



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL

ANÁLISIS DEL CAMBIO EN LA CONECTIVIDAD DEL PAISAJE (1975-2008)  
DE LA CUENCA DEL LAGO CUITZEO, MICHOACÁN COMO MARCO PARA  
LA IDENTIFICACIÓN DE ESCENARIOS DE CONSERVACIÓN

# TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE  
MAESTRO EN GEOGRAFÍA  
ORIENTACIÓN EN MANEJO INTEGRADO DEL PAISAJE

P R E S E N T A :  
CAMILO ANDRÉS CORREA AYRAM

DIRECTOR DE TESIS: DR. MANUEL E. MENDOZA CANTÚ

**CIGA**

CENTRO DE INVESTIGACIONES  
EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL

MÉXICO, D.F.

2012

# Tabla de Contenido

<b>CAPÍTULO I</b> .....	1
1.1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.2 OBJETIVOS .....	4
1.2.1 OBJETIVO GENERAL: .....	4
1.2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS: .....	4
1.3 HIPOTESIS Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN .....	5
1.4 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	6
1.4.1 UBICACIÓN .....	6
1.4.2 GENERALIDADES DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS .....	7
1.4.3 TIPOS DE COBERTURA VEGETAL .....	11
1.5 MARCO CONCEPTUAL .....	17
1.5.1 COBERTURA, ESTRUCTURA DEL PAISAJE Y PARCHES DE HÁBITAT .....	17
1.5.2 ECOLOGÍA DEL PAISAJE Y LA CUANTIFICACIÓN DE PATRONES Y PROCESOS .....	18
1.5.3 PAISAJE Y CONECTIVIDAD .....	19
1.6 MARCO DE ANTECEDENTES .....	20
1.7 MARCO TEÓRICO .....	22
1.7.1 TEORÍA ECOLÓGICA DEL PAISAJE .....	22
1.7.2 TEORÍA DE GRÁFICAS .....	23
1.7.3 TEORÍA DE CIRCUITOS .....	23
1.8 MARCO REFERENCIAL .....	25
1.9 PROCESO METODOLÓGICO .....	26
1.10 BIBLIOGRAFÍA .....	28
<b>CAPÍTULO II</b> .....	33
ANÁLISIS DEL CAMBIO EN LA CONECTIVIDAD ESTRUCTURAL DEL PAISAJE (1975-2008) EN LA CUENCA DEL LAGO CUITZEO, MICHOACÁN .....	33
2.1 INTRODUCCIÓN .....	33
2.2 OBJETIVO .....	34
2.3 METODOLOGÍA .....	34
2.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	37
2.4.1 CONFIGURACIÓN ESPACIAL EN EL NIVEL DE PAISAJE .....	37

2.4.2 COMPOSICIÓN DEL PAISAJE .....	41
2.4.3 CONECTIVIDAD Y AISLAMIENTO EN EL NIVEL DE PAISAJE .....	43
2.4.5 CONFIGURACIÓN ESPACIAL EN EL NIVEL DE CLASE (TIPOS DE COBERTURA) .....	44
2.4.6 COMPOSICIÓN DEL PAISAJE EN EL NIVEL DE CLASE.....	48
2.4.7 CONECTIVIDAD Y AISLAMIENTO EN EL NIVEL DE CLASE .....	51
2.5 CONCLUSIONES .....	58
2.6 BIBLIOGRAFÍA.....	59
<b>CAPÍTULO III</b> .....	62
ANÁLISIS DEL CAMBIO EN LA CONECTIVIDAD FUNCIONAL (1975-2008) EN LA CUENCA DEL LAGO CUITZEO, MICHOACÁN.....	62
3. INTRODUCCIÓN .....	62
3.1 OBJETIVOS.....	63
3.2 METODOLOGÍA.....	63
3.2.1 SELECCIÓN DE ESPECIES FOCALES.....	63
3.2.2 MODELO DE DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE ESPECIES .....	65
3.2.3 VALORACIÓN DEL GRADO DE RESISTENCIA .....	67
3.2.4 SELECCIÓN DE PARCHES DE HÁBITAT .....	67
3.2.5 CLASIFICACIÓN MORFOLÓGICA DE LOS PATRONES ESPACIALES DE LOS PARCHES DE HÁBITAT.....	69
3.2.6 VALORACIÓN FINAL DE LA RESISTENCIA CON BASE EN OPINIÓN EXPERTA .....	70
3.2.7 CORROBORACIÓN EN CAMPO DE LOS PARCHES DE HÁBITAT SELECCIONADOS .....	71
3.2.8 ELABORACIÓN DE MAPAS DE RESISTENCIA DEL PAISAJE.....	72
3.2.9 MODELAMIENTO DE LA CONECTIVIDAD FUNCIONAL.....	73
3.2.10 APLICACIÓN DE ÍNDICES INTEGRALES DE CONECTIVIDAD .....	76
3.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	79
3.3.1 CARACTERÍSTICAS ECOLÓGICAS GENERALES DE LAS ESPECIES FOCALES .....	79
3.3.2 MODELO DE DISTRIBUCIÓN DE LAS ESPECIES FOCALES .....	79
3.3.3 SELECCIÓN DE PARCHES DE HÁBITAT.....	87
3.3.4 CLASIFICACIÓN MORFOLÓGICA DE LOS PATRONES ESPACIALES DE LOS PARCHES DE HÁBITAT.....	94
3.3.5 VALORACIÓN DE LA RESISTENCIA .....	100
3.3.6 CORROBORACIÓN EN CAMPO DE LOS PRINCIPALES PARCHES DE HABITAT .....	105

3.3.7 MODELAMIENTO DE LA CONECTIVIDAD FUNCIONAL.....	108
3.3.8 IMPORTANCIA DE LOS PARCHES DE HABITAT EN LA CONECTIVIDAD DEL PAISAJE .....	121
3.4 CONCLUSIONES .....	128
3.5 BIBLIOGRAFÍA .....	130
<b>CAPÍTULO IV</b> .....	<b>135</b>
4.1 CONCLUSIONES GENERALES .....	135
ANEXOS .....	138

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Ubicación general del área de estudio	<b>6</b>
<b>Figura 2</b>	Mapa de distribución de suelos de la cuenca del lago Cuitzeo	<b>9</b>
<b>Figura 3</b>	Mapa de subcuencas y drenajes de la cuenca del lago Cuitzeo	<b>10</b>
<b>Figura 4</b>	Mapa generalizado de cobertura de la tierra	<b>12</b>
<b>Figura 5</b>	Perfil altitudinal y cobertura asociada en el centro de la cuenca	<b>13</b>
<b>Figura 6</b>	Bosques de pino municipio de Queréndaro	<b>14</b>
<b>Figura 7</b>	Matorrales secundarios en la cuenca del lago Cuitzeo	<b>15</b>
<b>Figura 8</b>	Pastizales inducidos	<b>16</b>
<b>Figura 9</b>	Ejemplo de gráfica	<b>23</b>
<b>Figura 10</b>	Ejemplo de ruta de mínimo costo entre dos nodos	<b>24</b>
<b>Figura 11</b>	Proceso metodológico	<b>27</b>
<b>Figura 12</b>	Descripción general del software FRAGSTATS	<b>34</b>
<b>Figura 13</b>	Mapa de cobertura de la tierra (1975-1996-2000-2003-2008)	<b>38</b>
<b>Figura 14</b>	Número de parches en el total del paisaje	<b>39</b>
<b>Figura 15</b>	Tamaño promedio de parches en el total del paisaje	<b>39</b>
<b>Figura 16</b>	Densidad de parches en el total del paisaje	<b>39</b>
<b>Figura 17</b>	Índice del parche más grande en el nivel de paisaje	<b>41</b>
<b>Figura 18</b>	Dominancia y uniformidad de Shannon en el nivel de paisaje	<b>42</b>
<b>Figura 19</b>	Índice de proximidad en el nivel de paisaje	<b>43</b>
<b>Figura 20</b>	Tamaño promedio de parche en el nivel de clase	<b>45</b>
<b>Figura 21</b>	Densidad de parches en el nivel de clase	<b>45</b>
<b>Figura 22</b>	Índice del parche más grande en el nivel de clase	<b>47</b>

<b>Figura 23</b>	Porcentaje en el total del paisaje	<b>50</b>
<b>Figura 24</b>	Área de cada tipo de cobertura	<b>50</b>
<b>Figura 25</b>	Índice de proximidad media en el nivel de clase	<b>52</b>
<b>Figura 26</b>	Índice de proximidad media para los bosques cerrados, abiertos y semiabiertos y matorrales	<b>53</b>
<b>Figura 27</b>	Índice de conectancia en el nivel de clase	<b>55</b>
<b>Figura 28</b>	Índice de conectancia para las coberturas forestales	<b>55</b>
<b>Figura 29</b>	Índice de cohesión en el nivel de clase	<b>56</b>
<b>Figura 30</b>	Descripción general del software MaxEnt	<b>66</b>
<b>Figura 31</b>	Descripción general del software GUIDOS	<b>69</b>
<b>Figura 32</b>	Ejemplo de cálculo de media truncada	<b>71</b>
<b>Figura 33</b>	Mapa de los parches de hábitat corroborados	<b>71</b>
<b>Figura 34</b>	Cálculo para obtener el mapa de resistencia acumulado	<b>72</b>
<b>Figura 35</b>	Descripción general de la herramienta Linkage Mapper	<b>73</b>
<b>Figura 36</b>	Descripción general del software Circuitscape	<b>76</b>
<b>Figura 37</b>	Descripción general del software Conefor Sensinode	<b>77</b>
<b>Figura 38</b>	Puntos de ocurrencia del gato montés	<b>81</b>
<b>Figura 39</b>	Puntos de ocurrencia del cacomixtle	<b>82</b>
<b>Figura 40</b>	Área bajo la curva ROC (AUC) para <i>Bassariscus astutus</i>	<b>83</b>
<b>Figura 41</b>	Área bajo la curva ROC (AUC) para <i>Lynx rufus</i>	<b>84</b>
<b>Figura 42</b>	Probabilidad de ocurrencia de <i>Bassariscus astutus</i>	<b>86</b>
<b>Figura 43</b>	Probabilidad de ocurrencia de <i>Lynx rufus</i>	<b>87</b>
<b>Figura 44</b>	Mapa de aptitud de hábitat (1975-2008)	<b>91</b>
<b>Figura 45</b>	Parches de hábitat seleccionados para el año 2008	<b>92</b>
<b>Figura 46</b>	Representatividad de área de hábitat óptimo para las especies focales	<b>93</b>
<b>Figura 47</b>	Ejemplo de clasificación morfológica de los parches de hábitat 2008	<b>95</b>
<b>Figura 48</b>	Área de los parches de hábitat mayores a 200 ha	<b>96</b>
<b>Figura 49</b>	Cambio en el área de los elementos conectores del paisaje para el gato montés	<b>97</b>
<b>Figura 50</b>	Cambio en el área de los elementos conectores del paisaje para el cacomixtle	<b>97</b>
<b>Figura 51</b>	Cambio en el área de las categorías <i>islet</i> y <i>perforation</i>	<b>99</b>
<b>Figura 52</b>	Distribución del grado de resistencia para el gato montes en el año 2008	<b>103</b>
<b>Figura 53</b>	Porcentaje de ocupación de las categorías de resistencia para el cacomixtle	<b>104</b>

<b>Figura 54</b>	Porcentaje de ocupación de las categorías de resistencia para el gato montés	<b>105</b>
<b>Figura 55</b>	Parche de hábitat No1	<b>106</b>
<b>Figura 56</b>	Parche de hábitat No2	<b>106</b>
<b>Figura 57</b>	Parche de hábitat No3	<b>107</b>
<b>Figura 58</b>	Parche de hábitat No4	<b>107</b>
<b>Figura 59</b>	Parche de hábitat No5	<b>108</b>
<b>Figura 60</b>	Corredores de menor costo normalizado del gato montés	<b>112</b>
<b>Figura 61</b>	Corredores potenciales como ejemplo de escenario de conservación para el año 2008	<b>113</b>
<b>Figura 62</b>	Corredores de menor costo normalizado del cacomixtle	<b>115</b>
<b>Figura 63</b>	Mapa de probabilidad de conectividad para el gato montés	<b>118</b>
<b>Figura 64</b>	Mapa de probabilidad de conectividad para el cacomixtle	<b>119</b>
<b>Figura 65</b>	Valores de IIC para las dos especies focales	<b>122</b>
<b>Figura 66</b>	Número de componentes (NC) para las dos especies focales	<b>124</b>
<b>Figura 67</b>	Importancia de los parches de hábitat en la conectividad general del paisaje	<b>125</b>
<b>Figura 68</b>	Rangos de importancia de los parches de hábitat	<b>126</b>

#### **ÍNDICE DE TABLAS**

<b>Tabla 1</b>	Leyenda del mapa de cobertura de la tierra al año 2008	<b>11</b>
<b>Tabla 2</b>	Métricas de aislamiento y conectividad estructural	<b>37</b>
<b>Tabla 3</b>	Perfil de las características ecológicas generales de las especies focales	<b>80</b>
<b>Tabla 4</b>	Porcentaje de contribución de las variables al modelo de distribución del cacomixtle	<b>84</b>
<b>Tabla 5</b>	Porcentaje de contribución de las variables al modelo de distribución del gato montés	<b>85</b>
<b>Tabla 6</b>	Categorización de los tipos de cobertura para la selección de parches de hábitat	<b>88</b>
<b>Tabla 7</b>	Puntajes de aptitud de hábitat para cada variable	<b>90</b>
<b>Tabla 8</b>	Valoración final del grado de resistencia	<b>101</b>
<b>Tabla 9</b>	Información derivada de la rutas de mínimo costo del gato montés	<b>109</b>
<b>Tabla 10</b>	Relación de la distancia costo con la longitud de las RMC del gato montés	<b>110</b>
<b>Tabla 11</b>	Información derivada de la rutas de mínimo costo del cacomixtle	<b>114</b>
<b>Tabla 12</b>	Relación de la distancia costo con la longitud de las RMC del cacomixtle	<b>114</b>
<b>Tabla 13</b>	Características estructurales de los parches de hábitat según su importancia para la conectividad	<b>126</b>

## RESUMEN

La cuenca del lago Cuitzeo es una importante área ecológica con una fuerte presión sobre las coberturas de tipo arbóreo y arbustivo, las cuales son elementos claves en el mantenimiento de la biodiversidad. En este sentido, se realizó un análisis del cambio en la conectividad del paisaje de la cuenca del lago Cuitzeo, Michoacán, entre los años 1975 y 2008, como marco para la identificación de áreas prioritarias para la conservación de la integridad ecológica de la cuenca. El análisis se abordó con base en dos ejes temáticos principales: La conectividad estructural y la conectividad funcional. Los periodos de estudio corresponden a 1975-1996, 1996-2000, 2000-2003, y 2003-2008. En este sentido, la conectividad estructural fue analizada mediante la aplicación de métricas del paisaje con base en los mapas de cobertura de cada periodo de tiempo previamente generalizados y estandarizados, posteriormente se realizó el análisis comparativo.

En cuanto a la conectividad funcional, primero se modeló la distribución potencial de dos especies focales con capacidad de dispersión contrastante, para determinar la aptitud y disponibilidad de hábitat potencial para cada especie. El modelo se elaboró utilizando puntos de ocurrencia y el enfoque de máxima entropía. Posteriormente, se calificó el grado de resistencia del paisaje por medio de opinión de expertos en la biología de las especies focales. En un rango de 0 a 100 se valoraron ocho variables que están relacionadas con la resistencia del paisaje. A medida que el valor se acerca a 100 mayor dificultad para el desplazamiento de la especie focal. Los valores finales se asignaron mediante el cálculo de la media “truncada”.

Posteriormente, se seleccionaron los parches de hábitat por medio de la sobreposición de las capas de hábitat potencial (modelo derivado de MaxEnt), hábitat actual (reclasificación de la cobertura en rangos de aptitud para cada periodo de tiempo) y de las variables valoradas por los expertos. Los resultados se dividieron en cuartiles, los dos intervalos inferiores se clasificaron como hábitat deficiente, el intermedio como subóptimo y el intervalo superior como hábitat óptimo. Los parches de hábitat óptimo se utilizaron en el análisis morfológico de los patrones espaciales y los parches con áreas mayores al tamaño mínimo de hábitat fueron corroborados en campo y utilizados finalmente como insumo para el modelamiento final de la conectividad.

Se obtuvieron los mapas de resistencia acumulada para cada periodo de tiempo a partir de la sobreposición entre las capas de resistencia generadas para cada variable previamente valoradas. Posteriormente, se llevó a cabo el modelamiento de la conectividad funcional. Como insumos del modelo se utilizaron los parches de hábitat óptimo y los mapas de resistencia acumulada, se obtuvieron las rutas de mínimo costo (basadas en teoría de gráficas) y los mapas de flujo de corriente (basados en teoría de circuitos) para cada periodo de tiempo. Las rutas de mínimo costo (RMC) corresponden a los corredores potenciales, los cuales se normalizaron unificando las RMC en un gradiente en el que cada pixel representa el valor mínimo de todos los corredores individuales normalizados. Por otro lado, los mapas de flujo de corriente expresan la distribución de los píxeles con alta probabilidad de movilidad entre los parches de hábitat. Posteriormente, para evaluar el estado de la conectividad del paisaje en cada periodo de tiempo se aplicaron índices integrales de conectividad. Por último, se calculó el índice de importancia de los parches para determinar cual ha sido la contribución individual de cada parche de hábitat en la conectividad general del paisaje.

Las coberturas de tipo arbóreo y arbustivo como los bosques cerrados, bosques abiertos y semiabiertos y matorrales presentaron una conectividad estructural bastante baja en contraste con las coberturas de origen antrópico como los pastizales inducidos y cultivos los cuales dominaron el paisaje a través del tiempo. En cuanto a la conectividad funcional, el índice integral de conectividad registró valores muy bajos asociados a una poca disponibilidad de hábitat para las dos especies focales. Sin embargo, el estudio de la contribución individual de los parches, dejó en claro la importancia de conservar los parches de hábitat con áreas muy grandes al encontrar una relación estricta entre el tamaño del parche y la capacidad de dispersión de las especies focales. Así mismo, la aplicación del enfoque basado en grafos y el otro en flujos de corriente resultó de gran aporte al estudio de la conectividad funcional al ser complementarios en cuanto a la identificación de corredores potenciales para la movilidad y la identificación de áreas de alta probabilidad de dispersión. En este sentido, el análisis de la conectividad del paisaje es un instrumento útil para la conservación de la biodiversidad y el manejo integrado del paisaje.

**Como citar este documento:**

**Correa Ayrám, C. A. 2012.** Análisis del cambio en la conectividad del paisaje (1975-2008) de la cuenca del lago Cuitzeo, Michoacán como marco para la identificación de escenarios de conservación. Tesis de maestría. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA). Universidad Nacional Autónoma de México. 142 pp.



## ABSTRACT

The Cuitzeo lake basin is an important ecological area with a strong human pressure on forest cover, which is a key element for long term biodiversity support. Therefore, we study the landscape connectivity change as a framework for identification of potential conservation areas, in the years of 1975-1996-2000-2003 and 2008. The analysis was based on two main themes: structural connectivity and functional connectivity. Thus, structural connectivity was analyzed by applying landscape metrics based on the land cover maps of each year, previously generalized and standardized. Then, we performed a comparative analysis. In terms of functional connectivity, we modeled the two focal species potential distribution with contrasting dispersal ability and determined the habitat availability and suitability. Then, we identified the optimal habitat patches and produced the landscape cumulative resistance maps. We estimated the least cost paths (graph-based approach) and current flow maps (circuit theory approach). The least cost paths correspond to the potential corridors unified in a gradient; each pixel represents the minimum value of all normalized individual paths. The current flow maps represent the patches distribution with high probability of inter-patch mobility. For the landscape connectivity evaluation, we applied an integral index of connectivity (*IIC*) in each study period, and we determined the individual habitat patch contribution (*dIIC*) in the overall landscape connectivity. The forest land cover as a closed forest, semi closed forest and scrublands presented a low structural connectivity values in contrast to the human land cover as an induced grasslands and crops, which dominated the landscape over time. In terms of functional connectivity, the *IIC* index reported very low values associated with reduced focal species habitat availability. However, the individual habitat patch contribution study showed the conservation importance of very large areas of optimal habitat patch. The application of graph-based approach and current flow mapping were very useful and complementary in terms of the potential corridor for mobility estimation and the identification of high probability dispersion areas. Therefore, the landscape connectivity analysis provides a useful tool for identification of potential conservation areas and landscape planning.