
BOSQUE DE PINO	51,263	12,236
BOSQUE DE PINO CON VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA Y HERBACEA	16,580	11,437
BOSQUE DE PINO-ENCINO (INCLUYE ENCINO-PINO)	57,421	33,126
BOSQUE DE PINO-ENCINO (INCLUYE ENCINO-PINO) CON VEGETACION SECUNDARIA	28,896	1,954
PASTIZAL INDUCIDO	7,855	9,922
SELVA BAJA CADUCIFOLIA Y SUBCADUCIFOLIA	8,683	5,621
SELVA BAJA CADUCIFOLIA Y SUBCADUCIFOLIA CON VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA Y HERBACEA	14,176	12,489
SELVA MEDIANA CADUCIFOLIA Y SUBCADUCIFOLIA	155	6,833
ROQUERIOS		58,358
CUERPOS DE AGUA		75
<b>TOTAL</b>	<b>240,740</b>	<b>240,740</b>

Tabla 31. Comparación de superficies de cobertura vegetal y uso de suelo.

Las diferencias entre los resultados del Inventario Nacional Forestal 2000 y la clasificación realizada, denotan la falta de evaluación en áreas que muestran signos de deterioro como lo son roqueríos y/o suelos desnudos, cultivos, pastizales y el incremento del bosque de encino sobre el bosque de pino, debido principalmente a la aplicación de metodologías de trabajo cartográfico subjetivas y discrecionales.

Los resultados obtenidos de la aplicación de índices para evaluar cobertura vegetal en percepción remota (NDVI, PCA y Tasseled Cap) registraron una alta correlación entre ellos (coeficiente > 0.92 y  $R^2 > 0.85$ ) y resultados muy parecidos, probando que en este caso que cualquiera de ellos es eficiente. Ya que al compararse con los distintos tipos de vegetación mostraron consistencia,

registrando bajas densidades de cobertura en pastizales, bosques de *Pinus lumholtzii* y selvas bajas caducifolias, en cambio, altas densidades en bosques de otras coníferas, pino, pino-encino, y selvas medianas.

Tasseled Cap registró la más alta correlación con el índice de Reineke en todas las anualidades, sin embargo la diferencia respecto a los otros índices fue reducida.

La cuarta anualidad fue la que registró mayor correlación para todos los índices de cobertura vegetal (NDVI=0.46, PCA=0.45 y Tasseled Cap=0.49), siendo la siguiente anualidad a intervenir y la que mostraba mayor densidad.

La comparación de la variable cobertura de copas (gráfica 21), mostró altos valores de NDVI para los tratamientos de aclareos (ACL) y cortas de regeneración (CR). En cambio, el tratamiento corta de liberación (CL), muestra valores altos de NDVI, debido a que son subrodales con regeneración establecida a los que se les va a aplicar el tratamiento.

La comparación entre variables registradas durante el inventario y la información generada mediante modelaciones, índices o clasificaciones tiene como propósito el identificar que tipo de información puede inferirse a partir de esta. Sin embargo, en el caso de cobertura de copas, índice de densidad de Reineke, ICA e IMA, de los cuales esperaba una proporcionalidad casi directa, no resultó de la forma esperada. La mayor aproximación en correlación se presentó entre NDVI y la cobertura de copas para la cuarta anualidad. Esta falta de correlación entre variables se atribuye principalmente a la gran variabilidad dentro de los subrodales de la cartografía dasocrática.

En términos generales, la mayor tasa de deforestación se ha registrado en las superficies no dedicadas a producción forestal maderable. Donde el avance de la frontera agropecuaria, incendios forestales, y las áreas ya impactadas no se han recuperado, cubriendo casi la mitad del territorio ejidal (47.57%).

Al evaluar el análisis multitemporal en los tratamientos por aplicar de la cuarta anualidad, la corta de regeneración (CR) y los aclareos (ACL), registran tasas de reforestación, debido al incremento de cobertura vegetal entre fechas. Las cortas

de liberación resultado de cortas de regeneración que respondieron positivamente al tratamiento registran tasas de reforestación, en cambio, aquellas donde no se ha podido restablecer completamente la masa forestal por diversas causas, registran áreas con baja deforestación.

Respecto al grupo de tratamientos de selección, el definido y condicionado por pendiente (SELF), es el que registra mejores valores de reforestación, en cambio, los definidos y condicionados por pobreza de sitio (SELP) y por composición de pino (SELC), registran bajos niveles de reforestación, denotando que presentan áreas que se han mantenido con escasa vegetación durante todo el período de análisis.

La metodología aplicada para la modelación hidrológica es una herramienta de gran utilidad ya que genera información fundamental en los procesos de estratificación, definición de áreas de segregación, estimación de caudales, evaluación de impactos hidrológicos a ecosistemas e identificación de áreas prioritarias de reforestación. En México, la información sobre cuencas se encuentra en cartas escala 1:250,000 y es muy genérica para este tipo de análisis.

El impacto a los escurrimientos derivado del cambio de cobertura forestal durante el periodo 1973-2000, se manifiesta en el incremento de coeficientes de escurrimiento y a su vez, en los volúmenes escurridos durante cada evento hidrometeorológico, resultando en avenidas con mayores caudales, mayor capacidad erosiva y pérdida de suelos, mayor impacto en comunidades aguas abajo por el desbordamiento de cauces y menor capacidad de retención y administración del recurso agua.

La subcuenca del río Baluarte registró un incremento global en el escurrimiento promedio anual de sus avenidas del 41.43%. De 2,005,612,151 m<sup>3</sup> en 1973 a 2,836,554,825 m<sup>3</sup> en 2000, con un diferencial de 830,942,674 m<sup>3</sup>. Con diferencia de crestas en el hidrograma hasta de 7,120,527 m<sup>3</sup> equivalentes al 49.13%.

La subcuenca del río San Diego registró un incremento global en el escurrimiento promedio anual de sus avenidas del 40.78%. De 633,315,237 m<sup>3</sup> en 1973 a

891,555,776 m<sup>3</sup> en 2000, con un diferencial de 348,240,539 m<sup>3</sup>. Con diferencia de crestas en el hidrograma hasta de 3,823,179 m<sup>3</sup> equivalentes al 45.32%

las microcuencas que mayor impacto registran, se encuentran en la zona de las quebradas, principalmente en las zonas mas bajas.

Al comparar el grado de deterioro por microcuenca con la distribución de la población, queda de manifiesto que las actividades productivas agropecuarias que se desarrollan en la región de las quebradas, es la que contribuye en gran medida con el deterioro de esa zona.

El ejido Pueblo Nuevo muestra valores que lo ubican muy cercano al promedio en cuanto a superficie total per cápita y superficie de pino-encino per cápita. Relativamente cercano al promedio de bosques de encino-pino y selvas medianas y bajas per cápita. Sin embargo, registra una superficie para usos agropecuarios por debajo de la media, a pesar de las evaluaciones y problemática anteriormente descrita. Por ésta razón, existe la posibilidad de que la frontera agropecuaria continúe extendiéndose fuera de las áreas de producción forestal en el ejido.

En la zona de estudio, la orientación de las pendientes (exposición) influye en gran medida en los patrones de distribución de los tipos de vegetación, las exposiciones noroeste (NW) crean condiciones microclimáticas donde se establecen bosques de otras coníferas, pinos, encinos y selvas medianas. En cambio, en las exposiciones sureste (SE) se establecen bosques abiertos de pino (baja densidad), encino-pino, *Pinus lumholtzii* y selvas bajas. Las exposiciones de transición son suroeste (SW) y noreste (NE).

La integración de submicrocuencas modeladas y exposiciones preferenciales generó una estratificación a nivel rodal de muy buena calidad, la cual al ser comparada con la cartografía dasocrática existente, permitió identificar trazos equivocados, redefinir límites y generar trazos faltantes, mejorando la precisión de los trabajos ya existentes. Para la definición de subrodales, la delimitación de los tipos de vegetación y usos de suelo dentro de cada rodal fue fundamental.

Debido a la resolución espacial utilizada en la imagen y el detalle de la misma, generó píxeles aislados o en pequeños grupos de clases distintas, los cuales dificultaban el proceso de vectorización en líneas regulares claramente definidas. Por tal motivo, fue necesario filtrar la clasificación para eliminar este tipo de problemas y definir con mayor claridad las comunidades forestales y usos de suelo presentes para su posterior vectorización.

Al comparar la variabilidad de tipos de vegetación y uso de suelo presente en los rodales de producción y en los rodales modelados, la diferencia porcentual de varianza es de 43.75%, los que demuestra que son muy heterogéneos, haciéndolos inapropiados para correlacionar variables dasocráticas con índices derivados de las imágenes de satélite.

Aunque los resultados de rodalización automatizada fueron percibidos por los prestadores de servicios técnicos forestales del ejido Pueblo Nuevo como “demasiado específicos y difíciles de manejar”, la precisión de la información fue muy apreciada y útil para mejorar su trabajo.

Entre los factores del medio físico que mostraron mayor influencia en la distribución de la vegetación, esta la exposición la cual genera condiciones microclimáticas, la altura sobre el nivel del mar, la cual influye sobre algunas condiciones macroclimáticas, creando condiciones térmicas de latitudes superiores. Definiendo para el área de estudio una zona de transición entre comunidades cálidas y templadas en la cota 1,400 m.s.n.m., que coincide con la isoterma media anual de 18°C.

## **7. Conclusión**

1. Los modelos geoespaciales permiten evaluar grandes extensiones de terreno de forma detallada, facilitando la cuantificación, monitoreo, análisis y comprensión de la dinámica de ecosistemas; sin embargo, es necesario recalcar la importancia de los métodos de validación de información, evaluación de clasificación, así como la documentación clara y sistemática de procesos.
2. Los modelos geoespaciales son nuevas tecnologías que permiten establecer metodologías de trabajo y estándares específicos para el proceso y análisis de información relevante del manejo forestal, el cual, actualmente continúa apoyándose en tecnologías de evaluación del territorio e integración poco eficientes, con criterios variables, discretos y no estandarizados.
3. Mediante el uso de modelos geoespaciales es posible localizar y evaluar perturbaciones como incendios, plagas o enfermedades en estado avanzado, desmontes por cambios de usos de suelo, tratamientos silvícolas como cortas de regeneración y aclareos; no obstante, efectos débiles de plagas y enfermedades y tratamientos de selección son muy difíciles de evaluar con este tipo de sensores.
4. La integración de información de inventarios y manejo forestal a los modelos geoespaciales ofrece muchas ventajas desde el punto de vista cartográfico y de bases de datos, para la actualización, manejo, análisis, consulta y distribución de información.
5. El proceso de Normalización Topográfica de imágenes Landsat es un proceso importante para mejorar significativamente la precisión de clasificación y análisis.
6. La eliminación del efecto topográfico depende de la geometría entre el sol y la superficie de terreno, por tanto en regiones muy accidentadas es posible minimizarlo, pero muy difícil eliminarlo.
7. La información topográfica escala 1:250,000 es adecuada para la normalización topográfica de imágenes Landsat MSS con resolución de



60x60 metros, si se desea trabajar imágenes Landsat TM, será necesario el uso de información topográfica escala 1:50,000, para generar modelos digitales de elevación de mayor detalle.

8. La modelación hidrológica permitió una clara definición de cuencas, subcuencas, microcuencas, submicrocuencas, cauces y volúmenes escurridos. A partir de la cual se modelaron rodales, subrodales, áreas de segregación y se evaluó el impacto por cambios de cobertura forestal.
9. Los tipos de vegetación y uso de suelo derivados de la clasificación de la imagen de satélite, permitieron elaborar la subrodalización del área de estudio. Sin embargo, el resultado obtenido se considera demasiado preciso para los requerimientos de manejo actuales. Esto puede ser mejorado, con una definición de área mínima de mapeo menor para pequeños manchones en áreas abiertas y mayor para grandes masas compactas.
10. La variabilidad registrada entre el método tradicional de estratificación y el desarrollado en el presente trabajo, permite marcar diferencias evidentes. Esta "variabilidad tan amplia" dentro de los subrodales, es una de las principales causas de que la comparación entre variables registradas en campo durante los inventarios, no manifiesten claras y determinantes correlaciones con las modeladas o generadas en el presente trabajo. Por tal motivo, será necesario desarrollar nuevos trabajos de investigación en zonas más específicas o puntuales, buscando disminuir la variación de la información actual.
11. Para elaborar subrodales menos específicos y más fáciles de manejar, incrementando la varianza interna hasta límites aceptables se sugiere:
  - múltiple aplicación de filtros (2, 3 o 4), enfocados solo a tipos de vegetación de interés (otras coníferas, pino, pino-encino, encino-pino, encino, etc.)
  - manteniendo el área mínima de mapeo en dos hectáreas para pequeños grupos de vegetación (o manchones), e incrementar el área mínima de mapeo de cuatro a ocho veces en agrupaciones mayores.

12. Uno de los trabajos futuros resultantes de este, es el integrar las variables registradas durante el inventario a nivel de sitio (no de subrodal) a los subrodales modelados, para minimizar varianza, trabajando con comunidades mucho más homogéneas.

13. La metodología de evaluación del deterioro se presenta como una alternativa para:

- Describir la evolución del deterioro por procesos de deforestación presentes en el área.
- Evaluar el desempeño de los planes de manejo a lo largo del tiempo.
- Probar las ventajas del manejo y aprovechamiento forestal, así como las desventajas de las regiones carentes de planes de manejo o administración de los aprovechamientos de los recursos naturales.
- Evaluar el impacto de los tratamientos aplicados y aportar elementos de juicio en la aplicación de futuras intervenciones silvícolas.
- Evaluar el impacto al ciclo hidrológico y modificaciones de las avenidas en zonas aguas abajo de cuencas.
- Identificar submicrocuencas de mayor prioridad de conservación.

- 
- Orientar los esfuerzos para de forma precisa disminuir el riesgo y/o vulnerabilidad de poblaciones y zonas aguas abajo.

14. Si se desea aplicar un proceso de análisis multitemporal como el propuesto en el presente trabajo, éste deberá tomarse en cuenta:

- La variable espectral de las imágenes para determinar cuales bandas serán utilizadas en la elaboración del NDVI
- La variable espacial para determinar las resolución de las imágenes y el método para igualar este parámetro.
- La variable estacional, procurando que las imágenes sean de la misma época, poniendo especial énfasis en aspectos fenológicos y climáticos presentes en las escenas.

- La variable geométrica, para la correcta georreferencia entre imágenes.
  - La normalización de valores mínimos y máximos entre imágenes, apoyándose en características presentes en todas las escenas.
  - La validación en campo de los valores digitales y definición de rangos de densidad.
15. El aspecto de mayor relevancia en este tipo de análisis, es el identificar las áreas donde se detecte deforestación baja o alta y se tengan programados tratamientos o intervenciones de aprovechamiento, para de esta forma cambiarlos por actividades de protección, conservación y fomento, identificando las causas para orientar los esfuerzos sobre zonas específicas.
16. La metodología propuesta para evaluar el impacto de los cambios de cobertura forestal en la modificación de los escurrimientos, tiene por objetivo dar a conocer de forma cuantitativa, a cerca de la importancia del manejo y conservación de las zonas forestales y el agua en México.
17. Este tipo de tecnologías no pretende sustituir el trabajo de campo, sino por el contrario, facilitar los trabajos sistematizando y orientando los esfuerzos para desarrollar un mejor conocimiento específico de cada sitio de las áreas forestales.
18. Tomando en cuenta las fuertes presiones en la demanda de espacios, alimentos, y calidad de vida que se incrementan día con día, nos obliga a buscar formas más eficientes de administración de los recursos naturales.

## **8. Bibliografía**

Baret, F., G. Guyot y D. Major. 1989. TSAVI: A vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI or APAR estimation, in 12th Canadian Symposium on Remote Sensing and IGARSS 1990, Vancouver, Canada, July 10-14.

Benson A. y S. DeGloria. 1985. Interpretation of Landsat-4 Thematic Mapper and Multispectral Scanner Data for Forest Survey. University of California, Berkeley. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 51(9):1281-1289.

Bondelid, T. R., T. J. Jackson y R. H. McCuen. 1982. Estimating runoff curve numbers using remote sensing data. Proc. Int. Symp. On Rainfall-Runoff Modeling. Applied Modeling in Catchment Hydrology, Water Resource Publications. Littleton, CO. pp. 519-528.

Burrough, P.A. 1986. Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. Oxford University Press, New York, pp. 50.

Brownlie, R. K. y C. J. Terlesk. 1995. Using a geographical information system (GIS) to map and determine the extent of mayor soil disturbance resulting from a logging operation. New Zealand Forestry, 4(2):23-26.

Byrne, G. F., P. F. Crapper, y K. K. Mayo. 1980. Monitoring land cover change by principal component analysis of multi-temporal Landsat data. Remote Sensing of Environment, 10:175-184.

Chow V. T., D. R. Maidment y L. W. Mays. 1988. Applied Hydrology. McGraw-Hill. Series in Water Resources and Environmental Engineering. pp. 572.

Civco D. 1989. Topographic Normalization of Landsat Thematic Mapper Digital Imagery. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 55(9):1303-1309.

Clevers, J. 1988. The derivation of a simplified reflectance model for the estimation of leaf area index, Remote Sensing of Environment. 35:53-70.

Congalton, R., K. Green y J. Teply. 1993. Mapping-old growth forest on National Forest and Park Lands in the Pacific Northwest from remotely sensed data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 59(4):529-535.

Colby, J. D. 1991. Topographic Normalization in Rugged Terrain. Department of Geography, University of Colorado. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 57(5):531-537.

CONABIO, 1998. Uso de Suelo y Vegetación agrupado. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática - Instituto Nacional de Ecología 1996. México, D.F.

Conese, C., M. A. Gialbert, F. Maselli y L. Bottai. 1993. Topographic Normalization of TM Scenes through the Use of an Atmospheric Correction Method and Digital Terrain Models. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 59(12):1745-1753.

Coppin, P. R. y M. E. Bauer. 1996. Digital change detection in forest ecosystems with remotely sensed imagery, *Remote Sensing Reviews*. 13:207-234.

Coulombe, S. y K. Lowell. 1995. Ground-truth verification of relations between forest basal area and certain ecophysiological factors using a GIS. *Landscape and Urban Planning*. 32(2):127-136.

Crippen, R. E. 1990. Calculating the Vegetation Index Faster, *Remote Sensing of Environment*, 34:71-73.

Crist, E. P. 1986. Vegetation and Soils Information Contained in Transformed Thematic Mapper Data. Proceedings of IGARSS' 86 Symposium, ESA Publications Division, ESA SP-254.

Crist, E. P., y R. J. Kauth. 1986. The Tasseled Cap De-Mystified. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 52(1):81-86.

Chavez P. S. 1989. Radiometric Calibration of Landsat Thematic Mapper Multispectral Images. US Geological Survey, Flagstaff, AZ. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 55(9):1285-1294.

Davis K. P. 1966. Forest Management: regulation and valuation. McGraw-Hill Series in Forest Resources. Yale University. EEUU. pp. 517.

ERDAS IMAGINE 8.5. 1999. Field Guide, Fifth Edition, ERDAS, Inc., 2801 Buford Highway, NE. Atlanta, Georgia, 30329-2137 USA. pp. 672.

Eckhardt, D. W., J. P. Verdin y G. R. Lyford. 1990. Automated update of an irrigated lands GIS using SPOT HRV imagery, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 56:1515-1522.

Faust, N. L. 1989. Image Enhancement. Volumen 20, Suplemento 5 de la Enciclopedia de Tecnología y Ciencias Computacionales, editada por Kent A. y James G. W. New York: Marcel Dekker, Inc. pp. 424.

Fiorella, M. y W. J. Ripple. 1993. Determining Successional Stage of Temperate Coniferous Forests with Landsat Satellite Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 59(2):239-246.

Fung, T. y E. LeDrew. 1987. Application of principal components analysis to change detection, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 53:1649-1658.

Harrison J. D. 1951. *Inventario Forestal Nacional*. FAO – Estudios de Silvicultura y Productos Forestales. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la alimentación, Roma Italia. pp. 102.

Hayes, D. J. y S. A. Sader. 2001. Comparison of Change-Detection Techniques for Monitoring Tropical Forest Clearing and Vegetation Regrowth in a Time Series. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 67:1067-1075.

Holben B. y C. Justice. 1980. The Topographic Effect on Spectral Response from Nadir-Pointing Sensors. Earth Resources Branch. NASA/Goddard Space Flight Center. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 46(9):1191-1200.

Huete, A. R., R. D. Jackson y D. F. Post. 1985. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds, *Remote Sensing of Environment*. 17:37-53.

Huete, A. R. 1988. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI), *Remote Sensing of Environment*. 25:295-309.

Hutchinson, M.F. 1988. Calculation of hydrologically sound digital elevation models. Third International Symposium on Spatial Data Handling, Sydney. Columbus, Ohio: International Geographical Union. pp. 117-133.

Hutchinson, M.F. 1989. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology*. 106:211-232.

Hutchinson, M. F. 1993. Development of a continent-wide DEM with applications to terrain and climate analysis. In: M. F. Goodchild *et al.* (ed.), *Environmental Modeling with GIS*. New York, Oxford University Press. pp. 392-399.

INEGI, 1981. Anexo Cartográfico del Estado de Durango, Carta Estatal, Climas, escala 1:1,000,000. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México, D.F.

INEGI, 1981. Anexo Cartográfico del Estado de Durango, Carta Estatal, Regionalización Fisiográfica, escala 1:1,000,000. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México, D.F.

INEGI, 1984. Carta Geológica F13-2 "El Salto", escala 1:250,000. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México, D.F.

INEGI, 1988. Carta Edafológica F13-2 "El Salto", escala 1:250,000. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México, D.F.

INEGI, 1989. Carta Hidrológica de Aguas Superficiales F13-2 "El Salto", escala 1:250,000. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México, D.F.

INEGI. 1990. Guías para la Interpretación Cartográfica, Geología, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México, D.F. pp. 15.

INEGI. 1990. Guías para la Interpretación Cartográfica, Uso de suelo y vegetación, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México, D.F. pp. 21.

INEGI 1990, XI Censo General de Población y Vivienda 1990. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México, D.F.

INEGI. 1991. Guías para la Interpretación Cartográfica, Edafología, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México, D.F. pp. 17.

INEGI. 1991. Guías para la Interpretación Cartográfica, Hidrología subterránea y superficial, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México, D.F. pp. 32.

~~INEGI, 1992. Carta Uso de Suelo y Vegetación F13-2 "El Salto", escala 1:250,000. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México, D.F.~~

INEGI 1995, Censo de Población y Vivienda, Resultados Definitivos. Durango. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México, D.F.

INEGI. 2000. Conjunto de datos vectoriales de las cartas topográficas, escala 1:50,000. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. F13-A27, A28, A29, A37, A38, A39, A48, A49. México.

INEGI 2000, XII Censo General de Población y Vivienda 2000. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México, D.F.

Jackson, T. J., R. M. Ragan y W.N. Fitch. 1977. Test of Landsat-Based Urban Hydrologic Modeling. ASCE J. Water Resources Planning and Management Div. V 103. No. WR1, Proc. Papers 12950. pp. 141-158.

James N.D. 1981. *A History of English Forestry*. Blackwell, Oxford, Inglaterra, pp. 331.

Jensen J. R., K. Rutchey, M. S. Koch y S. Narumalani. 1995. Inland wetland change detection in the Everglades Water Conservation Area 2A using a time series of normalized remotely sensed data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 61:199-209.

Jensen, J. R. 1996. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall.

Jenson S. K. y J. O. Domingue. 1988. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 54(11):1593-1600.

Jordan, C. F. 1969. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor, *Ecology*, 50:663-666.

Jordan G.A. 1992. GIS and forest management: towards the next century. GIS'92 Symposium, section B3, 5pp.

Jordan, G. A. y J. Wardoyo. 1996. Assessing Management of Forest Landscapes with ARC/INFO and Easi/Pace. Resúmenes 16 Conferencia Annual de Usuarios de ESRI. CD de artículos publicados, ESRI.

Kohm K. A. y J. F. Franklin. 1997. *Creating a Forestry for the 21st Century*, Island Press, Washington, D.C. pp. 475.

Kowalik W. S., R. J. Lyon y P. Switzer. 1983. The Effects of Additive Radiance Terms on Radios of Landsat Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 49(5):659-669.

Kriegler, F. J., W. A. Malila, R. F. Nalepka, y W. Richardson. 1969. Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition, en *Proceedings of the Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment*, University of Michigan, Ann Arbor, MI, pp. 97-131.

Lang L. 1998. *Managing Natural Resouse with GIS*. ESRI Press, Redlands California. USA. pp. 117.

Lee, R.G. 1982. The classical sustained yield concept: content and philosophical origins. in *Sustained Yield* (Le Master, Baumgartner y Adams, Ed.) Simposio 27-28 de abril. Spokane Wa. Pullman, Wa. Washington State University, Conference Office, EE.UU. pp 150-154.



Leprieur C. E. y J. M. Durand. 1988. Influence of Topography on Forest Reflectance Using Landsat Thematic Mapper and Digital Terrain Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 54(4):491-496.

Lillesand, T. M. y R. W. Kiefer. 1987. *Remote Sensing and Image Interpretation*, 2nd edition\_, John Wiley and Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, pp. 721.

Lyon, J. G., D. Yuan, R. S. Lunetta y C. D. Elvidge. 1998. A change detection experiment using vegetation indices. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 64:143-150.

Macleod, R. D. y R. G. Congalton. 1998. A quantitative comparison of change-detection algorithms for monitoring elgrass from remotely sensed data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 64:207-216.

Mendoza M. A. 1993. *Conceptos básicos de Manejo Forestal*. Editorial Limusa, México, D.F. pp. 161.

Meráz A. R. 1998. Programa de Manejo Forestal 1997-2007. Ejido Pueblo Nuevo. pp. 126.

Muchoney, D. M. y B. N. Haack. 1994. Change detection for monitoring forest Defoliation, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60:1243-1251.

Naugle B. I. y J. D. Lashlee. 1992. Alleviating Topographic Influences on Land-Cover Classifications for Mobility and Combat Modeling. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 58(8):1217-1221.

Osmaston, F. C. 1968. *The management of forest*. George Allen and Unwin, Londres, Inglaterra, pp. 384.

Pouch G. W. y D. J. Campagna. 1990. Hyperspherical Direction Cosine Transformation for Separation of Spectral and Illumination Information in Digital Scanner Data. Department of Earth and Atmospheric Sciences, Purdue University. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 56(4):475-479.

Qi J., A. Chehbouni, A. R. Huete y Y. H. Kerr. 1994. Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI), *Remote Sensing of Environment*. 48:119-126.

Qi J., Y. Kerr, y A. Chehbouni. 1994. External Factor Consideration in Vegetation Index Development, en *Proc. of Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, ISPRS, pp. 723-730.

Reeder D., E. Bryant y R. Bimie. 1999. Topographic correction of satellite images. Paper Title: Removing the Topographic Effect from Digital Satellite Data.

Earth Science Department, Dartmouth College, Hanover. Presented in ERIM 13th International Conference on Applied Geologic Remote Sensing, Vancouver, Canada. 3 de Marzo de 1999.

Richardson, A. J. y J. H. Everitt. 1992. Using spectra vegetation indices to estimate rangeland productivity, *Geocarto International*. 1:63-69.

Richardson, A. J. y C. L. Wiegand. 1977. Distinguishing vegetation from soil background information, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 43:1541-1552.

Ritter P. 1987. A Vector-Based Slope and Aspect Generation Algorithm. Space Science Laboratory, University of California, Berkeley. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 53(8):1109-1111.

Rouse, J. W., R. H. Haas, J. A. Schell y D. W. Deering. 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS, Third ERTS Symposium, NASA SP-351, 1:309-317.

Sanchez V. 1987. Conceptos elementales de hidrología forestal. Agua, cuenca y vegetación. Vol. I. División de Ciencias Forestales, UACH. Chapingo, México. pp. 149.

S.A.R.H. 1992. Inventario Nacional Forestal de Gran Visión (Reporte Principal). Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Subsecretaría Forestal, Mex. Pp.72.

SEGOB 2000. Sistema Nacional de Información Municipal. Centro Nacional de Desarrollo Municipal. Secretaría de Gobernación., México, D.F.

SEMARNAT 2000. Cartografía Digital del Inventario Nacional Forestal 2000. Estado de Durango. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F.

Shasby M. y D. Carneggie. 1986. Vegetation and Terrain Mapping in Alaska Using Landsat MSS and Digital Terrain Data. US Geological Survey, Anchorage. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 52(6):779-786.

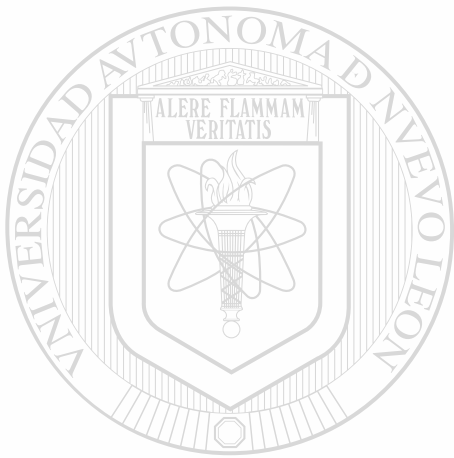
Smith J. A., L. T. Lie y K. J. Randson. 1980. The Lambertian Assumption and Lansat Data. College of Forestry and Natural Resources, Colorado State University. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 46(9):1183-1198.

Swain P. y S. Davis. 1978. Remote Sensing: The Quantitative Approach. New York: McGraw Hill Book Company. pp. 396.

Tarboton D. G., R. L. Bras y I. Rodriguez-Iturbe. 1991. On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data, Hydrological Processes. 5:81-100.

Tokola T., J. Sarkeala y M. Van Der Linden. 2001. Use of topographic correction in Landsat TM-based forest interpretation in Nepal. International Journal of Remote Sensing. 22(4):551-563.

Welch R. y W. Ehlers. 1987. Merging Multiresolution SPOT HRV and Landsat TM Data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 53(3):301-303.



UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



## **ANEXO I**

### **Normalización Topográfica**



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

En el hemisferio norte, en regiones de topografía accidentada, la información espectral de la superficie puede ser modificada por el efecto topográfico, esto se debe a la posición del sol dada la hora en la que se toma la imagen por el satélite, teniendo como resultado que la intensidad de luz reflejada por las pendientes de exposición sur-sureste es más intensa que las pendientes de exposición norte-noroeste aunque sustenten el mismo tipo de vegetación. El flujo de luz solar incidente sobre un área dada alcanza su valor máximo cuando el área esta orientada de forma perpendicular a los rayos solares. Aunque existen algunas variaciones dependiendo del tipo de superficie y/o condiciones atmosféricas, invariablemente; a mayor cantidad de luz incidente sobre la superficie, mayor luz será reflejada de regreso hacia el espacio.

Dichos cambios en iluminación pueden ser mal interpretados como cambios en las características de los objetos sobre la superficie, resultando en interpretaciones y clasificaciones incorrectas, así como mapas erróneos.

Este efecto es fácilmente observado en la imagen de satélite Landsat-TM, mostrada en la figura 93, la cual fue tomada el 8 de marzo de 2000, a las 11:22 a.m. con un ángulo de elevación del sol de  $51^{\circ} 08' 43.61''$  sobre el horizonte y un azimut de  $131^{\circ} 54' 26.5''$  ( $41^{\circ} 54' 26.5''$  SE). En ella se puede apreciar macizos montañosos con orientación NE-SW los cuales se caracterizan por mostrar píxeles brillantes en sus pendientes SE, y píxeles oscuros en sus pendientes NW. Aunque estas variaciones podrían ser importantes diferencias de vegetación entre exposiciones, es probable que el mismo tipo de vegetación se desarrolle en ambos lados. La mayor diferencia se manifiesta en la cantidad de luz disponible para cada exposición la cual es reflejada hacia el sensor.

Así tenemos que bosques de encino en pendientes NW son confundidos con bosques de pino en pendientes SE debido a que los valores de brillantes de sus píxeles son casi iguales o muy semejantes (figura 94).

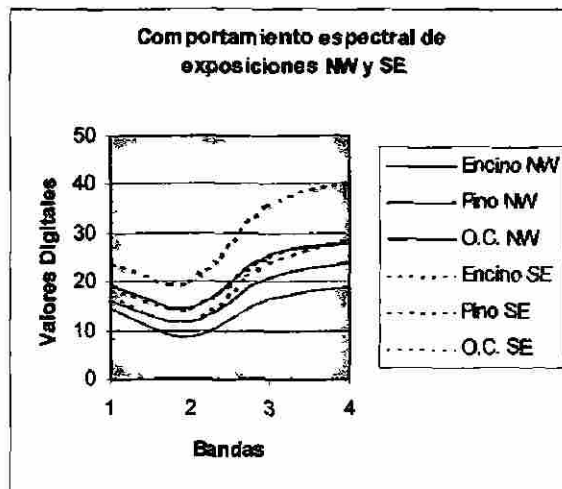


Figura 93. Imagen Landsat del área de estudio

Figura 94. Confusión en patrones espectrales en tipos de vegetación con diferente exposición.

El efecto topográfico se manifestó en los primeros intentos por desarrollar sistemas de clasificación automatizados como los de Cicone en 1977 (citado por Holben y Justice, 1980) y Woodcock en 1980 (citado por Civco, 1989).

Uno de los primeros intentos en simular y cuantificar el efecto topográfico fue realizado por Holben y Justice en 1980, el cual consistió en medir la radianza espectral diferencial de una superficie uniforme de arena bajo variadas combinaciones de ángulos y pendientes. Ellos encontraron que la magnitud del efecto topográfico varía en función de la inclinación y azimut solar, así como de la exposición y pendiente del terreno. Basados en este estudio de simulación, se sugiere que el modelo para reducir el efecto topográfico debería ser desarrollado incorporando geometrías solares y terrestres. Más tarde, en 1981 ellos mismos propusieron estrategias sencillas para corregir imágenes de satélite con índices entre bandas.

Entre las investigaciones que intentaron explicar el efecto topográfico, especialmente en datos digitales multispectrales Landsat y Spot, están las de Teillet en 1982 (citado por Leprieur, 1988), Kowalik en 1983, Shasby y Carnegie en 1986, May y Konyves en 1987 (citado por Franklin, 1994), Jones en 1988 y Kawata en 1988 (citado por Civco, 1989), Leprieur en 1988, Civco en 1989, Colby en 1991, Naugle en 1992, Reeder 1999, Tokola en 2001.

La mayoría de estos estudios intentaron evaluar y corregir el efecto negativo asociado al efecto topográfico, mediante la modificación de los valores de radianza superficial registrados por los sensores del satélite, apoyados en un modelo de relieve o iluminación.

Conese en 1993 trabajó con componentes principales, y Pouch y Campagna en 1990 mediante la dirección hiperesférica de coseno. Sin embargo, aunque estos métodos tuvieron buenos resultados, generalmente implicaron la pérdida de precisión e información estadística.

El término *Normalización Topográfica* fue utilizado por primera vez por Civco en 1989, el objetivo de su investigación fue el desarrollar una técnica que pudiera corregir la mayor cantidad posible del efecto topográfico presente en imágenes Landsat TM, mientras que al mismo tiempo, preservar las características espectrales de las escenas corregidas. Poniendo especial énfasis en remover este efecto de imágenes en condiciones de bajo ángulo de incidencia solar y topografía accidentada con cobertura forestal de bosques deciduos, donde el efecto topográfico es más pronunciado, permitiendo al analista clasificar los diferentes tipos de cobertura vegetal con menor confusión espectral y mayor precisión. La modificación no debe destruir cualquier información a cerca de la cobertura vegetal, solo debe corregir el efecto topográfico. Por tal motivo, cuando se realizan evaluaciones de cobertura vegetal mediante sensores remotos en zonas topográficamente accidentadas es importante realizar este tipo de procesos en el afán de mejorar la calidad del análisis y resultados, especialmente para manejo forestal.

A partir del modelo digital de elevación se generó un modelo de iluminación, con el objetivo de simular las condiciones de iluminación presentes en el área de estudio al momento de la adquisición de la escena Landsat ETM+ del 2000, definiendo las variables de posición solar mediante la definición de los ángulos de azimut y elevación sobre el horizonte.

Este valor consiste en el ángulo entre el vector de incidencia de luz solar y el vector normal a la superficie. Cuando este ángulo es pequeño o cercano al cero, el flujo de luz incidente será el máximo, dependiendo del incremento en el ángulo, el flujo de incidencia de luz disminuirá. La relación entre éste ángulo y

los valores de brillantez registrados en imágenes de satélite sugieren una correlación significativa que varía según la banda con la que se compare. Se calcula mediante el coseno del ángulo de incidencia de los rayos solares, y se apoya en la ley de coseno de geometría esférica (Sellers 1972, citado en Holben y Justice 1980), que se describe a continuación:

$$\gamma = \cos \theta_0 \cos \theta_n + \sin \theta_0 \sin \theta_n \cos (\phi_n - \phi_0)$$

Donde:

$\gamma$  = coseno del ángulo entre el ángulo de incidencia solar y la normal de la superficie local

$\theta_0$  = ángulo zenital solar

$\theta_n$  = ángulo zenital de la normal a la superficie

$\phi_0$  = ángulo de orientación topográfica (exposición del terreno).

$\phi_n$  = ángulo de pendiente topográfica

Para el presente trabajo se utilizó el algoritmo que ofrece IMAGINE ERDAS 8.5 (ERDAS, 1999) cuya ecuación para el cálculo del ángulo de incidencia es la siguiente:

$$\cos i = \cos (90 - q_s) \cos q_n + \sin (90 - q_s) \sin q_n \cos (f_s - f_n)$$

Donde:

$i$  = ángulo entre los rayos solares y la normal a la superficie

$q_s$  = ángulo de elevación del sol

$f_s$  = ángulo azimutal del sol

$q_n$  = ángulo de pendiente de cada elemento superficial (píxel)

$f_n$  = ángulo de exposición de cada elemento superficial (píxel)

Una vez que el ángulo de incidencia ha sido caracterizado para cada píxel en la escena o área de estudio, los valores de brillantez de cada píxel podrán ser modificados proporcionalmente.

Las ecuaciones hasta hoy desarrolladas, las cuales fueron evaluadas en el presente trabajo con el objetivo de determinar cual de ellas ofrece los mejores resultados en el área de estudio son:

- Modelo de Reflectancia de Lambert (LRM=Lambertian Reflectance Model).
- Modelo de Reflectancia No Lambert (NLRM = Non-Lambertian Reflectance Model).
- "backwards Minnaert correction" (BMC).
- modelo empirico desarrollado por Civco en 1989.



### **Modelo de Reflectancia de Lambert (LRM = Lambertian Reflectance Model)**

El primer modelo es el de Superficie de Lambert, el cual se asume que la luz del sol es reflejada igualmente en todas direcciones después de interactuar con la vegetación superficial. Si esta suposición es correcta, entonces la brillantez aparente de un píxel con tipo de vegetación uniforme diferirá de la brillantez actual en una forma similar al área aparente y actual.

El valor de brillantez actual de un píxel dado puede entonces ser determinado tomando la brillantez aparente representada en la imagen de satélite original y dividiéndola entre el coseno de  $i$  (ángulo de incidencia de luz solar).

área del píxel = área aparente /  $\cos i$

ó

valor de brillantez normalizado = valor de brillantez observado /  $\cos i$

### **Modelo de Reflectancia No Lambert (NLRM = Non-Lambertian Reflectance Model)**

Minnaert en 1961 propuso que la superficie observada no refleja la energía solar incidente uniformemente en todas direcciones. En cambio, formuló el modelo no lambert, el cual toma en cuenta variaciones en el terreno. Este modelo, aunque demanda más recursos de cómputo que el modelo de Lambert, puede presentar resultados más precisos. En el modelo de reflectancia No Lambert, la siguiente ecuación es utilizada para normalizar los valores de brillantes en la imagen (Colby, 1991; Smith *et al.*, 1980):

$$BV \text{ normal } \lambda = (BV \text{ observado } \lambda \cos e) / (\cos k i \cos k e)$$

Donde:

BV normal  $\lambda$  = valores de brillantez normalizados

BV observado  $\lambda$  = valores de brillantez observados

$\cos i$  = coseno del ángulo de incidencia

$\cos e$  = coseno del ángulo de exitancia, o ángulo de pendiente

$k$  = la constante de Minnaert empíricamente derivada

La constante  $k$  varía entre 0 y 1, donde el 1 representa un perfecto reflector de difusión, mientras que los valores menores representan la difusión anisotrópica específica de la escena. El valor de  $k$  para cada banda es determinado mediante una segunda ecuación, la cual calcula la regresión de un grupo de valores de brillantez observados en la imagen de satélite con valores conocidos de ángulo de inclinación de pendiente y ángulo de exposición, tomando en cuenta que todos los valores observados sean del mismo tipo de cobertura vegetal. El valor de  $k$  es la pendiente de la línea de regresión. (Hodgson y Seller, 1993):

$$\log (BV \text{ observed } \lambda \cos e) = \log BV \text{ normal } \lambda + k \log (\cos i \cos e)$$

Despejando:

$$k = \frac{\log (BV \text{ observed } \lambda \cos e) - \log BV \text{ normal } \lambda}{\log (\cos i \cos e)}$$

### Backwards Minnaert Correction (BMC)

El tercer método es citado por Smith, *et al.* (1980) y utiliza un principio desarrollado por Minnaert en 1941 usado para el análisis de la superficie lunar.

Este método permite a la superficie favorecer la dispersión de ciertas direcciones de reflejo sobre otras, a diferencia del perfecto reflector de difusión asumido por la corrección de Lambert. Su ecuación es:

$$L_A = L \cdot \cos^k(i) \cdot \cos^{k-1}(e)$$

Donde:

$L_A$  = Valores de brillantez corregidos

$L$  = Valores de brillantez NO corregidos

$i$  = ángulo de incidencia

$e$  = ángulo de exitancia (pendiente)

$k$  = constante de Minnaert (0 → 1)

La Constante de Minnaert ( $k$ ) puede ser calculada mediante la regresión de un grupo de valores de brillantez observados en la imagen Landsat con valores de exposición y pendiente conocidos. El valor de  $k$  es la pendiente de la línea de regresión. (Hodgson y Séller, 1993). La ecuación es la siguiente:

$$\log (BV_{\text{observado}} \wedge \cos e) = \log BV_{\text{normal}} \wedge + k \log (\cos i \cos e)$$

### Ecuación empírica de Civco

Otro de los modelos probados fue el desarrollado por Civco en 1989, el cual se basa en una ecuación empírica que busca remover la mayor cantidad del efecto topográfico en imágenes Landsat TM y al mismo tiempo conservar las características espectrales generales de la escena corregida. La ecuación utilizada fue:

$$\delta DN_{\lambda ij} = DN_{\lambda ij} + (DN_{\lambda ij} * ((\mu_k - X_{ij}) / \mu_k))$$

Donde:

$\delta DN_{\lambda ij}$  = Valores de radianza normalizada para el pixel<sub>ij</sub> en la banda  $\lambda$ .

$DN_{\lambda ij}$  = Valores de radianza originales para el pixel<sub>ij</sub> en la banda  $\lambda$ .

$\mu_k$  = Valor de la media del modelo de iluminación

$X_{ij}$  = Valor de iluminación para el pixel<sub>ij</sub>

En un esfuerzo por reducir el efecto topográfico, el autor deriva empíricamente un coeficiente de calibración, el cual fue determinado comparando respuestas espectrales de píxeles de bosque decíduo, en pendientes norte y sur. Para el cual elabora la siguiente ecuación:

$$C_{\lambda} = [(\mu_{\lambda} - N_{\lambda}) / ((\mu_{\lambda} - N_{\lambda}) - (\mu_{\lambda} - N'_{\lambda})) + ((\mu_{\lambda} - S_{\lambda}) / ((\mu_{\lambda} - S_{\lambda}) - (\mu_{\lambda} - S'_{\lambda})))] / 2$$

Donde:

$C_{\lambda}$  = coeficiente de corrección para la banda  $\lambda$

$\mu_{\lambda}$  = media global del bosque decíduo

$N_{\lambda}$  = media de valores no calibrados en pendientes al norte

$N'_\lambda$  = media de valores calibrados en la primer fase en pendientes al norte

$S_\lambda$  = media de valores no calibrados en pendientes al sur

$S'_\lambda$  = media de valores calibrados en la primer fase en pendientes al sur

Este coeficiente de corrección ( $C_\lambda$ ) se aplica en la ecuación de la siguiente forma:

$$\delta DN_{\lambda ij} = DN_{\lambda ij} + (DN_{\lambda ij} * (\mu_k - X_{ij}) / \mu_k) * C_\lambda$$

Como puede observarse, el coeficiente empírico de Civco es calculado sólo para el tipo de vegetación de bosque decíduo. Para el caso particular del Ejido Pueblo Nuevo y en general para muchas otras áreas forestales con gran variedad de comunidades vegetales mezcladas en una misma escena Landsat, esto implicaría la elaboración de coeficientes por tipo de vegetación, o coeficientes promedios de la imagen a analizar.

Por esta razón y en base a los trabajos anteriores, en especial el de Smith 1980, se retoma el cálculo de la constante de Minnaert, la cual es calculada entre los valores de brillantez de cada una de las cuatro bandas de la imagen Landsat MSS, contra los valores de brillantez del modelo de iluminación. Los valores de la pendiente de dichas regresiones se muestran a continuación:

Constante de Minnaert para cada banda ( $k_\lambda$ )

Banda1	0.57099
Banda2	0.57853
Banda3	0.69805
Banda4	0.69127

### Propuesta de modificación al modelo de Civco

Se propone la sustitución del coeficiente de corrección empírico del modelo de Civco ( $C_\lambda$ ), para ser reemplazado por los valores calculados del coeficiente de Minnaert ( $k_\lambda$ ) y ser aplicados a cada banda de la imagen. Resultando en la siguiente formula:

$$\delta DN_{\lambda ij} = DN_{\lambda ij} + (DN_{\lambda ij} * ((\mu_k - X_{ij}) / \mu_k) * k_{\lambda})$$

Donde:

$\delta DN_{\lambda ij}$  = Valores de radianza normalizada para el pixel<sub>ij</sub> en la banda  $\lambda$ .

$DN_{\lambda ij}$  = Valores de radianza originales para el pixel<sub>ij</sub> en la banda  $\lambda$ .

$\mu_k$  = Valor de la media del modelo de iluminación

$X_{ij}$  = Valor de iluminación para el pixel<sub>ij</sub>

$k_{\lambda}$  = constante de Minnaert modificada en la banda  $\lambda$  (0 → 1)

Con el objetivo de comparar el resultado final de la corrección del efecto topográfico en la clasificación de la imagen Landsat, se procesaron las imágenes original y normalizada mediante estadísticas supervisadas, definiendo un total de 9 tipos de uso de suelo y cobertura vegetal, estableciéndose polígonos de entrenamiento y de validación, los cuales fueron aplicados a las dos imágenes. Mediante el algoritmo de máxima verosimilitud. La evaluación de los resultados obtenidos se hizo mediante una matriz de confusión para determinar la precisión de clasificación de ambas imágenes.

**Resultados de los modelos de normalización topográfica evaluados:**

El modelo de reflectancia de Lambert, muestra (figura 95) una excesiva tendencia a sobre corregir los valores de exposiciones NW, siendo no satisfactoria. Además, los valores calculados son muy elevados y distorsionan severamente la integridad de la imagen (tablas 47 y 48), en las que se compara los valores de la imagen original y el resultado de este modelo.

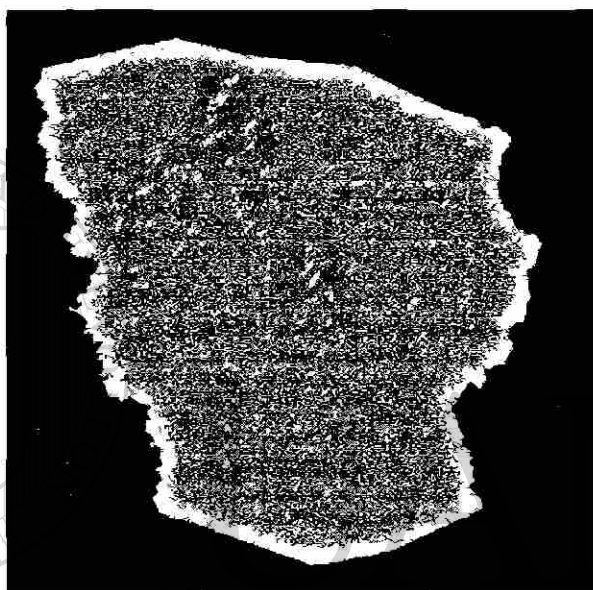


Figura 95. Resultado del Modelo de Lambert

Original	Banda1	Banda2	Banda3	Banda4
Media	20	15	28	32
Máxima	79	70	69	71
Desv.Std	3.986	5.297	8.3	10.15

Tabla 32. Valores de imagen original

LRM	Banda1	Banda2	Banda3	Banda4
Media	344	265	338	416
Máxima	601,743	56,673	41,851	52,516
Desv.Std	2,405.46	1,995.33	1,473.79	1,958.85

Tabla 33. Valores del modelo Lambertian

El principio de este modelo, "la luz solar es reflejada igualmente en todas direcciones", no resultó del todo aplicable para las condiciones de esta área.

La aplicación del método de **No Lambert** (NLM) (figura 96), visualmente presenta una mejor apariencia que el modelo de Lambert, pero continúa de forma muy marcada la sobrecorrección de las pendientes con orientación NW, además de que los valores de brillantes continúan muy altos (mayores de 255), y una desviación estándar muy elevada (tabla 49).

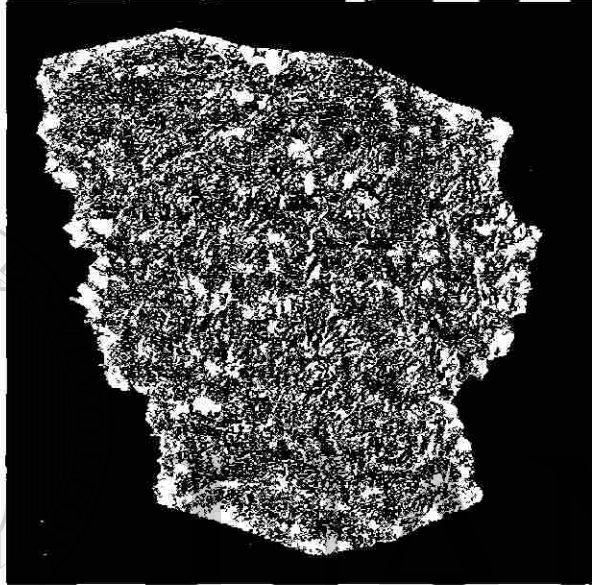


Figura 96. Resultado del Modelo No Lambert

NLRM	Banda1	Banda2	Banda3	Banda4
Media	27	19	39	44
Máxima	727	733	1,959	2,155
Desv.Std	16.983	10.212	30.42	31.38

Tabla 34. Valores del modelo No Lambert

El método de **backwards Minnaert correction** (Smith *et al*, 1980) muestra valores estadísticos aceptables (tabla 50), visualmente resulta en una muy ligera o carente corrección. La imagen es muy semejante a la original, sin embargo, se aprecia distorsión de los valores espectrales (figura 97).



Figura 97. Resultado del Modelo de Smith

BMC	Banda1	Banda2	Banda3	Banda4
Media	17	13	22	25
Máxima	59	65	63	74
Desv.Std	5.625	5.872	9.973	11.769

Tabla 35. Valores del modelo de Smith

En el modelo empírico de Civco, la información resultante muestra una notable normalización de la imagen y sus valores estadísticos (figura 98). Sin embargo, todavía persiste aunque de forma muy ligera la sobrecorrección de valores en zonas NW, y la subvaluación espectral en exposiciones SE.

Sus valores estadísticos son muy aceptables ya que se reduce significativamente la desviación estándar comparado con modelos anteriores (tabla 51).

### Propuesta de modificación al modelo de Civco

Por último, se propone una modificación al modelo de Civco, sustituyendo el coeficiente de corrección por la constante de Minnaert. Dicha modificación muestra como resultado final una imagen de apariencia carente de relieve, aunque no se ha removido la totalidad de las sombras dadas las condiciones de pendiente tan pronunciadas en el área de estudio (figura 99).



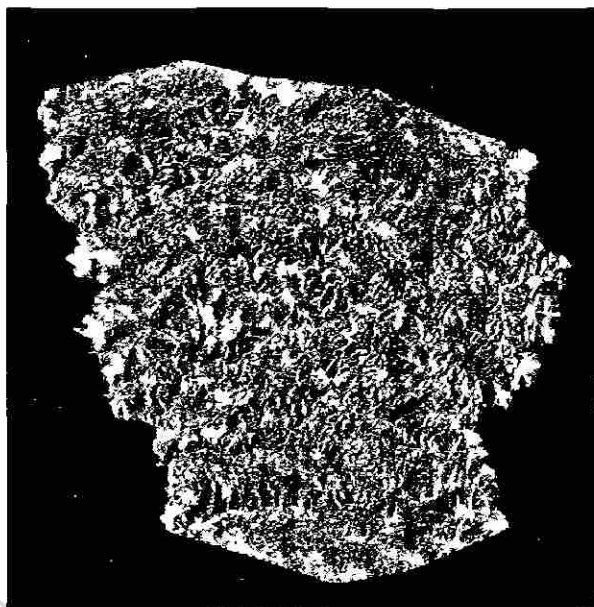


Figura 98. Resultado del Modelo de Civco

EDCA1	Banda1	Banda2	Banda3	Banda4
Media	12	14	26	30
Máxima	85	63	84	96
Desv.Std	3.485	4.448	7.039	8.611

Tabla 36. Valores del modelo de Civco

Sin embargo, sus valores estadísticos (tabla 52) muestran la más baja variación dentro de la imagen por efecto topográfico (figura 100), la cual compara la variabilidad de los datos por banda y por método de normalización topográfica.

## DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

En la clasificación de la imagen original (figura 101) es notable el problema de diferenciación entre las selvas bajas caducifolias y comunidades de pino y pino-encino. El efecto topográfico está presente incluso en la clasificación, pues puede observarse la rugosidad del terreno. La validación de la clasificación sólo alcanza un 79.69% de confiabilidad y contiene un 2.52% de sombras (tabla 53).

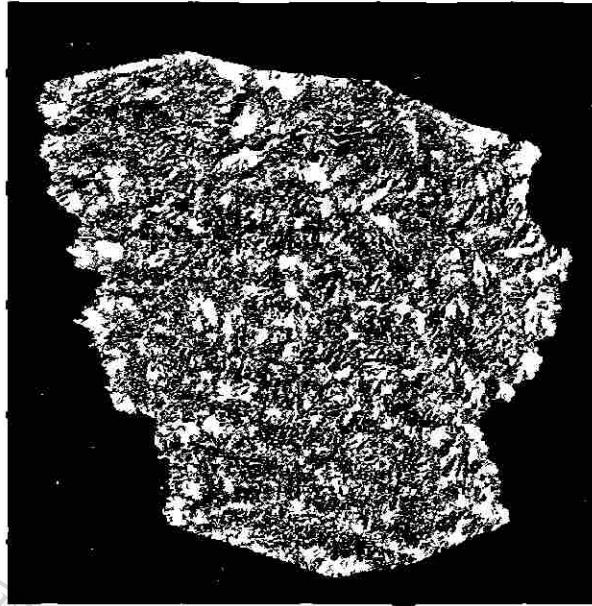


Figura 99. Resultado del modelo modificado de Civco.

EDCA2	Banda1	Banda2	Banda3	Banda4
Media	12	15	27	31
Máxima	79	62	71	82
Desv.Std	3.215	4.278	6.358	7.963

Tabla 37. Valores del modelo modificado de Civco

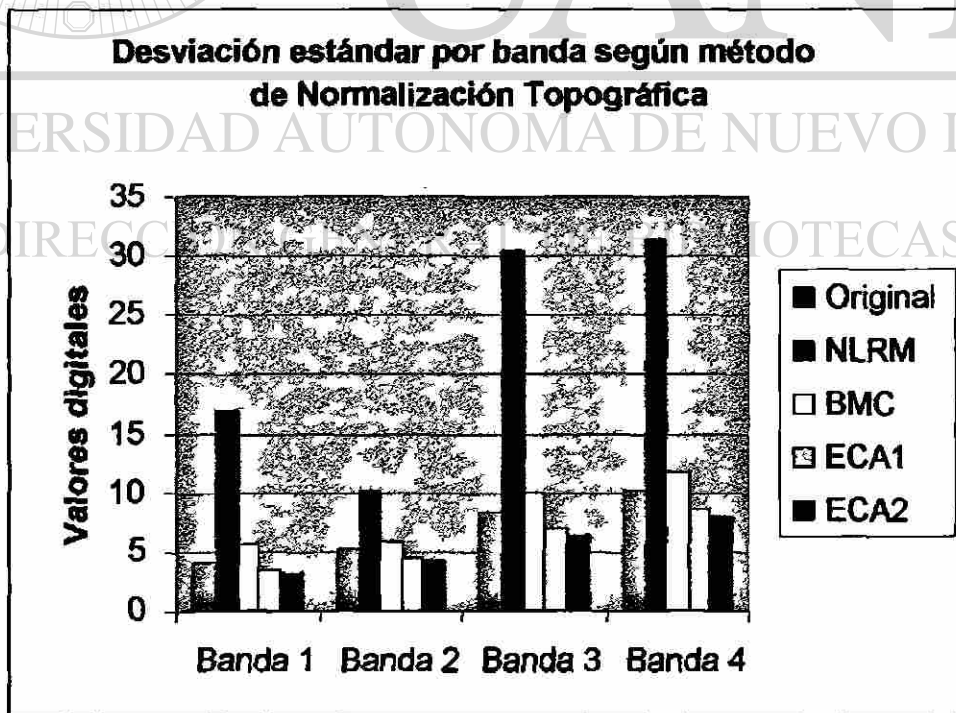
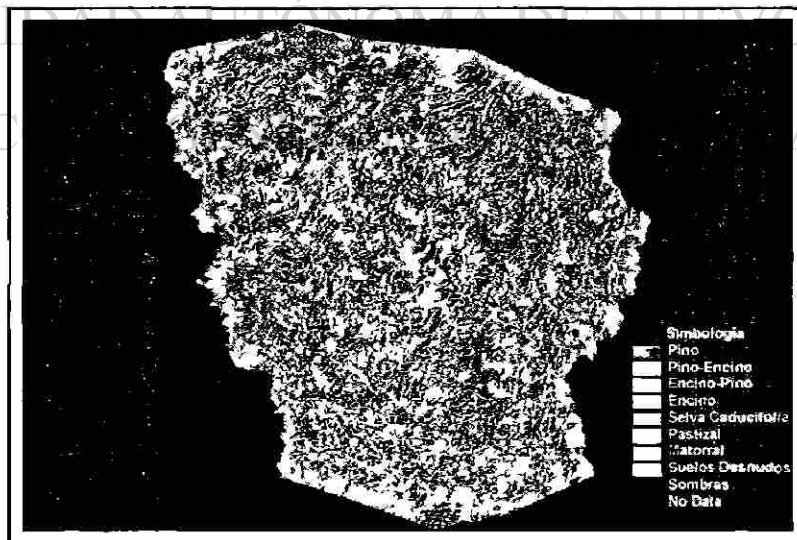
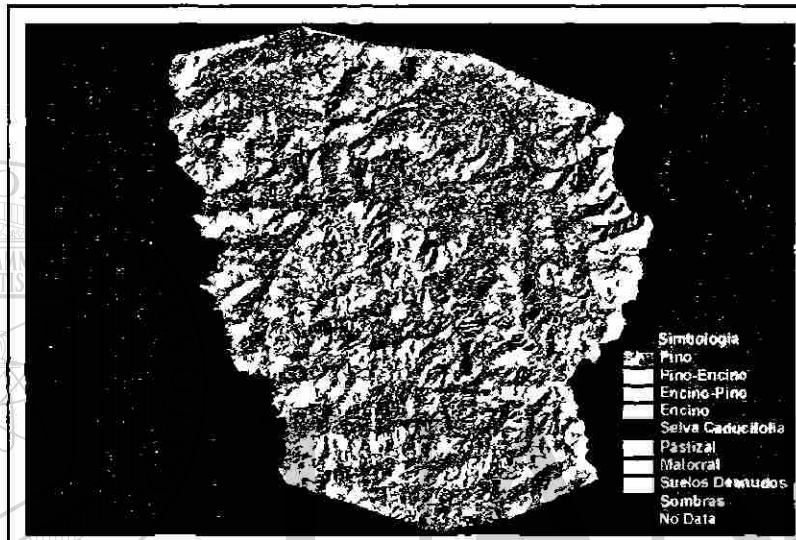


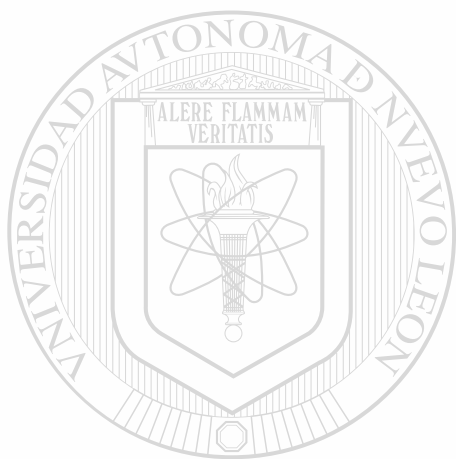
Figura 100. Comparación de Desviaciones Estándar de modelos aplicados

La clasificación de la imagen normalizada (figura 102) presenta una mejor discriminación entre clases y queda demostrado en el porcentaje de confiabilidad del 96.58%. Sin embargo, aún quedan zonas sombreadas debido a lo accidentado del terreno, donde la incidencia luminica solo se presenta por luz difusa en la atmósfera o de pendientes vecinas, intensidades demasiado débiles para ser captados por los sensores remotos.



Tipo de Vegetación y Uso de Suelo	Imagen Normalizada		Imagen Original	
	Has.	%	Has.	%
Pino	95,680	40	92,379	38
Pino-Encino	30,550	13	22,336	9
Encino-Pino	13,345	6	12,834	5
Encino-Pino	55,789	23	48,321	20
Selva Baja Caduc.	8,678	4	7,852	3
Pastizal	17,246	7	23,273	10
Matorral	12,862	5	19,262	8
Suelos Desnudos	1,732	1	8,339	3
Sombras	4,771	2	6,056	3
Superf. Total	240,651		240,651	
% de Confiabilidad	96.58		79.69	

Tabla 38. Valores comparativos entre clasificaciones



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## **ANEXO II**

### **Integración de Información Dasocrática**



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

®

Con el objetivo de determinar qué tipo de vegetación y usos de suelo están presentes en el área de estudio (clases informacionales), se integró la información dasocrática y de manejo generada por los prestadores de servicios técnicos forestales del ejido Pueblo Nuevo.

Para la integración de esta última información, se digitalizaron treinta y un cartas dasocráticas existentes, las cuales fueron rasterizadas en un escáner de rodillos de 36 pulgadas de ancho, generando archivos en blanco y negro, en formato PCX. Posteriormente fueron vectorizados, convirtiéndolos a formato DXF de Auto-CAD®. Finalmente, cada uno de ellos fue importado a formato vector de Arc\_Info 7.2.1, para luego ser georreferenciados y proyectados de acuerdo a los parámetros preestablecidos, e integrados a un mosaico de toda el área de estudio.

La información fue revisada y corregidos los errores de cierre de polígonos encontrados a lo largo de las líneas de unión entre cartas. A continuación se archivaron los cambios y se construyó la topología de la cobertura dasocrática, para luego etiquetar cada uno de los polígonos, con su número de "rodal" y "subrodal" anterior, concatenando estos campos para generar un tercero denominado "código", consistente en tres dígitos para rodal y tres para subrodal.

Debido a algunas inconsistencias y errores encontrados en dicha información, éstas fueron documentadas y reportadas a los prestadores de servicios técnicos forestales, los cuales llegaron a la decisión de hacer modificaciones en algunos trazos, subdivisión de algunos polígonos y una nueva re- numeración de los subrodales. Para lo cual se agregaron tres nuevos campos a la base de datos, para los nuevos números de "rodal", "subrodal", y número integrado o "código". Como resultado final, se generaron un total de 14,092 polígonos de subrodales, agrupados en 1,405 rodales, de los cuales sólo 4,580 son subrodales de producción.

La información de manejo generada a partir del análisis de información de campo, registrada en la elaboración del inventario forestal ejidal de 1996, se encontraba en formato SPF, el cual es una aplicación diseñada para su captura y análisis, cuyos resultados fueron reportados en un total de nueve documentos

diferentes, de entre los cuales se seleccionaron solo seis para evitar repetición de variables (tabla 54).

Reporte No.	Descripción
3	Número de sitios, intensidad y error del muestreo del inventario de manejo.
5	Características ecológicas.
6	Característica silvícolas – dasométricas por piso y grupo de especies.
8	Determinación del método de tratamiento.
9	Cálculos de incrementos.
10A	Cálculo de posibilidad de pino y encino por subrodal, serie y área de corta.

Tabla 39. Reportes seleccionados para su integración al SIG Forestal.

La integración de información seleccionada generó una base de datos con la siguiente estructura: (tablas 55 a 67).

No.	Nombre	Unidades	Tipo	Decimales	Descripción
1	A_CORTA	Año	Númérico	0	AREA DE CORTA
2	RODAL	No.	Texto		RODAL
3	SBR_ACT	No.	Texto		SUBRODAL ACTUAL
4	SBR_ANT	No.	Texto		SUBRODAL ANTERIOIR
5	SUPERFICIE	M2	Númérico	2	SUPERFICIE
6	SUP_CALC	M2	Númérico	2	SUPERFICIE CALCULADA
7	HAS_CALC	Hectáreas	Númérico	4	HECTAREAS CALCULADAS

Tabla 40. Topología de subrodales.

No.	Nombre	Unidades	Tipo	Decimales	Descripción
8	U_HIDRO	Clave	Texto		UNIDAD HIDROLOGICA
9	CUENCA	Clave	Texto		CUENCA
10	SUBCUEN	Clave	Texto		SUBCUENCA
11	MICROCUEN	Clave	Texto		MICROCUENCA
12	SUBMICRO	Clave	Texto		SUBMICROCUENCA
13	CLAVE_HIDRO	Clave	Texto		CLAVE HIDROLOGICA

Tabla 41. Información hidrológica.

No.	Nombre	Unidades	Tipo	Decimales	Descripción
14	LONG_CAM	Metros	Númérico	2	LONGITUD DE CAMINOS
15	DENS_CAM	M/Ha.	Númérico	2	DENSIDAD DE CAMINOS
16	LONG_CAU	Metros	Númérico	2	LONGITUD DE CAUCES
17	DENS_CAU	M/Ha.	Númérico	2	DENSIDAD DE CAUCES

Tabla 42. Información para segregaciones.

No.	Nombre	Unidades	Tipo	Decimales	Descripción
18	VEGETACION	Tipo	Texto		TIPO DE VEGETACION
19	CONDICION	Tipo	Texto		CONDICION
20	No_SITIOS	No.	Númérico	0	NUMERO DE SITIOS
21	SUP_MUE	Hectáreas	Númérico	2	SUPERFICIE MUESTRADA
22	INT_MUE	%	Númérico	2	INTENSIDAD DE LA MUESTRA
23	ERROR	%	Númérico	2	ERROR

Tabla 43. Parámetros del inventario.

No.	Nombre	Unidades	Tipo	Decimales	Descripción
24	ASNМ	Metros	Númérico	0	ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR
25	ASNМ_CAL	Metros	Númérico	0	ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR CALCULADA
26	PEND	%	Númérico	2	PENDIENTE
27	PEND_CAL	%	Númérico	2	PENDIENTE CALCULADA
28	EXPO	No.	Númérico	0	EXPOSICION
29	EXPO_CAL	Orientación	Texto		EXPOSICION CALCULADA

Tabla 44. Información Topográfica.

No.	Nombre	Unidades	Tipo	Decimales	Descripción
30	COMPACT	Índice	Númérico	0	COMPACTACION DEL SUELO
31	TEXTURA	Índice	Númérico	0	TEXTURA DEL SUELO
32	MAT_PRED	Índice	Númérico	0	MATERIAL PREDOMINANTE DEL SUELO
33	MO	Índice	Númérico	0	CAPA DE MATERIA ORGANICA
34	OCO	Índice	Númérico	0	CAPA DE OCOCHAL O BARBASCA
35	U_ACT_S	Índice	Númérico	0	USO ACTUAL DE SUELO
36	U_AGR0	Índice	Númérico	0	USO AGRICOLA
37	U_PEC	Índice	Númérico	0	USO PECUARIO
38	ERO_LAM	Índice	Númérico	0	EROSION LAMINAR
39	ERO_CANA	Índice	Númérico	0	EROSION EN CANALILLOS
40	ERO_CARCA	Índice	Númérico	0	EROSION EN CARCAVAS
41	ERO_ANTRO	Índice	Númérico	0	EROSION ANTROPOGENICA
42	D_INFRA	Índice	Númérico	0	DAÑOS A LA INFRAESTRUCTURA
43	FISIO	Índice	Númérico	0	FISIOGRAFIA DEL SITIO
44	CL_PEND	Índice	Númérico	0	CLASIFICACION DE PENDIENTE
45	CL_ERODA	Índice	Númérico	0	CLASIFICACION DE ERODABILIDAD
46	CL_ER0_C	Índice	Númérico	0	CLASIFICACION DE EROSION CRITICA
47	CL_ER0_LAM	Índice	Númérico	0	CLASIFICACION DE EROSION LAMINAR
48	CL_ER0_ANTRO	Índice	Númérico	0	CLASIFICACION DE EROSION ANTROPOGENICA
49	CL_AGR0_PEC	Índice	Númérico	0	CLASIFICACION DE USO AGRICOLA + PECUARIO
50	CL_SED	Índice	Númérico	0	CLASIFICACION DE SEDIMENTACION
51	CL_D_INFRA	Índice	Númérico	0	CLASIFICACION DE DAÑOS A LA INFRAESTRUCTURA
52	IND_DET	Índice	Númérico	0	INDICE DE DETERIORO

Tabla 45. Información edafológica.



No.	Nombre	Unidades	Tipo	Decimales	Descripción
53	IND_SITIO	Índice	N Numérico	2	INDICE DE SITIO
54	COB_COPA	%	N Numérico	2	COBERTURA DE COPAS
55	PISO		T Texto		PISO
56	COMP_P	%	N Numérico	0	COMPOSICION DE PINO
57	COMP_E	%	N Numérico	0	COMPOSICION DE ENCINO
58	COMP_OC	%	N Numérico	0	COMPOSICION DE OTRAS CONIFERAS
59	COMP_HO	%	N Numérico	0	COMPOSICION DE HOJOSAS
60	SPP_DOM	Especie	T Texto		ESPECIE DOMINANTE
61	EDAD	Años	N Numérico	0	EDAD
62	ALT_DOM	Metros	N Numérico	2	ALTURA DOMINANTE
63	FACT_COMP	%	N Numérico	2	FACTOR DE COMPETENCIA DE COPAS
64	NIV_PROD	Categoría	T Texto		NIVEL DE PRODUCTIVIDAD

Tabla 46. Tipificación dasocrática del subrodal.

No.	Nombre	Unidades	Tipo	Decimales	Descripción
65	DQ_P	Centímetros	N Numérico	2	DIAMETRO CUADRATICO DE PINO
66	ALT_M_P	Metros	N Numérico	2	ALTURA MEDIA DE PINO
67	NUM_P	Arbol/Ha.	N Numérico	0	NUMERO DE PINOS POR HECTAREA
68	AB_P	M2/Ha.	N Numérico	2	AREA BASAL POR HECTAREA DE PINO
69	VOL_P	M3/Ha.	N Numérico	2	VOLUMEN DE PINO
70	VOL_SANO	%	N Numérico	2	VOLUMEN DE PINO SANO
71	ERT_P	M3/Ha.	N Numérico	2	EXISTENCIAS REALES TOTALES DE PINO
72	VMM_P	M3	N Numérico	2	VOLUMEN DE MADERAS MUERTAS DE PINO
73	INT_COR_P	%	N Numérico	2	INTENSIDAD DE CORTA DE PINO
74	REM_P	M3/Ha.	N Numérico	2	VOLUMEN DE REMOCION DE PINO
75	POSIB_P	M3	N Numérico	2	POSIBILIDAD DE PINO
76	RESL_P	M3/Ha.	N Numérico	2	VOLUMEN RESIDUAL DE PINO
77	VOL_TOC	M3/Ha.	N Numérico	2	VOLUMEN DE TOCONES
78	ER_ANT	M3/Ha.	N Numérico	2	EXISTENCIAS REALES ANTERIORES DE PINO
79	ER_PROY	M3/Ha.	N Numérico	2	EXISTENCIAS REALES PROYECTADAS DE PINO
80	RECUPERA	%	N Numérico	2	PORCENTAJE DE RECUPERACION

Tabla 47. Características dasocráticas de Pino.

No.	Nombre	Unidades	Tipo	Decimales	Descripción
81	DQ_Q	Centímetros	N Numérico	2	DIAMETRO CUADRATICO DE ENCINO
82	ALT_M_Q	Metros	N Numérico	2	ALTURA MEDIA DE ENCINO
83	NUM_Q	Arbol/Ha.	N Numérico	0	NUMERO DE ENCINOS POR HECTAREA
84	AB_Q	M2/Ha.	N Numérico	2	AREA BASAL POR HECTAREA DE ENCINO
85	VOL_Q	M3/Ha.	N Numérico	2	VOLUMEN DE ENCINO
86	ERT_Q	M3/Ha.	N Numérico	2	EXISTENCIAS REALES TOTALES DE ENCINO
87	VMM_Q	M3	N Numérico	2	VOLUMEN DE MADERAS MUERTAS DE ENCINO
88	INT_COR_Q	%	N Numérico	2	INTENSIDAD DE CORTA DE ENCINO
89	REM_Q	M3/Ha.	N Numérico	2	VOLUMEN DE REMOCION DE ENCINO
90	POSIB_Q	M3	N Numérico	2	POSIBILIDAD DE ENCINO
91	RESI_Q	M3/Ha.	N Numérico	2	VOLUMEN RESIDUAL DE ENCINO

Tabla 48. Características dasocráticas de Encino.

No.	Nombre	Unidades	Tipo	Decimales	Descripción
92	DQ_OC	Centímetros	Númérico	2	DIAMETRO CUADRATICO DE OTRAS CONIFERAS
93	ALT_M_OC	Metros	Númérico	2	ALTURA MEDIA DE OTRAS CONIFERAS
94	NUM_OC	Arbol/Ha.	Númérico	0	NUMERO DE OTRAS CONIFERAS POR HECTAREA AREA BASAL POR HECTAREA DE OTRAS CONIFERAS
95	AB_OC	M2/Ha.	Númérico	2	VOLUMEN DE OTRAS CONIFERAS EXISTENCIAS REALES TOTALES DE OTRAS CONIFERAS
96	VOL_OC	M3/Ha.	Númérico	2	VOLUMEN DE MADERAS MUERTAS DE OTRAS CONIFERAS
97	ERT_OC	M3/Ha.	Númérico	2	INTENSIDAD DE CORTA DE OTRAS CONIFERAS
98	VMM_OC	M3	Númérico	2	VOLUMEN DE REMOCION DE OTRAS CONIFERAS
99	INT_COR_OC	%	Númérico	2	POSIBILIDAD DE OTRAS CONIFERAS
100	REM_OC	M3/Ha.	Númérico	2	VOLUMEN RESIDUAL DE OTRAS CONIFERAS
101	POSIB_OC	M3	Númérico	2	
102	RESI_OC	M3/Ha	Númérico	2	

Tabla 49. Características dasocráticas de Otras Coníferas.

No.	Nombre	Unidades	Tipo	Decimales	Descripción
103	DQ_OH	Centímetros	Númérico	2	DIAMETRO CUADRATICO DE OTRAS HOJOSAS
104	ALT_M_OH	Metros	Númérico	2	ALTURA MEDIA DE OTRAS HOJOSAS
105	NUM_OH	Arbol/Ha.	Númérico	0	NUMERO DE OTRAS HOJOSAS POR HECTAREA AREA BASAL POR HECTAREA DE OTRAS HOJOSAS
106	AB_OH	M2/Ha.	Númérico	2	VOLUMEN DE OTRAS HOJOSAS EXISTENCIAS REALES TOTALES DE OTRAS HOJOSAS
107	VOL_OH	M3/Ha.	Númérico	2	VOLUMEN DE MADERAS MUERTAS DE OTRAS HOJOSAS
108	ERT_OH	M3/Ha.	Númérico	2	INTENSIDAD DE CORTA DE OTRAS HOJOSAS
109	VMM_OH	M3	Númérico	2	VOLUMEN DE REMOCION DE OTRAS HOJOSAS
110	INT_COR_OH	%	Númérico	2	POSIBILIDAD DE OTRAS HOJOSAS
111	REM_OH	M3/Ha.	Númérico	2	VOLUMEN RESIDUAL DE OTRAS HOJOSAS
112	POSIB_OH	M3	Númérico	2	
113	RESI_OH	M3/Ha.	Númérico	2	

Tabla 50. Características dasocráticas de Otras Hojas.

No.	Nombre	Unidades	Tipo	Decimales	Descripción
114	ER_HA_PM	M3/Ha.	Númérico	2	EXISTENCIAS POR HECTAREA DE PINO MUERTO
115	ER_TOT_PM	M3	Númérico	2	EXISTENCIAS TOTALES DE PINO MUERTO
116	INT_COR_PM	%	Númérico	2	INTENSIDAD DE CORTA DE PINO MUERTO
117	REM_PM	M3/Ha.	Númérico	2	VOLUMEN DE REMOCION DE PINO MUERTO
118	POSIB_PM	M3	Númérico	2	POSIBILIDAD DE PINO MUERTO
119	RESI_PM	M3/Ha	Númérico	2	VOLUMEN RESIDUAL DE PINO MUERTO

Tabla 51. Características dasocráticas de Pino Muerto.

No.	Nombre	Unidades	Tipo	Decimales	Descripción
120	IMA	M3/Ha./Año	Númérico	2	INCREMENTO MEDIO ANUAL
121	IMA_TOTAL	M3/Año	Númérico	2	INCREMENTO MEDIO ANUAL TOTAL
122	ICA	M3/Ha./Año	Númérico	2	INCREMENTO CORRIENTE ANUAL
123	ICA_TOTAL	M3/Año	Númérico	2	INCREMENTO CORRIENTE ANUAL TOTAL
124	IND_DENSI	%	Númérico	0	INDICE DE DENSIDAD DE REINEKE
125	MT		Texto		TRATAMIENTO
126	TRAT		Texto		TRATAMIENTO SILVICOLA

Tabla 52. Incrementos, Densidades y Tratamientos.

## **ANEXO III**

### **Métodos alternos para evaluación de Cobertura Vegetal**



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



Algunos investigadores han desarrollado métodos para determinar la cantidad de vegetación presente por píxel minimizando el efecto topográfico. Entre los métodos más comunes está el desarrollo de índices, tales como:

- Índices de vegetación
- Análisis de Componentes Principales
- Tasseled Cap

Durante la fotosíntesis, las plantas convierten la luz de sol, agua y dióxido de carbono en nuevos materiales para la planta y oxígeno. Debido a que la luz es un componente clave en el proceso fotosintético, mediante percepción remota es posible evaluar su estatus.

Las longitudes de onda de espectro visible son preferentemente absorbidas por las plantas, siendo la luz azul y roja de mayor impacto en la fotosíntesis y vigor de la misma, la luz verde también es absorbida pero en menor cantidad.

Materiales estructurales no fotosintéticos dentro de la planta, reflejan un porcentaje significativo del infrarrojo de la energía incidente. De tal forma que, los datos más interesantes pueden ser encontrados en las regiones espectrales del visible, infrarrojo cercano e infrarrojo medio (figura 103).

El espectro de la luz reflejada por la vegetación se presenta en dos formas: vegetación verde y húmeda (fotosintética) o vegetación seca (no fotosintética), pero entre estos dos puntos existe un amplio y continuo rango de gradación. Debido a que las plantas están hechas de los mismos componentes básicos, su espectro aparece generalmente similar.

Así, la relación o diferencia entre dos bandas espectrales a ambos lados de los 750 nm resultará en una medida de la cantidad de follaje presente. Las bandas usualmente seleccionadas se centran en la sección roja del espectro a 600nm y en la del infrarrojo cercano a 870nm. Los índices de vegetación involucran éstas dos bandas.

Lyon (1998) comparó siete índices de vegetación para detectar cambios de cobertura vegetal en Chiapas, México. Reportando que los valores de Índice

de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI) fueron muy poco afectados por los factores topográficos y fue el único índice que mostró distribución normal en sus histogramas.

Cambios en la cobertura vegetal o biomasa pueden ser detectados mediante el análisis de los valores de NDVI de fechas diferentes (NDVI diferencial) (Hayes y Sader, 2001). A mayor valor de NDVI, mayor densidad, biomasa o cobertura vegetal.

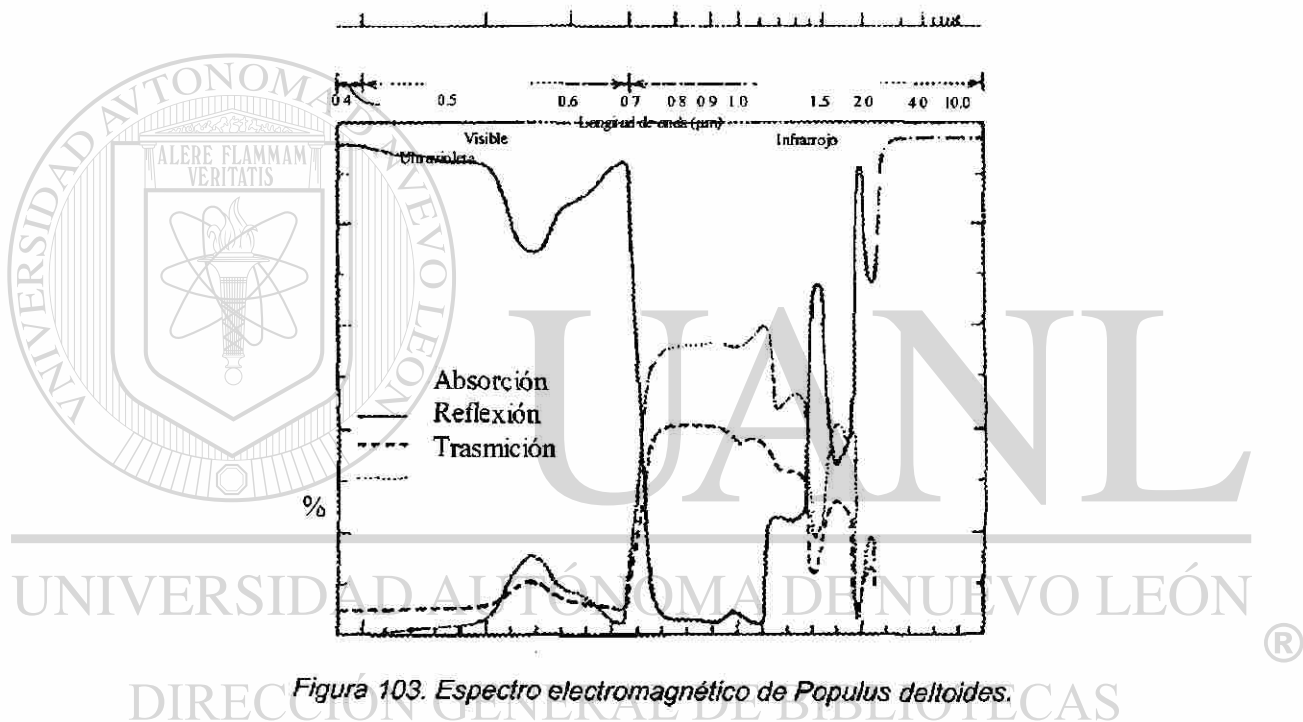


Figura 103. Espectro electromagnético de *Populus deltoides*.

## **Índices de vegetación:**

Un índice de vegetación es un número que es generado por la combinación de algunas bandas de sensores remotos y presente relaciones con la cantidad de vegetación en un píxel dado de la imagen.

Los índices que se han desarrollado son:

**RVI = Ratio vegetation index**

Descrito por Jordan (1969). Este es el índice mas ampliamente calculado, aunque muy raramente se le ha escuchado como un índice de vegetación. Una practica común en percepción remota es el uso de relaciones de bandas para eliminar varios efectos de albedo. Mucha gente usa la relación de infrarrojo cercano (NIR) y rojo como el componente de vegetación de la escena, y este es de hecho el RVI

Ecuación:  $RVI = NIR / rojo$

**NDVI = Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación**

Este índice se atribuye a Rouse (1973), pero el concepto de índice de diferencia normalizada fue primero presentada por Kriegler (1969). Cuando la gente dice índice de vegetación, este es al que típicamente se refiere.

Este índice tiene la ventaja de variar en un rango de -1 a 1, mientras que el rango de RVI varia de 0 a infinito. RVI y NDVI son funcionalmente equivalentes y se relacionan uno con otro mediante la siguiente ecuación:

Ecuación:  $NDVI = (RVI - 1) / (RVI + 1)$  o  $NDVI = (NIR - rojo) / (NIR + rojo)$

**IPVI = Índice de Vegetación de porcentaje de Infrarrojo**

Fue primero descrito por Crippen (1990). Este encontró que la resta del rojo en el numerador fue irrelevante, y propuso este índice como una forma de mejorar la velocidad de cálculo. Este esta restringido a valores entre 0 y 1, el

cual elimina la necesidad de establecer una firma para los valores de índice de vegetación. IPVI y NDVI son funcionalmente equivalentes y se relacionan uno con otro mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuación: IPVI} = (\text{NDVI} + 1) / 2 = \text{NIR} / (\text{NIR} + \text{rojo})$$

**DVI** = Índice de diferencia de vegetación

Es atribuido en algunos artículos recientes a Richardson and Everitt (1992), pero aparece como VI (índice de vegetación) en Lillesand y Kiefer (1987).

$$\text{Ecuación: DVI} = \text{NIR} - \text{rojo}$$

**PVI** = Índice de vegetación perpendicular

Los primero que lo describieron fueron Richardson y Wiegand (1977). Puede ser considerado como una generalización del DVI para líneas de suelo de diferentes pendientes. PVI es sensitivo a variaciones atmosféricas (Qi, 1994), de esta forma, el comparar valores de PVI de diferentes fechas es riesgoso a menos que se realicen correcciones atmosféricas previamente.

$$\text{Ecuación: PVI} = \sin(a) * \text{NIR} - \cos(a) * \text{rojo}$$

donde: a es el ángulo entre la línea de suelo y el eje de infrarrojo cercano.

**WDVI** = Índice de Diferencia Ponderada de Vegetación

La cual fue introducida por Clevers (1988). Este tiene una relación a PVI similar a la relación entre IPVI y NDVI. WDVI es una versión matemáticamente mas simple de PVI, pero tiene un rango sin restricción. Así como PVI, WDVI es muy sensitiva a variaciones atmosféricas (Qi, 1994).

$$\text{Ecuación: WDVI} = \text{NIR} - g * \text{rojo}$$

donde: g es la pendiente de la línea de suelo.

### **Índices para minimizar la distorsión por suelo.**

Diferentes tipos de suelos tienen diferentes tipos de reflectancia. Como se discutió anteriormente, todos los índices de vegetación suponen que existe una línea de suelo, donde hay una sola pendiente en el espacio rojo-Infrarrojo cercano. Sin embargo, existen casos en los que hay suelos con diferentes pendientes en la misma imagen. Además, si el supuesto a cerca de líneas de igual vegetación (paralelas o intersectando el origen) no es exactamente correcta, cambios en la humedad del suelo resultan en respuestas incorrectas para el índice de vegetación. El problema de distorsión por suelo es más acentuado cuando la cobertura vegetal es baja. El siguiente grupo de índices intentan reducir la distorsión por suelo mediante la alteración del comportamiento de las líneas de igual vegetación.

Estos índices reducen la distorsión por suelo al costo de la reducción del rango dinámico del índice. Estos índices son ligeramente menos sensibles a los cambios en cobertura vegetal que NDVI (pero más sensibles que PVI) especialmente a niveles bajos. Estos índices son también más sensibles a variaciones atmosféricas que NDVI (pero menos que PVI), Qi (1994).

---

### **SAVI = Índice de Vegetación Ajustado por Suelo**

Fue introducida por Huete (1988). El desarrollo inicial de este índice se basó en lecturas de hojas de cultivos de algodón y pastos con suelos claros y oscuros de fondo, y el factor de ajuste "L" fue encontrado mediante prueba y error hasta dar un índice igual de vegetación para ambos suelos. El resultado es un índice base-relación donde el punto de convergencia final no es el origen sino en el cuadrante negativo entre infrarrojo cercano y rojo, el cual causa que las isolíneas de vegetación sean más paralelas en el cuadrante positivo del infrarrojo cercano y rojo.

Huete (1988) presentó una base teórica para este índice basado en transferencia radiante simple, de esta forma SAVI probablemente tiene una de las mejores referencias teóricas de índices de vegetación. Sin embargo, el desarrollo teórico dio un factor de corrección significativamente diferente para



índices de área foliar de 1 (0.5) que resultó del desarrollo empírico para el mismo índice de área foliar (0.75). Se encontró que el factor de corrección varía entre 0 para densidades muy altas a 1 para densidades muy bajas. El valor estándar típicamente usado en la mayoría de aplicaciones es 0.5 el cual es para densidades de vegetación intermedias.

$$\text{SAVI} = [ (\text{NIR} - \text{rojo}) / (\text{NIR} + \text{rojo} + L) ] * (1 + L)$$

donde: L es un factor de corrección el cual varía de 0 para coberturas de vegetación altas a 1 para coberturas de vegetación muy bajas. El valor comúnmente utilizado es 0.5 la cual es una cobertura de vegetación intermedia.

**TSAVI = Índice de Vegetación Transformado Ajustado por Suelo**

Fue desarrollado por Baret (1989), Baret y Guyot (1991). Supone que la línea de suelo tiene una pendiente e intersección arbitraria, y hace uso de estos valores para ajustar el índice de vegetación.

$$\text{TSAVI} = s * (\text{NIR} - s * \text{rojo} - a) / (a * \text{NIR} + \text{rojo} - a * s + X * (1 + s * s))$$

donde: a es la intersección de la línea de suelo, s es la pendiente de la línea de suelo, y X es un factor de ajuste para minimizar la distorsión por suelo (0.08 en la publicación original).

**MSAVI = Índice de Vegetación Modificado Ajustado por Suelo**

Desarrollado por Qi (1994). El factor de corrección utilizado esta basado en resultados de NDVI y WdVI. Esto significa que las líneas de igual vegetación no convergen en un solo punto.

$$\text{MSAVI} = [ (\text{NIR} - \text{rojo}) / (\text{NIR} + \text{rojo} + L) ] * (1 + L)$$

donde:  $L = 1 - 2 * s * \text{NDVI} * \text{WdVI}$  y s es la pendiente de la línea de suelo.

**MSAVI2** = es la segunda versión de MSAVI.

En esta segunda versión Qi (1994), elimino la necesidad de precalcular WDI y NDVI, así como la búsqueda de la línea de suelo.

$$\text{MSAVI2} = (1/2) * (2*(\text{NIR} + 1) - \text{sqrt}((2*\text{NIR} + 1)^2 - 8 * (\text{NIR} - \text{rojo})))$$

donde: ^2 significa elevar al cuadrado el valor y sqrt( ) es el operador de raíz cuadrada.

Por lo anteriormente expuesto, en el presente trabajo de investigación el Índice de Vegetación utilizado es el **NDVI**, ya que es el que ofrece:

- Mejor rango dinámico.
- Mejor sensibilidad a cambios de cobertura vegetal.
- Moderadamente sensitivo a los tipos de suelo.
- Reduce moderadamente efectos atmosféricos.

$$\text{Ecuación: NDVI} = (((\text{NIR} - \text{rojo}) / (\text{NIR} + \text{rojo})) + 1) * 127$$

---

### **Análisis de Componentes Principales**

Un segundo método de evaluación de la cobertura vegetal lo constituye el Análisis de Componentes Principales (PCA). El cual es considerado como un método de compresión de datos, ya que permite compactar datos redundantes en unas pocas bandas, esto es, que la dimensionalidad de los datos es reducida. Las bandas derivadas del análisis de componentes principales son independientes, no se correlacionan y son mas fáciles de interpretar que los datos origen (Jensen, 1996 y Faust, 1989).

Varios estudios han demostrado la utilidad de esta técnica (Byrne, 1980; Fung y LeDrew, 1988; Muchoney y Haack, 1994; Coppin y Bauer, 1996; Macleod y Congalton, 1998).

## **Tasseled Cap**

Otro método utilizado recientemente es el de Tasseled Cap, el cual permite visualizar diferentes bandas de una imagen multispectral en un espacio N-dimensional definido, donde N es el número de bandas. Cada píxel posicionado de acuerdo a sus valores numéricos en cada banda es ubicado en el espacio N-dimensional. Esta distribución de píxeles es determinada por el espectro de absorción/reflección de los materiales en la imagen. Esta agrupación de píxeles es denominada estructura de datos. (Crist y Kauth, 1986).

Esta técnica ofrece optimización de datos de observación para estudios de vegetación. Esta técnica genera tres ejes principales de estructura de datos las cuales definen información de vegetación (Crist, 1986; Crist y Kauth, 1986):

- **Brillantez** – la cual es una sumatoria ponderada de todas las bandas, definida en dirección de la principal variación de reflectancia de suelo.
- **Verdor** – la cual es ortogonal a la brillantez, un contraste entre las bandas del infrarrojo cercano y visibles. Fuertemente relacionado con la cantidad de vegetación verde en la escena.
- **Humedad** – relacionada con la humedad del follaje y del suelo (Lillesand y Kiefer, 1987).

El cálculo y dimensionalidad del resultado depende del tipo de sensor que se este utilizando, por ejemplo para Landsat 7 ETM+ (6 bandas):

$$\text{Brillantez} = 0.3561 (TM1) + 0.3972(TM2) + 0.3904 (TM3) + 0.6966 (TM4) + 0.2286 (TM5) + 0.1596 (TM7)$$

$$\text{Verdor} = -0.3344 (TM1) - 0.3544 (TM2) - 0.4556 (TM3) + 0.6966 (TM4) - 0.0242 (TM5) - 0.2630 (TM7)$$

$$\text{Humedad} = 0.2626 (TM1) + 0.2141 (TM2) + 0.0926 (TM3) + 0.0656 (TM4) - 0.7629 (TM5) - 0.5388 (TM7)$$

$$\text{Bruma} = 0.0805 (TM1) - 0.0498 (TM2) + 0.1950 (TM3) - 0.1327 (TM4) + 0.5752 (TM5) - 0.7775 (TM7)$$

Una de las principales desventajas encontradas en las técnicas de índices, es que diferentes tipos de vegetación o uso de suelo, pueden registrar valores iguales o viceversa, dependiendo de la fecha del año, la fenología de la vegetación, la densidad de la misma, o el uso dado. Por tal motivo, en el presente trabajo solo serán utilizados los índices de vegetación para inferir la densidad de cobertura vegetal.

### **Evaluación multitemporal**

Cambios en la cobertura vegetal o biomasa pueden ser detectados mediante el análisis de los valores de NDVI de fechas diferentes (NDVI diferencial) (Hayes y Sader, 2001). A mayor valor de NDVI, mayor densidad, biomasa o cobertura vegetal.

Este tipo de análisis puede realizarse principalmente de dos formas:

- 1.- mediante la comparación de dos o más coberturas de uso de suelo y vegetación, evaluando las diferencias de geometría área entre clases. A partir de dos coberturas temáticas digitalizadas o derivadas de la clasificación de imágenes de satélite.
- 2.- mediante la comparación directa de imágenes o índices de imágenes, para posteriormente interpretar y clasificar los tipos de cambios.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## **ANEXO IV**

### **Modelación Hidrológica.**



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

El escurrimiento no puede ser medido directamente mediante técnicas de sensores remotos. Sin embargo, existen dos grandes áreas donde los sensores remotos pueden ser utilizados en modelación hidrológica y de escurrimientos:

1. en la determinación de la geometría de cuencas y subcuencas, red de drenaje, y otra información para modelos hidrológicos distribuidos y para picos de flujo empíricos, escurrimiento anual o ecuaciones de flujo mínimo.
2. proveer datos de entrada tales como humedad del suelo o la determinación de tipos de uso de suelo que son utilizados para definir coeficientes de escurrimiento.

El formato raster de sensores remotos lo hace ideal para integrarse a sistemas de información geográfica y determinar de forma específica la ubicación de las coberturas de suelo dentro de la cuenca.

Los factores meteorológicos que afectan el escurrimiento son:

- Tipo de precipitación
- Intensidad
- Cantidad
- Duración
- Distribución sobre la cuenca
- Dirección de movimiento
- Precipitaciones previas y humedad del suelo
- Otras condiciones climáticas y meteorológicas que afectan la evapotranspiración, tales como temperatura, viento, humedad relativa y estación.

Las características que afectan el escurrimiento son:

- Uso de Suelo
- Cobertura Vegetal
- Tipo de Suelo
- Área de Drenaje
- Forma de la Cuenca
- Elevación
- Pendiente

Una de las primeras aplicaciones de sensores remotos en modelación hidrológica mediante imágenes Landsat, fue utilizado para estimar coeficientes de escurrimiento en áreas rurales y urbanas por Jackson (1977). El tipo de vegetación y uso de suelo es una característica importante en el proceso de escurrimiento que afecta la infiltración, erosión y evapotranspiración. La mayoría de los trabajos en la adaptación de sensores remotos a modelación hidrológica ha involucrado el modelo numérico de curva de escurrimiento del servicio de conservación de suelos (Departamento de Agricultura de Estados Unidos de Norteamérica, 1972) para el cual la información de sensores remotos es utilizado como un sustituto de los mapas de cobertura de suelo obtenidos por métodos tradicionales. (Jackson, 1977 y Bondelid, 1982).

La cantidad y calidad del agua aprovechable depende de las condiciones climáticas, edáficas, topográficas, tipo de vegetación y del manejo que realiza el hombre a los recursos naturales. Lo anterior plantea la necesidad de efectuar una caracterización integral que permita definir lo que técnicamente es posible realizar en ella, desde el punto de vista de las prácticas de uso de suelo para definir las prescripciones más adecuadas en la administración de los recursos naturales contenidos, para lo cual el agua se convierte en el elemento integrador del estudio (Sánchez, 1987).

En la actualidad, es necesario considerar la cuenca hidrográfica como la unidad de planeación forestal, la cual representa el marco restrictivo de la producción maderable así como el monitoreo del impacto causado a otros recursos.

De esta manera, la cuenca hidrográfica en sí misma (o cada una de las subdivisiones hidrológicas) es base fundamental para la planificación del uso de la tierra. Específicamente, el uso de la tierra en cada porción de la cuenca hidrográfica se determina con respecto a sus consecuencias para otras porciones. Sin embargo, las unidades de tierra sobre las cuales se basa tal definición, usualmente se escogerán de acuerdo con pendiente, suelo, vegetación, etc. Solamente cuando se evalúan específicamente las consecuencias sobre el flujo hidrológico, las cuencas tributarias (cuencas de primer orden o submicrocuencas) serán las unidades de tierra apropiadas.

## **Índice de Compacidad**

La forma de la cuenca es importante para conocer la conjunción del escurrimiento de una corriente o el tiempo de concentración de la avenida. Cuanto más se acerque la forma circular, más rápidamente se concentrarán las aguas hacia el lecho del río y por lo tanto, la avenida será mayor. La forma de la cuenca más frecuente es la que tiene forma de hoja de parra y puede ser más o menos alargada, sin embargo, los índices de compactación nos pueden proporcionar una idea más objetiva de lo anterior (Sánchez, 1987).

Este índice será mayor o igual a 1, de manera que entre más próximo este a la unidad, la forma de la cuenca se aproximará más a la forma de un círculo. Es decir, si el índice de compacidad presenta valores mayores que la unidad, la cuenca será alargada y tendrá forma circular a medida que el índice de compacidad se aproxime a la unidad. Por lo tanto, a medida que la cuenca tiende a ser redonda, aumenta la peligrosidad de la misma, porque las distancias relativas de los puntos de la divisoria con respecto a uno central, no presentan diferencias mayores y el tiempo de concentración se hace menor, por consecuencia, mayor será la posibilidad de que las ondas de crecidas sean continuas (Sánchez, 1987).

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



Tomando como base el Modelo Digital de Elevación (MDE) se elaboró un Modelo Hidrológico, el cual es un proceso constituido por varias etapas:

1. Para realizar de forma adecuada una modelación hidrológica, el MDE debe de ser revisado, ya que existen celdas cuyo valor presenta inconsistencias (errores) de valor, debido principalmente a la resolución espacial y por redondeos de valores enteros.(Hutchinson, 1988) Esto genera un conjunto de pequeñas depresiones y crestas que deben de ser corregidas para asegurar la adecuada delimitación y trazo de cuencas (o áreas de captación) y cauces. De lo contrario, los cauces modelados presentarían una red de drenaje segmentada (discontinua) y la delimitación de cuencas sería imposible, esto se logra mediante la aplicación del algoritmo FILL del módulo GRID de Arc/Info 7.0.2®.

2. A partir del MDE corregido, se determina la dirección de los escurrimientos para cada celda, esto es, en que dirección se movería el agua captada en dicha celda. Es un proceso que utiliza las mismas bases con las que se calcula la orientación de las pendientes o exposición.

3. Una vez determinada la dirección de flujo, se procede a calcular el flujo acumulativo para cada celda. Esto puede ser calculado de varias formas dependiendo de los objetivos de modelación:

a).- Si el valor asignado a cada una de las celdas de la cuenca es igual a <sup>®</sup>

1, se puede contabilizar el número de celdas tributarias "aguas arriba" para cada celda. Este es el proceso más simple del algoritmo.

b).- Si el valor asignado a cada una de las celdas es igual a la superficie de la celda misma ( $m^2$ ), se puede contabilizar la superficie tributaria "aguas arriba" para cada celda. Para esta alternativa del algoritmo, es necesario agregar la constante de superficie por celda.

c).- Si se desea calcular el volumen total de escurrimiento superficial para cada celda, es necesario calcular el escurrimiento neto en  $m^3$ . En esta otra alternativa del algoritmo, es necesario agregar el valor de escurrimiento neto promedio de toda la cuenca (asumiendo que es

uniforme), o una cobertura raster con el valor de escurrimiento neto para cada celda en particular, dependiendo de las características particulares de cada sitio. Este proceso calcula el total de "escurrimiento" que pasa por cada celda siguiendo la dirección de flujo.

Para la realización de este último inciso, se tomó como base la subcuenca del Río Baluarte, se delimitó su área de captación y se revisó la información registrada en la carta hidrológica de aguas superficiales F13-2, escala 1:250,000 de INEGI, referente a los datos de las estaciones meteorológicas e hidrométricas contenidas en dicha área.

Con base en esta información, se calculó el promedio de precipitación media anual en la cuenca, así mismo se definió y calculó a partir de la modelación hidrológica la superficie total de la cuenca. Multiplicando la superficie calculada de la cuenca, por la precipitación media anual se obtuvo el volumen promedio de lluvia captada, el cual se comparó con el volumen medio anual drenado para determinar el coeficiente medio de escurrimiento de la cuenca

Una vez definido el coeficiente de escurrimiento de la subcuenca del Río Baluarte y con el objetivo de modelar los volúmenes de escurrimiento medio anual para cada cuenca, subcuenca, microcuenca, submicrocuenca y celda dentro del ejido Pueblo Nuevo, se modeló la cantidad y distribución de la precipitación media anual utilizando la información temática de isoyetas (Hutchinson, 1993), misma que fue interpolada y transformada a formato raster mediante el algoritmo TOPOGRIG, resultando en una matriz con valores de precipitación media anual gradados de forma continua, con el mismo número de columnas y renglones a los modelos digitales de elevación y a las imágenes Landsat.

Los valores de precipitación media anual modelados para cada píxel fueron convertidos de milímetros a metros y multiplicados por la superficie en metros cuadrados ( $225 \text{ m}^2$ ), para de esta forma calcular el volumen de precipitación media anual captada en metros cúbicos en cada píxel.

El siguiente paso es determinar el coeficiente de escurrimiento, esto es, el porcentaje del agua captada por unidad de área (píxel) que no es infiltrada en el suelo y escurre superficialmente a otros puntos de la cuenca.

Diversos autores sobre temas hidrológicos han desarrollado tablas de escurrimiento (Chow, 1988). En su mayoría dichas tablas ponen especial énfasis en el uso de suelo y cobertura vegetal existente, como el factor de mayor influencia en las ecorrentías.

Dado que los valores climáticos e hidrométricos datan de 1973, se trabajó con la imagen Landsat-MSS de 1973, la cual fue recortada, extrayendo sólo el área de la subcuenca del Río Baluarte y se calculó el Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación para dicha zona, como indicador de la densidad de cobertura vegetal, dada su importancia en el proceso de escurrimiento pues afecta la infiltración, erosión y evapotranspiración. Posteriormente se compararon los valores de dicho índice, con los que se presentan en la tabla 18, para determinar la ecuación polinomial de ajuste, de tal forma que el máximo valor de NDVI coincida con un índice de escurrimiento de 0.20 (el mínimo para áreas boscosas), el valor promedio de NDVI coincida con el índice de escurrimiento medio para toda la cuenca, y el mínimo valor de NDVI coincida con un índice de escurrimiento de 0.99 (en las laderas rocosas de escasa vegetación).

La ecuación de ajuste calculada fue aplicada a los valores de NDVI que cubren la totalidad del ejido Pueblo Nuevo, resultantes de las imágenes Landsat MSS de 1973 y Landsat-ETM+ de 2000. Y de esta forma obtener los índices de escurrimiento para el área de estudio en las dos fechas.

Estos índices fueron aplicados a los valores de escurrimiento potencial o volumen medio anual captado calculado en cada píxel y así determinar el valor de escurrimiento neto por píxel en metros cúbicos., para a continuación aplicar el algoritmo de flujo acumulado.

Posteriormente se realizó la definición de cauces, seleccionando las celdas cuyo valor de flujo acumulativo fue mayor a una constante predeterminada según el grado de detalle de la red hidrológica de cauces a generar (Hutchinson, 1989).

La red de cauces utilizada para la determinación de cuencas, subcuencas, microcuencas y submicrocuencas, se basó en la hidrología superficial trazada sobre cartas de INEGI, escala 1:250,000. Para lo cual se sobrepuso la información vectorial de cauces sobre la matriz de flujo acumulado y determinar la constante.

Una vez definida la red de cauces para la determinación de cuencas, subcuencas, microcuencas y submicrocuencas, se procedió a localizar los puntos de intersección de cauces. Estos puntos son utilizados por el sistema para identificar los segmentos que componen la red hidrológica (figura 104).

Este algoritmo fue utilizado para asignar a cada segmento de la red hidrológica el número de orden, según el criterio de Strahler in 1952, "El orden de cauce solo se incrementa cuando cauces del mismo orden se intersectan" (figura 105). Para finalizar la modelación hidrológica de cauces, se transforma la información de formato raster a vector, en este proceso cada segmento de cauce raster limitado por sus intersecciones se transforma en un arco, el cual contiene la información de número de orden y se genera su topología.



Figura 104. Esquema de ubicación de sitios de intersección de cauces.

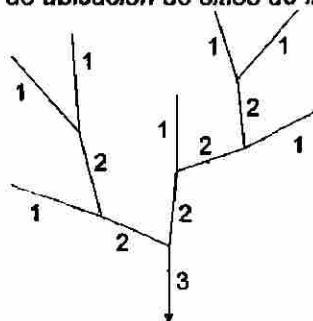
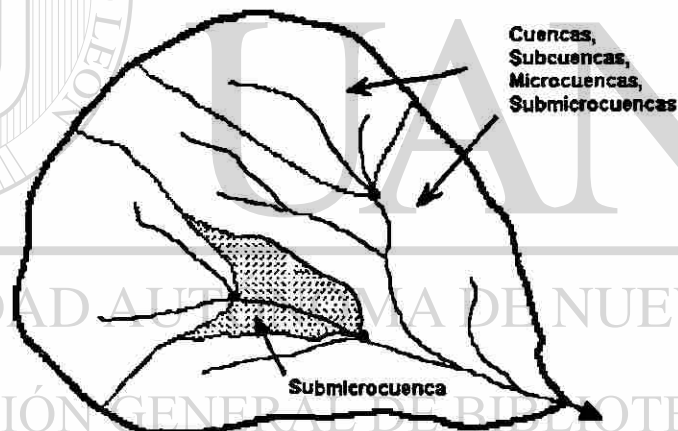


Figura 105. Esquema de asignación de órdenes hidrológicos.

Para el proceso de delimitación de cuencas, el algoritmo analiza la dirección de flujo para encontrar todas las celdas incluidas en la misma área de captación, la cual es creada localizando los puntos más bajos (cuellos de cuenca o puntos de desfogue) que se encuentran en los límites del área analizada. Solo es necesario el dato de dirección de flujo, calculado previamente.

Para definir las submicrocuencas o área de contribución de cada segmento de cauce (por arriba de los puntos de intersección), se utilizaron los datos de dirección de flujo e intersecciones definidos anteriormente (figura 106).

Adicionalmente se calculó la distancia de cada píxel a la salida de cada subcuenca dentro del área de estudio, con el objetivo de determinar la distancia que los volúmenes de agua deben de recorrer siguiendo la red de cauces y de esta forma calcular el tiempo de concentración, así como generar los hidrogramas. Esta red de cauces posteriormente será utilizada para la definición de zonas de segregación de aprovechamientos dentro de subrodales.



- Límites de divisiones hidrológicas
- ..... Cauces (escurrimientos)
- Intersecciones
- ▨ Submicrocuencas

Figura 106. Esquema del proceso para delimitar áreas de captación (submicrocuencas).

A continuación en la figura 107 se muestra de forma esquemática los procesos aplicados a la información topográfica digital para la elaboración de los diferentes modelos.

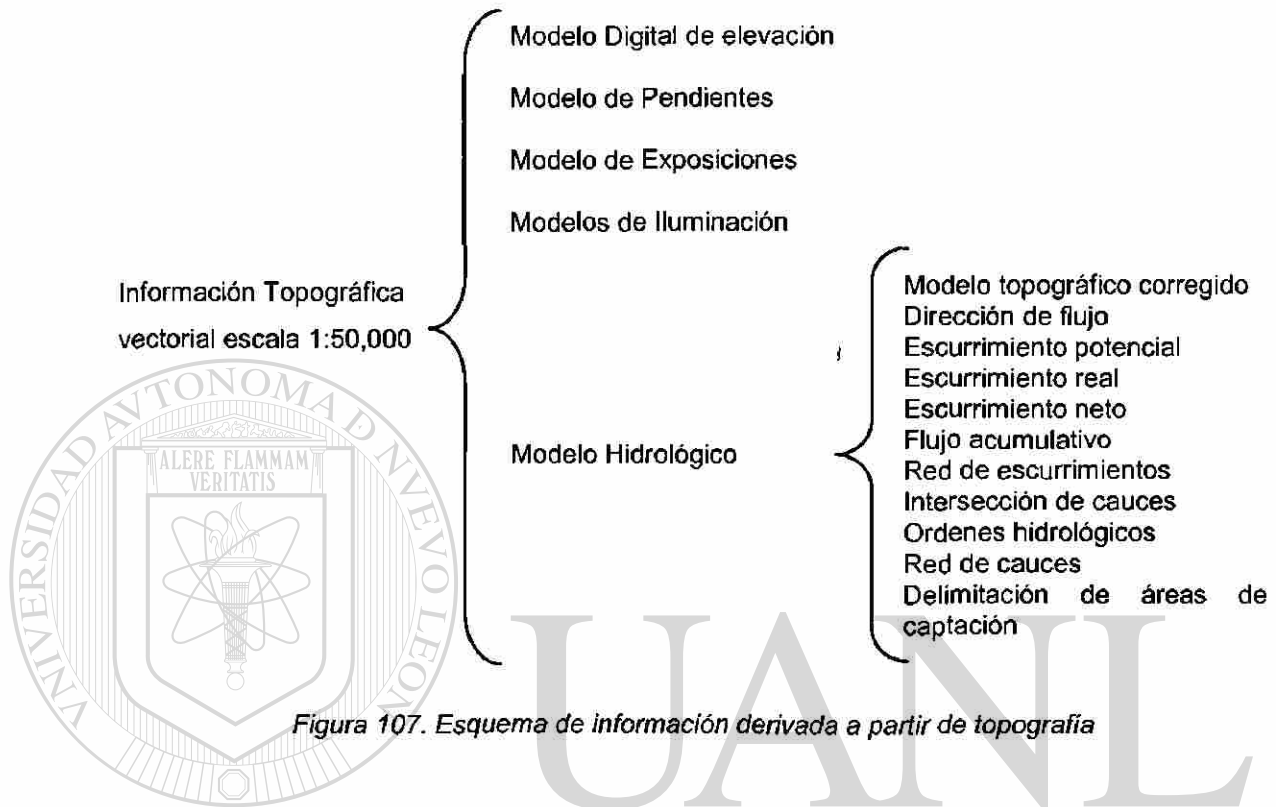


Figura 107. Esquema de información derivada a partir de topografía

