

---

## Índice general

---

Índice general.....	12
Capítulo 1. Introducción .....	25
1.1 Motivación de la investigación .....	25
1.2. Objetivos .....	28
1.3 Contenido y estructura de la Tesis .....	31
Capítulo 2. Material y métodos.....	34
2.1 El concepto de cuenca hidrográfica .....	34
2.2 La Ordenación y Restauración Hidrológico Forestal .....	38
2.3 Manejo y Planificación de cuencas hidrográficas .....	44
2.3.1 Ordenación del territorio .....	45
2.4 Metodologías para el ordenamiento de cuencas .....	46
2.5 Antecedentes históricos en México .....	49
2.6 Acciones contra la desertificación en México.....	52
2.7 La modelación hidrológica.....	59
2.7.1 Modelo Nonpoint Source Pollution and Erosion Comparition Tool (N-SPECT) 61	
2.7.1.1 Parametrización de N-SPECT .....	62
2.7.1.2 Limitaciones del modelo hidrológico .....	65
2.7.2 Modelo de simulación del flujo de agua subterránea, Modflow.....	65
2.7.2.1 Parametrización de Modflow .....	67
2.7.2.2. Limitaciones del modelo Modflow .....	69
Capítulo 3. Caso de estudio .....	71
3.1 Descripción del medio físico.....	72
3.2 Localización geográfica .....	78
3.3 Geología y Litología .....	85

3.4 Edafología y estratigrafía .....	90
3.4.1 Clasificación de las litofacies según su repercusión en los procesos erosivos ....	92
3.4.2 Descripción de los suelos .....	94
3.5 Clima.....	98
3.5.1 Elección de observatorios meteorológicos .....	101
3.5.2 Clasificación climática .....	104
3.5.2.1 Clasificación climática de Thornthwaite.....	104
3.5.2.2 Índice de Papadakis .....	105
3.5.2.3 Índice de aridez de Martonne.....	106
3.5.2.4 Índice de agresividad del clima (F. Fournier) .....	107
3.6 Vegetación y cultivos .....	109
3.6.1 Vegetación actual y distribución de usos del suelo en la zona de estudio .....	110
3.7 Tenencia de la tierra.....	117
3.8 Características socioeconómicas .....	119
3.8.1 Demografía y análisis de la población .....	120
3.8.2 El mercado de trabajo.....	124
3.8.3 Análisis de cada uno de los sectores económicos.....	125
3.8.3.1 Sector primario .....	125
3.8.3.2 Sector secundario.....	128
3.8.3.3 Sector terciario.....	129
3.9 Hidrología .....	130
3.9.1 Reseña Hidrográfica .....	130
3.9.2 Parámetros de forma.....	135
3.9.2.1 Coeficiente de Gravelius.....	135
3.9.3 Parámetros de relieve .....	136
3.9.4 Parámetros relativos a la red hidrográfica. ....	140
3.9.5 Cálculo de caudales .....	143
3.9.5.1 Aplicación de la fórmula empírica de García Nájera.....	143
3.9.5.2 Aplicación del método de la dirección general de carreteras del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (MOPU) .....	144
3.9.5.3 Cálculo de la intensidad I.....	145

3.9.5.4 Cálculo del coeficiente de uniformidad .....	146
3.9.5.5 Cálculo del coeficiente de escorrentía .....	146
3.9.5.6 Precipitación máxima diaria .....	149
3.9.5.7 Cálculo del caudal punta Q.....	150
3.9.6 Erosión en la zona de estudio y zonas vulnerables .....	152
3.10 Metodologías de Ordenación en el caso de estudio .....	154
3.10.1 Metodología de Ordenación de la cuenca basada en el modelo USLE de estimación de la erosión .....	155
3.10.1.1 Métodos de cálculo factores USLE.....	157
3.10.1.2 Factor erosividad de la lluvia (R).....	157
3.10.1.3 El factor erosionabilidad (K) .....	160
3.10.1.4 El factor longitud-inclinación LS.....	166
3.10.1.5 Factor cubierta vegetal o factor C .....	168
3.10.1.6 El factor de prácticas de conservación P.....	170
3.10.1.7 Tolerancia de pérdidas de suelo y tasa de erosión según el Modelo USLE .....	171
3.10.1.8 Mapa de usos futuros en base a la Ordenación de la Cuenca .....	177
3.10.2 Metodología de Ordenación de la cuenca bajo el modelo NSPECT .....	183
3.10.2.1 Parametrización de N-SPECT .....	183
3.10.2.2 Cambios en la cobertura de uso del suelo .....	185
3.10.2.3 Ejecución y resultados de la Ordenación del territorio .....	186
3.10.3 Modelación del agua subterránea .....	192
3.10.3.1 El Acuífero de La Paz.....	193
3.10.3.2 Modelación del flujo subterráneo con MODFLOW .....	199
3.10.4 Ordenación según criterios Mintegui Aguirre y López .....	218
3.10.4.1 Clasificación de criterios para Mintegui Aguirre y López.....	218
Capítulo 4. Resultados al caso de estudio .....	227
4. 1 Propuesta de metodología para la Ordenación de Cuencas hidrográficas en el ámbito Árido Sudcaliforniano (MOCAS) .....	228
4.1.1 Estudio de la problemática .....	229
4.1.2 Establecimiento de los objetivos y selección de actividades .....	231

4.1.3 Elaboración del plan de trabajo .....	232
4.1.4 Identificación, caracterización y priorización de actores .....	233
4.1.5 Inventario y análisis del medio: cartografía temática .....	234
4.1.6 Fase de Prospectiva y Zonificación Ambiental .....	237
4.2 Resumen y comparativa de los resultados obtenidos en las distintas Ordenaciones.	256
Capítulo 5. Discusión.....	261
5.1 Resultados y discusión .....	261
5.1.1 Clasificación común de actividades .....	261
Capítulo 6. Conclusiones .....	274
6.1 Conclusiones .....	274
6.1.1. Conclusiones del caso de estudio .....	274
6.1.2. Conclusiones a las mejoras del caso de estudio .....	277
6.2 Conclusiones generales .....	280
6.3 Discusión final .....	282
6.4 Futuras líneas de investigación .....	284
Capítulo 7. Referencias.....	288
Anejos.....	307

---

## Índice de figuras

---

Figura 1. Esquema general del documento .....	31
Figura 2. Pérdidas de suelo en el territorio mexicano .....	51
Figura 3. Tipos de degradación existente en México .....	52
Figura 4. Procesos de degradación del suelo en diferentes .....	57
Figura 5. Sistema hidrológico conceptual integrado, mostrando parte de una cuenca superficial y un acuífero .....	60
Figura 6. Modelo del ciclo hidrológico simplificado por N-SPECT .....	63
Figura 7. Modelo conceptual de N-SPECT .....	64
Figura 8. Esquema de un acuífero y los elementos conceptuales con los que trabaja MODFLOW .....	67
Figura 9. Sección transversal de un acuífero mostrando los parámetros que intervienen en un modelo de simulación .....	68
Figura 10. Localización de la Península de Baja California en el continente americano.....	72
Figura 11. Imágenes de satélite, mostrando a la izquierda, el territorio correspondiente a la República Mexicana, y a la derecha, la Península de Baja California, situada en la región noroeste de México. Fuente: Comisión Nacional del Agua.....	73
Figura 12. Relieve de Baja California Sur .....	74
Figura 13. Cinturón de desiertos en el planeta .....	75
Figura 14. Zona de estudio y sus principales formaciones serranas, presas y poblaciones relevantes .....	76
Figura 15. Ubicación de las seis cuencas de estudio en el estado de Baja California Sur. ....	78
Figura 16. Localización de las cuencas de estudio .....	80
Figura 17. Vista de satélite de las seis cuencas de estudio.....	81
Figura 18. Vista de la ciudad de La Paz, capital de Baja California Sur y el Mogote .....	82
Figura 19. Arroyo típico en la cuenca El Cajoncito.....	83
Figura 20. Zona de alta montaña en la cuenca de La Paz, Sierra El Novillo. ....	84
Figura 21. Vista de satélite de la Presa La Buena Mujer .....	84
Figura 22. Litología en la Cuenca El Cajoncito .....	87
Figura 23. Litología en la Cuenca La Huerta .....	87
Figura 24. Litología en la Cuenca La Palma.....	88

Figura 25. Litología en la Cuenca El Carrizal .....	88
Figura 26. Litología en la Cuenca Victoria.....	89
Figura 27. Litología en la cuenca El Novillo .....	89
Figura 28. Tipos de suelo en la cuenca El Cajoncito .....	94
Figura 29. Tipos de suelo en la cuenca La Huerta .....	95
Figura 30. Tipos de suelo en la cuenca La Palma .....	95
Figura 31. Tipos de suelo en la cuenca El Carrizal.....	96
Figura 32. Tipos de suelo en la cuenca Victoria .....	96
Figura 33. Tipos de suelo en la cuenca El Novillo .....	97
Figura 34. Localización de los vientos de verano e invierno, y el movimiento de la zona de baja presión de marzo a julio, y batimetría del Golfo de California .....	99
Figura 35. Zonas de formación de ciclones con afección a la República Mexicana .....	100
Figura 36. Imagen de satélite del huracán Odile.....	100
Figura 37. Ubicación de los observatorios meteorológicos en la zona de estudio .....	103
Figura 38. Distribución de usos de suelo en la cuenca El Cajoncito.....	113
Figura 39. Distribución de usos de suelo en la cuenca La Huerta .....	113
Figura 40. Distribución de usos de suelo en la cuenca La Palma .....	114
Figura 41. Distribución de usos de suelo en la cuenca El Carrizal .....	114
Figura 42. Distribución de usos de suelo en la cuenca Victoria .....	115
Figura 43. Distribución de usos de suelo en la cuenca El Novillo .....	115
Figura 44. Panorámica de la zona urbana de la ciudad de La Paz, rodeada por la Ensenada de La Paz .....	117
Figura 45. Municipios de Baja California Sur .....	121
Figura 46. Distribución de la superficie agrícola en el municipio de La Paz.....	126
Figura 47. Regiones hidrológicas de la Península de Baja California .....	130
Figura 48. Foto de la Presa La Buena Mujer .....	131
Figura 49. Mapa de pendientes en la cuenca El Cajoncito.....	132
Figura 50. Mapa de pendientes en la cuenca La Huerta.....	133
Figura 51. Mapa de pendientes en la cuenca La Palma .....	133
Figura 52. Mapa de pendientes en la cuenca El Carrizal .....	134
Figura 53. Mapa de pendientes en la cuenca Victoria .....	134
Figura 54. Mapa de pendientes en la cuenca El Novillo.....	135
Figura 55. Modelo MED de la Cuenca El Cajoncito .....	137
Figura 56. Modelo MED de la Cuenca La Huerta .....	137
Figura 57. Modelo MED de la Cuenca La Palma .....	138
Figura 58. Modelo MED de la Cuenca El Carrizal .....	138
Figura 59. Modelo MED de la Cuenca Victoria .....	139
Figura 60. Modelo MED de la Cuenca El Novillo.....	139
Figura 61. Red de drenaje en la cuenca El Cajoncito .....	140
Figura 62. Red de drenaje en la cuenca La Huerta .....	140

Figura 63. Red de drenaje en la cuenca La Palma .....	141
Figura 64. Red de drenaje en la cuenca El Carrizal .....	141
Figura 65. Red de drenaje en la cuenca Victoria .....	142
Figura 66. Red de drenaje en la cuenca El Novillo.....	142
Figura 67. Mapa de Isoyetas de intensidad de lluvia en Baja California Sur.....	145
Figura 68. Nomograma del factor K.....	161
Figura 69. Distribución del factor K en la cuenca El Cajoncito .....	163
Figura 70. Distribución del factor K en la cuenca La Huerta .....	164
Figura 71. Distribución del factor K en la cuenca La Palma .....	164
Figura 72. Distribución del factor K en la cuenca El Carrizal .....	165
Figura 73. Distribución del factor K en la cuenca Victoria .....	165
Figura 74. Distribución del factor K en la cuenca El Novillo.....	166
Figura 75. Pérdidas de suelo en la cuenca El Cajoncito .....	174
Figura 76. Pérdidas de suelo en la cuenca La Huerta .....	174
Figura 77. Pérdidas de suelo en la cuenca La Palma .....	175
Figura 78. Pérdidas de suelo en la cuenca El Carrizal .....	175
Figura 79. Pérdidas de suelo en la cuenca Victoria .....	176
Figura 80. Pérdidas de suelo en la cuenca El Novillo.....	176
Figura 81. Ordenación bajo criterio USLE de Cuenca El Cajoncito.....	180
Figura 82. Ordenación bajo criterio USLE de Cuenca La Huerta .....	181
Figura 83. Ordenación bajo criterio USLE de Cuenca La Palma .....	181
Figura 84. Ordenación bajo criterio USLE de Cuenca El Carrizal .....	182
Figura 85. Ordenación bajo criterio USLE de Cuenca Victoria .....	182
Figura 86. Ordenación bajo criterio USLE de Cuenca El Novillo.....	183
Figura 87. Zona de cultivo en la Cuenca El Carrizal .....	185
Figura 88. Ventana de trabajo del modelo de Ordenación NSPECT .....	186
Figura 89. Ventana referente a la cobertura de Usos de Suelo .....	187
Figura 90. Datos de suelos utilizados en NSPECT .....	188
Figura 91. Escenario de Proyección de Usos del Suelo Futuro de la zona de estudio según el modelo NSPECT para cuenca El Cajoncito.....	189
Figura 92. Escenario de Proyección de Usos del Suelo Futuro de la zona de estudio según el modelo NSPECT para cuenca La Huerta.....	190
Figura 93. Escenario de Proyección de Usos del Suelo Futuro de la zona de estudio según el modelo NSPECT para cuenca La Palma.....	190
Figura 94. Escenario de Proyección de Usos del Suelo Futuro de la zona de estudio según el modelo NSPECT para cuenca El Carrizal .....	191
Figura 95. Escenario de Proyección de Usos del Suelo Futuro de la zona de estudio según el modelo NSPECT para cuenca Victoria.....	191
Figura 96. Escenario de Proyección de Usos del Suelo Futuro de la zona de estudio según el modelo NSPECT para cuenca El Novillo .....	192

Figura 97. Localización del acuífero de La Paz .....	194
Figura 98. Distribución porcentual usos acuífero La Paz .....	195
Figura 99. Vulnerabilidad en zonas dominadas para la zona de estudio.....	199
Figura 100. Relación de profundidad del nivel estático Vs profundidad del pozo .....	201
Figura 101. Nivel piezométrico del acuífero de La Paz.....	202
Figura 102. Profundidad al nivel estático para el año 2000.....	204
Figura 103. Geometría del Valle de La Paz.....	205
Figura 104. Zonas con mayor descarga por bombeos de aguas .....	206
Figura 105. Modelo de representación de intrusión salina en acuífero La Paz .....	207
Figura 106. Modelo conceptual subterráneo en parte de la zona de estudio .....	208
Figura 107. Distribución de las áreas de recarga potenciales para la zona de estudio en el interior del acuífero La Paz.....	211
Figura 108. Utilización de un gavión en la parte alta de la cuenca de La Palma .....	212
Figura 109. Ordenación bajo criterios Mintegui Aguirre y López para la cuenca El Cajoncito .....	223
Figura 110. Ordenación bajo criterios Mintegui Aguirre y López para la cuenca La Huerta .....	223
Figura 111. Ordenación bajo criterios Mintegui Aguirre y López para la cuenca La Palma.....	224
Figura 112. Ordenación bajo criterios Mintegui Aguirre y López para la cuenca El Carrizal .....	224
Figura 113. Ordenación bajo criterios Mintegui Aguirre y López para la cuenca Victoria .....	225
Figura 114. Ordenación bajo criterios Mintegui Aguirre y López para la cuenca El Novillo .....	225
Figura 115. Esquema de influencia de la aptitud e impacto.....	228
Figura 116. Simulación de la huella urbana en la ciudad de La Paz, año 1986, 2010 y 2030 .....	232
Figura 117. Esquema de trabajo en la metodología MOCAS .....	239
Figura 118. Ordenación final de la propuesta de metodología de Ordenación de cuencas para el árido sudcaliforniano (MOCAS) en cuenca El Cajoncito .....	249
Figura 119. Ordenación final de la propuesta de metodología de Ordenación de cuencas para el árido sudcaliforniano (MOCAS) en cuenca La Huerta .....	250
Figura 120. Ordenación final de la propuesta de metodología de Ordenación de cuencas para el árido sudcaliforniano (MOCAS) en cuenca La Palma .....	251
Figura 121. Ordenación final de la propuesta de metodología de Ordenación de cuencas para el árido sudcaliforniano (MOCAS) en cuenca El Carrizal.....	252
Figura 122. Ordenación final de la propuesta de metodología de Ordenación de cuencas para el árido sudcaliforniano (MOCAS) en cuenca Victoria .....	253
Figura 123. Ordenación final de la propuesta de metodología de Ordenación de cuencas para el árido sudcaliforniano (MOCAS) en cuenca El Novillo .....	254
Figura 124. Comparación entre las metodologías adaptadas .....	264



Figura 125. Tabla ANOVA y presentación de resultados.....	264
Figura 126. Gráfico de rangos para Mintegui Aguirre y López Adaptado y Usle Adaptado .....	265
Figura 127. Gráfico del modelo ajustado 1 .....	266
Figura 128. Gráfico del modelo ajustado 2.....	267
Figura 129. Modelo lineal 1.....	268
Figura 130. Modelo lineal 2.....	269
Figura 131. Modelo lineal 3.....	270
Figura 132. Ubicación de los puntos de muestreo de suelo para la zona de estudio.....	336
Figura 133. Ubicación de pozos en acuífero de estudio.....	342

---

## Índice de tablas

---

Tabla 1. Elementos de control de acuerdo a la posición en la cuenca .....	36
Tabla 2. Factores a considerar en la Ordenación Agro-hidrológica de una cuenca hidrográfica .....	42
Tabla 3. Porcentaje del área nacional mexicana afectada por erosión .....	54
Tabla 4. Grupos hidrológicos de suelo .....	64
Tabla 5. Superficie y tipología de las cuencas de estudio.....	77
Tabla 6. Clasificación litológica según nivel de erosión.....	92
Tabla 7. Observatorios meteorológicos cercanos a la zona de estudio. ....	101
Tabla 8. Clasificación de climas según sistema Thornthwaite.....	104
Tabla 9. Índice de aridez.....	106
Tabla 10. Clasificación de Martonne para el índice de aridez .....	107
Tabla 11. Clasificación bajo el Índice de Fournier Modificado.....	108
Tabla 12. Clasificación del IFM para las estaciones climatológicas relacionadas a la zona de estudio.....	108
Tabla 13. Usos de suelo en la zona de estudio.....	112
Tabla 14. Lotes y superficies de origen ejidal, comunal o de propiedad federal regularizados, por regularizar y superficie promedio por lote en el municipio de La Paz, 1998-2003 .....	119
Tabla 15. Núcleos poblacionales importantes en el municipio de La Paz .....	120
Tabla 16. Distribución porcentual de la población en Baja California Sur.....	121
Tabla 17. Proyecciones de crecimiento de población 2000-2030.....	123
Tabla 18. Población económicamente activa por rama de actividad .....	125
Tabla 19. Coeficiente de Gravelius para cada cuenca de estudio .....	136
Tabla 20. Caudales calculados para cada cuenca de estudio.....	144
Tabla 21. Cálculo del coeficiente de escorrentía .....	146
Tabla 22. Umbral de escorrentía dependiendo el tipo de terreno.....	148
Tabla 23. Clasificación de suelos a efectos del umbral de escorrentía .....	148
Tabla 24. Cálculo de caudales para distintos períodos de retorno en cada cuenca .....	150
Tabla 25. Distribución del Factor R para las estaciones climatológicas de la zona de estudio .....	159
Tabla 26. Código de estructura del suelo.....	162
Tabla 27. Código de permeabilidad del perfil del suelo .....	162
Tabla 28. Coeficiente “m” en la formula LS .....	167
Tabla 29. Valores NDVI para la Clasificación del NDVI de la época seca del año 2008 ...	169
Tabla 30. Factores asignados de C para vegetación de clima árido por el USGS.....	170
Tabla 31. Factores C calculados para la zona de estudio .....	170

Tabla 32. Clasificación Provisional para la Evaluación de la Degradación de los Suelos ...	172
Tabla 33. Superficie de pérdidas de suelo en las cuencas de estudio.....	173
Tabla 34. Ordenación de usos del suelo según el modelo USLE.....	177
Tabla 35. Superficies de los usos de suelo asignados según el modelo USLE a las cuencas de estudio.....	179
Tabla 36. Ordenación del territorio en base al modelo NSPECT para cada cuenca .....	189
Tabla 37. Coordenadas de los vértices del acuífero de La Paz .....	194
Tabla 38. Criterios para la Ordenación agrohidrológica de una cuenca alimentadora.....	219
Tabla 39. Superficies definitivas de los usos asignados según la Ordenación agrohidrológica con criterios de Mintegui Aguirre y López para las cuencas estudiadas.....	222
Tabla 40. Matriz de aptitud de las actividades propuestas .....	240
Tabla 41. Matriz de impacto del medio para realizar actividades propuestas.....	244
Tabla 42. Superficies de adecuación para las actividades propuestas según MOCAS .....	247
Tabla 43. Resumen de superficies de adecuación para las actividades propuestas según distintas Metodologías de Ordenación .....	259
Tabla 44. Equivalencias entre los usos de las tres metodologías de Ordenación estudiadas y los usos de la clasificación común propuesta.....	262
Tabla 45. Superficies representadas por los nuevos usos para la zona de estudio .....	263
Tabla 46. Superficies coincidentes de las cuatro metodologías, expresadas en km <sup>2</sup> y en %, en cada actividad. ....	271
Tabla 47. Datos de suelo para el cálculo del factor K en los 115 puntos de muestreo.....	329
Tabla 48. Pozos en el acuífero La Paz .....	337