Abstract of the thesis presented by Jaqueline Chavira Silva as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Earth Science with orientation in Environmental Geoscience.

Assessment of hydrological changes and wetlands of th e main channel of the Colorado R iver in the l ast 40 years by remote sensing techniques and geographic information systems

Abstract approved by:

Dra. Zayre Ivonne González Acevedo
Thesis Director

Dra. Olga Sarychikhina
Thesis Director

Wetlands are considered one of the most beneficial and threatened ecosystems of the planet. The health of wetlands within a hydrographic basin depends on the quality and quantity of water supplied. The hydrographic basin of the Colorado River is one of the transboundary basins between USA and Mexico where the supply of water is regulated by binational agreements. The construction of hydraulic infrastructure for the control, derivation and storage of the fluxes of the Colorado River, developed in the early twentieth century along the mainstream and its tributaries, caused a dramatic decrease in water supply, especially in the lower basin.

The principal objective of the present work was the evaluation of the changes on superficial hydrology and vegetation of the wetlands along the mainstream of the Colorado River in the past 40 years, using tools and techniques of remote sensing and Geographic Information Systems (GIS), as well as the determination of main contributing factors of such changes.

To achieve the objective, it was made a selection of the zones that presented major wetland´s superficial changes of hydrology and vegetation, along the mainstream of the Colorado River. The identification of that zones depended on visual analysis of infrared false color of Landsat 5 TM images from 1972 to 2011.This analyses resulted on nine study areas. Three of them belongs to the upper basin and the rest to the lower basin of the Colorado River. Two of the zones is located on the Mexican side of the border. The identification and delimitation of water bodies and natural vegetation coverage of wetlands, was made to each zone; as well as, the calculation of their areas through the preprocessing of satellite imagery and GIS tools. The preprocessing was made for images acquired for the MSS and TM sensors of the Landsat satellites (1-5) with time intervals of 5 and 4 years from 1972 to 2011. The technique of histogram segmentation was used for the infrared band and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to delimit water bodies and vegetation coverage of wetlands, respectively. From these data, for each zone was built and analyzed time series, with the purpose to evaluate the temporal changes on the superficial hydrology and vegetation. Besides, was included the time series of the volumetric water flow average, measured in the hydrometric stations along the Colorado River, close to the study zones. The relation between the three analyzed variables was evaluated with the Pearson´s correlation coefficient.

The time series analyses showed that for the total studied zones, six have a decreasing trend of the areas of wetland´s vegetation coverage and three presented decreasing trend on the area of water bodies. The 66 % of the studied zones exhibited, between 1972 and 2011, an important loss of the wetland´s vegetation coverage area and the 33 % had a diminution of water bodies' area. These losses were linked to a different factors both natural (mainly fires), and anthropogenic (including agricultural development, demographic growth among others). The time series of the volumetric water flow average showed a decreasing trend only in one zone, while in other zones showed only irregular variations of different magnitudes and duration. These variations, mainly matched with meteorological events, as rain periods and extraordinary melts or prolonged drought periods. It is important to notice that in the upper basin, the time series' variations of volumetric water flow average related to rain periods and extraordinary melts are comparable in magnitude with prolonged drought periods. However, in the lower basin the matched variations to periods of longed drought are relatively low in magnitude or even absent, which indicates the scarcity of water shortage that has the Colorado River in his lower basin.

The lineal correlation between the analyzed variables, in most cases, despite expected, is very low or absent. The factors, which influenced these results, vary depending the zone and have both, natural and anthropogenic origin. The distance between the zone and the hydrometric station was also an influential factor in the obtained results. The wetland´s vegetation coverage areas, calculated in this work, are comparable with the reported areas by the National Inventories of Wetlands of USA and Mexico. Where the zones located in the upper basin and in the Mexican side of the lower basin have major discrepancies. These dissimilarities are mainly due to the differences between the methodology applied and the limitations of this work.

The management of the basin as a transboundary resource has political, economic and environmental implications. The present work highlights the incorrect management of the hydrographic basin of the Colorado River, by detecting and quantifying the impacts of the wetlands along its mainstream in USA and Mexico in the last 40 years. The present work is one more example of the use of remote sensing techniques and GIS for the detection and quantification of the spatial and temporal changes in wetlands.

Keywords: wetlands, superficial hydrology, Colorado River, remote sensing, Geographic Information Systems, Landsat, false color, NDVI, vegetation.

Dedicatoria

A mis padres Alfredo Chavira y Guadalupe Silva, por todo su cariño y apoyo en mi educación.

A mis hermanos , confidentes y amigos: Evelin y Alfred o, por todo su apoyo, cariño y esa amistad que nunca se terminará .

A mis sobrinos Yoselin, Alexande r, Alexis y Shofis , por ser su Tía favorita XD

A Jorge Andrade, por motivarme a seguir estudiando y por todo su apoyo y consejos a lo largo de mi formación académica y en lo que falta .

A mi hijo Diego Andrade, por acompañarme en este trayecto.

Agradecimientos

A ***mis padres*** por el apoyo y dedicación que me brindaron a lo largo de mi formación académica.

A ***mis hermanos***, por todo el tiempo que compartimos juntos, por los buenos y malos momentos que enfrentamos y que siempre están cuando se necesitan.

A ***Jorge Andrade***, por todo lo que hemos compartido todos estos años y por los que faltan. Gracias por todo el apoyo brindado y por tus palabras de aliento cuando más las necesité.

A mi hijo ***Diego***, por enseñarme a ser madre.

A mis directoras de tesis, ***Dra. Zayre*** y la ***Dra. Olga***, por todo el apoyo que me brindaron, por su paciencia y por compartirme sus conocimientos.

A los demás miembros del comité, el ***Dr. Jorge Torres*** y el ***Dr. Jaime Luévano***, por compartirme sus conocimientos, por brindarme sus valiosas recomendaciones y aclarar mis dudas. Y sobre todo, la disposición.

A ***mis compañeros de generación***, por compartir tareas, trabajos, conocimientos y sobre todo buenos momentos.

A mis compañeras y amigas ***Brenda, Anabel*** y ***Karla***, por todo su apoyo, palabras de aliento y chucherías compartidas en aquellas reuniones.

A mi madrina ***Adina Jordan***, por estar al pendiente de mi, de mi carrera y de su sobrino Diego.

A ***CICESE***, por permitirme pertenecer al posgrado de Ciencias de la Tierra.

Al ***personal del CICESE,*** tanto catedráticos, administrativos y secretarias por su paciencia y apoyo brindado.

A ***CONACYT***, por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español	ii
Resumen en inglés	iv
Dedicatoria	vi
Agradecimientos	vii
Lista de figura	x
Lista de tablas	xix
1. Introducción	
1.1. Justificación	2
1.2. Objetivos	5
2. Marco teórico	
2.1. Definición e importancia de los humedales	6
2.2. Área de estudio	10
2.3. Métodos de estudio de los cambios hidrológicos y de vegetación de los humedales	16
2.4. Percepción remota: conceptos básicos	17
2.4.1 Definiciones básicas	17
2.4.2 Espectro electromagnético	18
2.4.3 Firmas espectrales	19
2.4.4 Generalidades sobre los sensores remotos	23
2.4.5 Resolución de los sensores remotos	23
2.4.6 Imágenes digitales	25
2.4.7 Procesamiento de las imágenes digitales	26
2.4.8 Índices	35
2.4.9 Percepción remota en el estudio de los humedales	40
3. Descripción de datos	
3.1. Datos hidrológicos	47
3.2. Imágenes Landsat	49
4. Métodos	
4.1. Análisis de datos hidrológicos	55
4.2. Análisis de las imágenes Landsat	56
4.2.1 Selección y estadística de las imágenes disponibles para el área de estudio	56
4.2.2 Pre-procesamiento de imágenes Landsat	62
4.2.3. Análisis de imágenes Landsat 5 TM de dos décadas diferentes	63
4.2.4 Análisis de los cambios temporales de hidrología superficial en las zonas de estudio seleccionadas	65
4.2.5 Análisis de los cambios temporales de la cobertura vegetal de los humedales en las zonas de estudio seleccionadas	67
4.3. Análisis de correlación	69

Página

5. Resultados y discusión
5.1. Selección de zonas de estudio..... 71
5.2. Zona 1: Ruby Canyon, Utah, EUA
5.2.1. Descripción de la zona..... 83
5.2.2. Cambios hidrológicos y de vegetación..... 84
5.3. Zona 2: Cisco, Utah, EUA
5.3.1. Descripción de la zona..... 91
5.3.2. Cambios hidrológicos y de vegetación..... 91
5.4. Zona 3: Moab, Utah, EUA
5.4.1. Descripción de la zona..... 98
5.4.2. Cambios hidrológicos y de vegetación..... 98
5.5. Zona 4: Topock Marsh, Arizona, EUA
5.5.1. Descripción de la zona..... 105
5.5.2. Cambios hidrológicos y de vegetación..... 108
5.6. Zona 5: Lost Lake, California, EUA
5.6.1. Descripción de la zona..... 114
5.6.2. Cambios hidrológicos y de vegetación..... 114
5.7. Zona 6: Refugio nacional de vida silvestre Cíbola, Arizona y California, EUA
5.7.1. Descripción de la zona..... 120
5.7.2. Cambios hidrológicos y de vegetación..... 123
5.8. Zona 7: Mittry Lake, Arizona, EUA
5.8.1. Descripción de la zona..... 130
5.8.2. Cambios hidrológicos y de vegetación..... 131
5.9. Zona 8: Tramo limítrofe del río Colorado, EUA-México
5.2.1. Descripción de la zona..... 138
5.2.2. Cambios hidrológicos y de vegetación..... 142
5.10. Zona 9: Río Colorado en México
5.2.1. Descripción de la zona..... 148
5.2.2. Cambios hidrológicos y de vegetación..... 152

6. Discusión general 159

7. Manejo binacional de la cuenca
7.1. Generalidades..... 172
7.2. Cambios hidrológicos..... 176
7.3. Cambios en la vegetación..... 177

8. Conclusiones 179

9. Recomendaciones 181

Lista de referencias bibliográficas 182

Anexos 198

Lista de figuras

Figura		Página
1	Cuenca del río Colorado (Imagen de fondo: World Imagery recuperada de: http://www.arcgis.com/home/item.html?id=10df2279f9684e4a9f6a7f08febac2a9).....	13
2	Ubicación geográfica de las principales presas ubicadas en el cauce principal del río Colorado (Imagen de fondo: World Imagery recuperada de: http://www.arcgis.com/home/item.html?id=10df2279f9684e4a9f6a7f08febac2a9).....	14
3	El espectro electromagnético (EMM) (Imagen tomada de: http://atlasneuquen.uncoma.edu.ar/articulos/?e=18).....	19
4	Firmas espectrales de los diferentes tipos de coberturas de la superficie terrestre y las regiones del EEM correspondientes a las bandas del sensor Landsat TM. (Modificado de: http://www.monografias.com/trabajos82/manejo-envi/manejo-envi2.shtml).....	20
5	Representación esquemática de a) una imagen digital en formato ráster (De http://hosting.soonet.ca/eliris/remotesensing/bl130lec10.html), b) una imagen digital que consta de 3 bandas.....	26
6	Ubicación geográfica de las estaciones hidrométricas. (Imagen de fondo: World Imagery recuperada de: http://www.arcgis.com/home/item.html?id=10df2279f9684e4a9f6a7f08febac2a9).....	48
7	Path/Row que cubren el área de estudio con los sistemas de referencia WRS-1 (color amarillo) y WRS-2 (color azul) (Imagen de fondo: World Imagery recuperada de: http://www.arcgis.com/home/item.html?id=10df2279f9684e4a9f6a7f08febac2a9).....	54
8	Diagrama de flujo del pre-procesamiento realizado a cada una de las imágenes Landsat.....	62
9	Imagen de Landsat 5 TM en falso color infrarrojo (R/G/B 4/3/2). La imagen fue adquirida en junio 1987, y cubre el área correspondiente al Valle de Mexicali, Baja California, México (path/row 38/38).....	65
10	Segmentación del histograma para diferenciar las superficies cubiertas por agua de las superficies con otros tipos de cobertura (Ejemplo: Valle de Mexicali, Landsat 5 TM, para el año de 1987).	67

11 Ubicación geográfica de las zonas de estudio (Imagen de fondo: World Imagery de http://www.arcgis.com/home/item.html?id=10df2279f9684e4a9f6a7f08febac2a9)..... 73

12 Zona 1: Ruby Canyon, Utah, EUA. Imágenes en falso color infrarrojo (RGB 4/3/2, Landsat 5 TM) de décadas diferentes. En esta zona se observa el cambio de uso de suelo al cual los humedales han sido sometidos. En la imagen del año 2009 es posible apreciar la aparición de dos semicírculos de cultivo en la parte central de la zona, mientras que la vegetación restante disminuyó en un gran porcentaje hasta casi desaparecer. El recuadro amarillo marca la ubicación de un cuerpo de agua presente en la imagen del año 2009 y ausente en 1986..... 74

13 Zona 2: Cisco, Utah, EUA. Imágenes en falso color infrarrojo (RGB 4/3/2, Landsat 5 TM) de décadas diferentes. En esta zona las pérdidas de vegetación de los humedales pueden ser apreciadas, sobre todo en el sur. También se observa el cambio de uso de terreno con aparición de campos de cultivo en la parte norte de la zona en la imagen del año 2009..... 75

14 Zona 3: Moab, Utah, EUA. Imágenes en falso color infrarrojo (RGB 4/3/2, Landsat 5 TM) de décadas diferentes. La pérdida de vegetación del humedal es notable, sobre todo en su parte central. También se aprecia la reducción del área de algunos cuerpos de agua. El cauce principal del río se ve más angosto en la imagen del año 2009 y se observa la aparición de pequeñas islas fluviales..... 76

15 Zona 4: Topock Marsh, Arizona EUA. Imágenes en falso color infrarrojo (RGB 4/3/2, Landsat 5 TM) de décadas diferentes. Se observa una drástica reducción del cuerpo de agua correspondiente al Lago Goose. La vegetación de los humedales se ve muy afectada, lo que se refleja en la mayor presencia de suelos desnudos en la imagen del año 2009 en el área de los humedales..... 77

16 Zona 5: Lost Lake, Riverside, EUA. Imágenes en falso color infrarrojo (RGB 4/3/2, Landsat 5 TM) de décadas diferentes. Este humedal ha perdido la mayor parte de su vegetación, se observa la pérdida de algunos cuerpos de agua o la reducción de su área. 78

17 Zona 6: Refugio nacional de vida silvestre Cíbola, Arizona y California, EUA. Imágenes en falso color infrarrojo (RGB 4/3/2, Landsat 5 TM) de décadas diferentes. Esta zona presentó grandes cambios. En la imagen del año 2009, el refugio se ve dividido en dos partes: sur y norte, donde la parte norte se destaca por la ausencia de vegetación y una importante

reducción del área de las superficies cubiertas por agua..... 79

18 Zona 7: Mittry Lake, Arizona EUA. Imágenes en falso color infrarrojo (RGB 4/3/2, Landsat 5 TM) de décadas diferentes. Se observan importantes cambios en vegetación del humedal de la zona, así como desaparición o reducción de área de los cuerpos de agua..... 80

19 Zona 8: Tramo limítrofe del río Colorado EUA-México. Imágenes en falso color infrarrojo (RGB 4/3/2, Landsat 5 TM) de décadas diferentes. México y EUA tienen como frontera el cauce principal del río Colorado, esta zona presenta grandes cambios en la vegetación, así como en el ancho del cauce. En la imagen del año 2009 el cauce del río no se distingue, es decir, el agua que llega al sur de la zona es escasa. La vegetación natural a lo largo del cauce principal del rio se ve muy reducida, casi inexistentes.... 81

20 Zona 9: Río Colorado en México. Imágenes en falso color infrarrojo (RGB 4/3/2, Landsat 5 TM) de décadas diferentes. Esta zona es el curso bajo del río donde este finaliza desembocando en el Golfo de California. En la imagen del 2009 se observa que las aguas del río practicamente no llegan a esta parte del curso, provocando que el río quede casi seco, hecho que afecta a la vegetación de los humedales. También se aprecia el crecimiento de un húmedal artificial al sureste de la región que se identifica como la Ciénaga de Santa Clara y que no es el objeto de este trabajo de tesis..... 82

21 Zona 1: Ruby Canyon, Utah, EUA. Identificación de los cuerpos de agua para los años de 1972 (a) y 2011 (b). Las imágenes de fondo son en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 1 MSS y RGB 4/3/2 Landsat 5 TM en a y b, respectivamente..... 88

22 Zona 1: Ruby Canyon, Utah, EUA. Imagen de NDVI para el año 1972 (a) y 2011 (b). Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas..... 89

23 Zona 1: Ruby Canyon, Utah, EUA. Series de tiempo del área de los cuerpos de agua (a), del área de la cubierta vegetal de los humedales (b) y del flujo volumétrico promedio anual (c). Las líneas rojas representan el promedio para cada una de las variables. Las franjas en tono anaranjado claro simbolizan las temporadas de sequía (de https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/drought/; Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA, por sus siglas en inglés), Centro Nacional de Información Ambiental (National Centers for Enviromental Information, en inglés))..... 90

24 Zona 2: Cisco, Utah, EUA. Identificación de los cuerpos de agua para los años de 1972 (a) y 2011 (b). Las imágenes de fondo son en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 1 MSS y RGB 4/3/2 Landsat 5 TM en a y b, respectivamente..... 95

25 Zona 2: Cisco, Utah, EUA. Imagen de NDVI para el año 1972 (a) y 2011 (b). Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas..... 96

26 Zona 2: Cisco, Utah, EUA. Series de tiempo del área de los cuerpos de agua (a). Las líneas rojas continua y discontinua muestran el promedio de las áreas tomando en cuenta el año 1977 (i) y sin tomar en cuenta el año de 1977 (ii), respectivamente. Área de la cubierta vegetal de los humedales (b). La recta verde representa el ajuste por regresión lineal de los datos. La ecuación de la recta y el coeficiente de determinación del ajuste, R^2, se presentan en la gráfica. Flujo volumétrico promedio anual (c). La línea roja representa el promedio del flujo volumétrico anual en el periodo analizado. Las franjas en tono anaranjado claro que se muestran en cada una de las gráficas significan las temporadas de sequía (de https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/drought/; Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA, por sus siglas en inglés), Centro Nacional de Información Ambiental (National Centers for Enviromental Information, en inglés))..... 97

27 Zona 3: Moab, Utah, EUA. Identificación de los cuerpos de agua para los años de 1972 (a) y 2011 (b). Las imágenes de fondo son en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 1 MSS y RGB 4/3/2 Landsat 5 TM en a y b, respectivamente..... 102

28 Zona 3: Moab, Utah, EUA. Imagen de NDVI para el año 1972 (a) y 2011 (b). Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas..... 103

29 Zona 3: Moab, Utah, EUA. Series de tiempo del área de los cuerpos de agua (a), del área de la cubierta vegetal de los humedales (b) y del flujo volumétrico promedio anual (c). La línea roja representa el promedio de los datos en el periodo analizado en (a) y (c). La recta verde representa el ajuste por regresión lineal de los datos en (b). La ecuación de la recta y el coeficiente de determinación del ajuste, R^2, se presentan en la gráfica. Las franjas en tono anaranjado claro que se muestran en cada una de las gráficas significan las temporadas de sequía (de https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/drought/; Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA, por sus siglas en inglés), Centro Nacional de Información Ambiental (National Centers for

Enviromental Information, en inglés)) 104

30 Topock Marsh, Arizona, EUA. En color azul se presentan los canales de derivación que desvían el agua del río Colorado hacia Topock Marsh. En color verde agua, se presenta la línea de costa de Topock Marsh y en color verde se aprecia la vegetación de los humedales. En el recuadro rojo se localiza el Dique Sur que regula los niveles de agua del embalse y en el recuadro amarillo se encuentra el sitio de restauración Beal Lake (imagen de USGS Orthophotoquads, 1992) (Guay, 2001) 107

31 Zona 4: Topock Marsh, Arizona, EUA. Identificación de los cuerpos de agua para los años de 1972 (a) y 2011 (b). Las imágenes de fondo son en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 1 MSS y RGB 4/3/2 Landsat 5 TM en a y b, respectivamente 111

32 Zona 4: Topock Marsh, Arizona, EUA. Imagen de NDVI para el año 1972 (a) y 2011 (b). Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas 112

33 Zona 4: Topock Marsh, Arizona, EUA. Series de tiempo del área de los cuerpos de agua (a), del área de la cubierta vegetal de los humedales (b) y del flujo volumétrico promedio anual (c). La recta verde representa el ajuste por regresión lineal de los datos en (a), excluyendo el año 1987 (símbolo sin relleno), y (b), donde el ajuste se realizó para el periodo 1982-2011. La ecuación de la recta y el coeficiente de determinación del ajuste, R^2, se presentan en las gráficas. La línea roja representa el promedio de los datos en el periodo analizado en (c). Las franjas en tono anaranjado claro que se muestran en cada una de las gráficas significan las temporadas de sequía (de https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/drought/; Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA, por sus siglas en inglés), Centro Nacional de Información Ambiental (National Centers for Enviromental Information, en inglés)) 113

34 Zona 5: Lost Lake, California, EUA. Lost Lake, California, EUA. Identificación de los cuerpos de agua para los años de 1972 (a) y 2011 (b). Las imágenes de fondo son en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 1 MSS y RGB 4/3/2 Landsat 5 TM en a y b, respectivamente 117

35 Zona 5: Lost Lake, California, EUA. Imagen de NDVI para el año 1972 (a) y 2011 (b). Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas 118

36 Zona 5: Lost Lake, California, EUA. Series de tiempo del área de los cuerpos de agua (a), del área de la cubierta vegetal de los

humedales (b) y del flujo volumétrico promedio anual (c). La recta verde representa el ajuste por regresión lineal de los datos en (a). La ecuación de la recta y el coeficiente de determinación del ajuste, R^2, se presentan en la gráfica. La línea roja representa el promedio de los datos en el periodo analizado en (b) y (c). Las franjas en tono anaranjado claro que se muestran en cada una de las gráficas significan las temporadas de sequía (de https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/drought/; Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA, por sus siglas en inglés), Centro Nacional de Información Ambiental (National Centers for Enviromental Information, en inglés))..... 119

37 Zona 6: Refugio nacional de vida silvestre Cíbola, Arizona y California, EUA. Se muestra el canal histórico del río Colorado y la canalización del mismo, la zona de restauración Hart Mine Marsh y un cuerpo de agua artificial..... 121

38 Zona de restauración Hart Mine Marsh en Cíbola NWR. Imagen tomada de: http://www.lcrmscp.gov/images/res_sites/hart_mine_marsh/hart_mine_acreage_map_lg.jpg..... 122

39 Zona 6: Refugio nacional de vida silvestre Cíbola, Arizona y California, EUA. Identificación de los cuerpos de agua para los años de 1972 (a) y 2011 (b). Las imágenes de fondo son en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 1 MSS y RGB 4/3/2 Landsat 5 TM en a y b, respectivamente..... 126

40 Zona 6: Refugio nacional de vida silvestre Cíbola, Arizona y California, EUA. Imagen de NDVI para el año 1972 (a) y 2011 (b). Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas..... 127

41 Zona 6: Refugio nacional de vida silvestre Cíbola, Arizona y California, EUA. Imagen de NDVI para el año 2007. Se puede observar la pérdida de vegetación en la zona debido a los incendios registrados..... 128

42 Zona 6: Refugio nacional de vida silvestre Cíbola, Arizona y California, EUA. Series de tiempo del área de los cuerpos de agua (a), del área de la cubierta vegetal de los humedales (b) y del flujo volumétrico promedio anual (c). La línea roja representa el promedio de los datos en el periodo 1987-2011 y 1972-2011 en (a) y (c), respectivamente. Las franjas en tono anaranjado claro que se muestran en cada una de las gráficas significan las temporadas de sequía (de https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/drought/; Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (Nationa l Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA, por sus siglas en inglés),

Centro Nacional de Información Ambiental (National Centers for Enviromental Information, en inglés))..... 129

43 a) Mittry Lake Wildlife Area (polígono en rojo). Imagen tomada de: http://aziba.org/wordpress/wp-content/uploads/2011/12/Mittry-Lake-State-Wildlife-Area-IBA-GIS-Map_compressed1.jpg y b) el área de restauración Laguna Division (polígono en amarillo). Imagen tomada de: http://www.lcrmscp.gov/conservation/laguna.html..... 130

44 Zona 7: Mittry Lake, Arizona, EUA. Identificación de los cuerpos de agua para los años de 1972 (a) y 2011 (b). Las imágenes de fondo son en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 1 MSS y RGB 4/3/2 Landsat 5 TM en a y b, respectivamente..... 135

Zona 7: Mittry Lake, Arizona, EUA. Imagen de NDVI para el año 1972 (a) y 2011 (b). Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas..... 136

46 Zona 7: Mittry Lake, Arizona, EUA. Series de tiempo del área de los cuerpos de agua (a), del área de la cubierta vegetal de los humedales (b) y del flujo volumétrico promedio anual (c). La recta verde representa el ajuste por regresión lineal de los datos en (a) y (b). En (a) se realizó el ajuste por regresión lineal de dos periodos: 1972-1982 (A.) y 1987-2011 (B.). En (b) se realizó el ajuste por regresión lineal del periodo 1972-2002. La ecuación de la recta y el coeficiente de determinación del ajuste, R^2, se presentan en las gráficas. La línea roja representa el promedio de los datos en el periodo analizado en (c). Las franjas en tono anaranjado claro que se muestran en cada una de las gráficas significan las temporadas de sequía (de https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/drought/; Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA, por sus siglas en inglés), Centro Nacional de Información Ambiental (National Centers for Enviromental Information, en inglés))..... 137

47 Figura 48. Presa Morelos, la última presa en el río Colorado. Imagen tomada de: FaceBook: Save the Colorado River Delta (https://www.facebook.com/savethecoloradoriverdelta?fref=ts)..... 139

48 "Secure Fence Act", 2006. En color rojo se muestran los lugares para la colocación de un muro en la frontera de México y Estados Unidos. Imagen tomada de Kelly, 2007..... 140

49 Ubicación de la zona de restauración Hunters Hole. Imagen tomada de: http://www.lcrmscp.gov/conservation/hunters_hole.html. 141

50 Zona 8: Tramo limítrofe del río Colorado, EUA-México.

Identificación de los cuerpos de agua para los años de 1972 (a) y 2011 (b). Las imágenes de fondo son en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 1 MSS y RGB 4/3/2 Landsat 5 TM en a y b, respectivamente..... 145

51 Zona 8: Tramo limítrofe del río Colorado, EUA-México. Imagen de NDVI para el año 1972 (a) y 2011 (b). Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas..... 146

52 Zona 8: Tramo limítrofe del río Colorado, EUA-México. Series de tiempo del área de los cuerpos de agua (a), del área de la cubierta vegetal de los humedales (b) y del flujo volumétrico promedio anual (c). La línea roja representa el promedio de los datos en el periodo 1992-2011 y 1972-2011 en (a) y (b), respectivamente. La recta verde representa el ajuste por regresión lineal de los datos en (c), excluyendo los años 1987 y 1992 (símbolos sin relleno). La ecuación de la recta y el coeficiente de determinación del ajuste, R^2, se presentan en la gráfica. Las franjas en tono anaranjado claro que se muestran en cada una de las gráficas significan las temporadas de sequía (de https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/drought/; Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA, por sus siglas en inglés), Centro Nacional de Información Ambiental (National Centers for Enviromental Information, en inglés))..... 147

53 a) Ubicación geográfica del dique conocido como "El Tapón" y b) Imagen de "El Tapón", tomada de Google Earth el 1 de abril de 2015..... 150

54 Figura 53. a) Zona de restauración "Laguna Grande" formada por 3 polígonos de terrenos concesionados: CILA (109 ha), Laguna Grande (275 ha) y Laguna Cori (101 ha). Imagen tomada de: http://www.sonoraninstitute.org/component/docman/doc_view/1558-.html. b) Sitio CILA en el área de restauración "Laguna Grande". Foto: Francisco Zamora (2015)..... 151

55 Zona 9: Río Colorado en México. Identificación de los cuerpos de agua para los años de 1972 (a) y 2011 (b). Las imágenes de fondo son en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 1 MSS y RGB 4/3/2 Landsat 5 TM en a y b, respectivamente..... 156

56 Zona 9: Río Colorado en México. Imagen de NDVI para el año 1972 (a) y 2011 (b). Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas..... 157

57 Zona 9: Río Colorado en México. Series de tiempo del área de los cuerpos de agua (a), del área de la cubierta vegetal de los humedales (b) y del flujo volumétrico promedio anual (c). La línea roja representa el promedio de los datos en el periodo analizado

en (a).). La recta verde representa el ajuste por regresión lineal de los datos en (b), donde el ajuste se realizó para el periodo 1987-2011, y (c), donde se excluyeron los datos de los años 1987 y 1997 (símbolos sin relleno). La ecuación de la recta y el coeficiente de determinación del ajuste, R^2, se presentan en las gráficas. Las franjas en tono anaranjado claro que se muestran en cada una de las gráficas significan las temporadas de sequía (de https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/drought/; Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA, por sus siglas en inglés), Centro Nacional de Información Ambiental (National Centers for Enviromental Information, en inglés))..... 158

58 Mapa de comparación de las áreas clasificadas como humedales por parte de INEGI y CONAGUA, con el área obtenida en el presente trabajo..... 171

59 Humedales del río Colorado en México que son considerados sitios Ramsar..... 173

60 Ubicación geográfica del Canal Todo Americano (delineado en color azul con puntos negros), el revestimiento de este canal evita la infiltración de agua hacía territorio mexicano. Imagen tomada de: http://fishingnetwork.net/socal/allamermap.htm..... 174

Lista de tablas

Tabla		Página
1	Funciones ecosistémicas de los humedales y los bienes y servicios que proveen a la sociedad (Modificado de Kandus et al., 2009).....	8
2	Principales presas en el cauce principal del río Colorado y sus funciones.....	15
3	Grupos de cobertura terrestre de acuerdo a su respuesta o comportamiento espectral (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable Ministerio de Salud y Ambiente, 2004).....	22
4	Descripción de las modalidades de resolución de u sensor.....	24
5	Características de los satélites que conforman la constelación Landsat.....	50
6	Path/Row para WRS-1 y 2 que cubren el área de estudio.....	53
7	Imágenes Landsat 5 TM seleccionadas para realizar la comparación visual de dos décadas diferentes.....	59
8	Imágenes de Landsat 1 – 3 MSS y Landsat 5 TM adquiridas en los años de 1972 al 2011 para realizar el análisis de cambios en hidrología superficial y cobertura vegetal en las zonas seleccionadas.....	60
9	Coeficiente de Pearson de acuerdo con la asociación lineal entre los datos de flujo volumétrico promedio anual, área de cuerpos de agua y área de vegetación de la zona 1.....	86
10	Coeficiente de Pearson de acuerdo con la asociación lineal entre los datos de flujo volumétrico promedio anual, área de cuerpos de agua y área de vegetación de la zona 2.....	93
11	Coeficiente de Pearson de acuerdo con la asociación lineal entre los datos de flujo volumétrico promedio anual, área de cuerpos de agua y área de vegetación de la zona 3.....	101
12	Coeficiente de Pearson de acuerdo con la asociación lineal entre los datos de flujo volumétrico promedio anual, área de cuerpos de agua y área de vegetación de la zona 4.....	110
13	Coeficiente de Pearson de acuerdo con la asociación lineal entre los datos de flujo volumétrico promedio anual, área de cuerpos de agua y área de vegetación de la zona 5.....	116

14 Coeficiente de Pearson de acuerdo con la asociación lineal entre los datos de flujo volumétrico promedio anual, área de cuerpos de agua y área de vegetación de la zona 6..... 125

15 Coeficiente de Pearson de acuerdo con la asociación lineal entre los datos de flujo volumétrico promedio anual, área de cuerpos de agua y área de vegetación de la zona 7..... 134

16 Coeficiente de Pearson de acuerdo con la asociación lineal entre los datos de flujo volumétrico promedio anual, área de cuerpos de agua y área de vegetación de la zona 8..... 144

17 Coeficiente de Pearson de acuerdo con la asociación lineal entre los datos de flujo volumétrico promedio anual, área de cuerpos de agua y área de vegetación de la zona 9..... 154

18 Correlación lineal entre el área de cuerpos de agua, el área de cubierta vegetal vegetación y el flujo volumétrico promedio anual de las zonas 1, 2 y 3 en los 40 años (1972–2011) analizados..... 163

19 Correlación lineal entre el área de cuerpos de agua, el área de cubierta vegetal y el flujo volumétrico promedio anual de las zonas 4, 5 y 6 en los 40 años (1972–2011) analizados..... 167

20 Correlación de las áreas de cuerpos de agua, el área de cubierta vegetal y el flujo volumétrico promedio anual de las zonas 7, 8 y 9 en los 40 años (1972–2011) analizados..... 167

21 Área de los humedales del presente trabajo y del INH que se reporta en EUA y en México..... 170

1. Introducción

1.1. Justificación

Los humedales son considerados uno de los ecosistemas más importantes del planeta (Mitsch y Gosselink, 2000) por el papel que juegan en el ciclo hidrológico y/o en el ciclo del carbono, además de sustentar la diversidad ecológica y cultural. A pesar de su importancia, este tipo de ecosistemas figuran entre los más amenazados del mundo. La pérdida y degradación de los humedales ocasiona la disminución de los servicios ambientales que ofrecen, como la filtración del agua, trampas de sedimento, control de inundaciones y erosión, transformación de materia orgánica, además de la captura de carbono (Hernández, 2012).

Los principales generadores indirectos de degradación y desaparición de los humedales han sido el aumento de la población y el creciente desarrollo económico. Mientras que el desarrollo de infraestructuras (carreteras, embalses, canales de riego elaborados con concreto, etc.), los cambios de uso de suelo, la sobrexplotación del agua subterránea, la eutrofización y la contaminación del agua, y la introducción de especies exóticas (animales o vegetales) son los principales generadores directos de degradación y desaparición de los humedales (Pérez-Ortega, 2011). Además los ríos o arroyos que le dan vida a este tipo de ecosistemas han sufrido modificaciones en su hidrología, ocasionando que el agua no llegue a las zonas de humedales y que estos lleguen a perderse totalmente (Ayala-Carcedo, 2002 y Hernández, 2012).

Además, en la última década, los humedales están siendo afectados por el cambio climático. La extensión, la distribución y las funciones de los humedales están cambiando en respuesta a las modificaciones en los patrones de distribución de las precipitaciones (Secretaría de la Convención de Ramsar, 1999, 2006, 2013; Millennium Ecosystem Assessment, 2005 y Fernández, 2010).

Estimaciones recientes, más del 50 % de los humedales de Norte América, Europa, Asia, Australia y Nueva Zelanda fueron destruidos durante el siglo XX (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

En 1971 fue creada la Convención Ramsar, que tiene como finalidad la conservación y el uso racional de los humedales, reconociendo que son ecosistemas extremadamente importantes para la conservación de la biodiversidad y el bienestar de las comunidades humanas. México es uno de los países que cuenta con el mayor número de humedales en el mundo, con una cifra de 6,464 humedales, que cubren más del 4 % (~8.6 millones ha) de la superficie del territorio nacional. En la actualidad, México es el segundo país en el mundo con el mayor número de humedales designados como sitios Ramsar (humedales de importancia internacional), con 142 humedales que cuentan con una superficie total de más de 8 millones de ha, mientras que Estados Unidos de América (EUA) cuenta con 37 sitios (Ramsar, 2014 y CONANP, S.F.).

En México aproximadamente 1 millón de ha de humedales han sido deterioradas, modificadas o se han perdido (Cervantes, 2007; Landgrave y Moreno-Casasola, 2012). Particularmente en los estados de Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Baja California, Sonora y Tabasco, se ha perdido al menos el 50 % de éstos ecosistemas (Landgrave y Moreno-Casasola, 2012).

Por todo lo antes mencionado, es de suma importancia disminuir la degradación y pérdida de los humedales y es preciso adoptar medidas para conservar sus recursos y utilizarlos racionalmente. El “uso racional” de los humedales está definido como: “El uso de un humedal por los seres humanos de modo que produzca el mayor beneficio continuo para las generaciones presentes, manteniendo al mismo tiempo su potencial *para satisfacer las necesidades y aspiraciones de las generaciones futuras”* (Secretaría de la Convención de Ramsar, 2013). Para la conservación y el uso racional de los humedales es fundamental la elaboración de programas de inventario, monitoreo, investigación, capacitación, educación y concienciación del público sobre la importancia de estos ecosistemas.

En el presente trabajo se propone una metodología para la detección de cambios ocurridos en los humedales a lo largo del cauce principal del río Colorado, utilizando técnicas de percepción remota en imágenes satelitales Landsat.

La cuenca hidrográfica del río Colorado es una de las cuencas transfronterizas entre EUA y México, y representa un importante recurso hídrico compartido entre estos dos países. Cuenta con una superficie superior a los 630,000 km^2, de los cuales aproximadamente el 0.60 % se encuentra en territorio mexicano (López, 2008; CONAGUA, 2012). El manejo y gestión de la cuenca como recurso transfronterizo tiene implicaciones políticas, económicas y ambientales.

Los humedales presentes dentro de la cuenca hidrográfica del río Colorado son sistemas internacionales ya que forman parte de la cuenca hidrográfica que incluye a más de un país. La salud de estos humedales depende de la calidad y la cantidad de agua transfronteriza suministrada por ríos y otros cursos de agua, lagos o acuíferos subterráneos. Los cambios hidrológicos, a causa de la retención del agua en las presas y el crecimiento en el desarrollo agrícola y urbano en ambos países implica una gran demanda por el agua dulce, lo cual ha provocado la pérdida de los humedales presentes dentro de la cuenca hidrográfica y a lo largo del cauce del río Colorado. Las consecuencias de esta pérdida se reflejan en los cambios en el ecosistema en ambos lados de la frontera. Dichos cambios son más evidentes en el lado mexicano donde se han reportado cambios drásticos (Glenn, Lee, Felger y Zengel, 1996 y Cotler, Garrido, Bunge y Cuevas, 2010).

Para prevenir y mitigar la degradación de éstos humedales se considera importante crear planes de manejo adecuados de la cuenca hidrográfica del río Colorado. Para eso, el inventario de humedales que existe dentro de la cuenca hidrográfica del río Colorado, y el estudio de los cambios temporales y espaciales que estos humedales han sufrido a lo largo del tiempo, son de fundamental importancia. El desarrollo de estos estudios requiere de información sinóptica y espacialmente referenciada, para lo cual la percepción remota representa varias ventajas por su capacidad para colectar, estructurar y analizar información espacial relevante en diferentes intervalos de tiempo y espacio (Mumby y Edwards, 2000).

Este y otros estudios, ya realizados y futuros, pueden servir como plataforma para crear un plan de manejo integral de la cuenca del río Colorado en el contexto nacional y binacional.

1.2. Objetivos

Objetivo general

Evaluar las modificaciones hidrológicas superficiales y los cambios en la vegetación de los humedales del cauce principal del río Colorado, mediante el procesamiento y análisis de imágenes satelitales de los últimos cuarenta años, usando herramientas de percepción remota y Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Objetivos específico s

- ✓ Identificar las zonas de estudio con mayores cambios hidrológicos y de cobertura vegetal de los humedales a partir de la comparación de dos imágenes en décadas diferentes.
- ✓ Para cada zona, determinar los cambios hidrológicos a partir del análisis multitemporal de las imágenes Landsat MSS y TM, usando la banda 7 y banda 5, respectivamente.
- ✓ Comparar los resultados de los cambios hidrológicos con datos de flujo volumétrico.
- ✓ Para cada zona, calcular el índice de vegetación (NDVI) a partir de las imágenes Landsat MSS yTM.
- ✓ Contrastar los cambios en la vegetación con datos de flujo volumétrico.
- ✓ Contrastar los cambios en la vegetación con los cambios en la hidrología superficial.
- ✓ Comparar el manejo de la cuenca en un contexto binacional.

2. Marco teórico

2.1. Definición e importancia de los humedales

El término humedal, se originó y empleó por primera vez a mediados de la década de los 50´s por la agencia norteamericana US Fish and Wildlife Service, para referirse a los "ambientes" donde habitan aves acuáticas (Berlanga-Robles y Ruiz-Luna, 2004). Existen muchas definiciones del término humedal, algunas basadas en criterios principalmente ecológicos y otras más orientadas a cuestiones vinculadas a su manejo.

Según la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971) la palabra "humedales" se define como sigue: "Las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros". En otras palabras, los humedales son ambientes de transición entre hábitats terrestres y acuáticos con características particulares. Según Mitsch y Gosselink (2000), los humedales naturales deben tener uno o más de los siguientes atributos:

- ✓ El suelo o sustrato debe ser fundamentalmente un suelo hidromórfico, no drenado; es decir, debe estar saturado de agua de manera temporal o permanente.
- ✓ Debe presentar una lámina o capa de agua poco profunda o agua subterránea próxima a la superficie del terreno, ya sea permanente o temporal.
- ✓ Al menos periódicamente, el terreno debe mantener de manera predominante una vegetación acuática.

La importancia de los humedales ha variado con el tiempo. Hasta hace algunas décadas, los humedales eran considerados tierras inútiles, lugares inhóspitos, peligrosos, sin ningún valor económico, provocando el mal manejo y el abuso de estos ecosistemas. El progreso del conocimiento científico ha revelado su gran importancia económica, biológica, geoquímica, ambiental y cultural (Saleh, 2012).

Los humedales se encuentran entre los ecosistemas más beneficiosos del mundo y se caracterizan por una importante diversidad biológica. Este tipo de ecosistemas constituyen un hábitat para una amplia gama de especies vegetales y animales, las cuales, en muchos casos, se encuentran amenazadas (Salinas, Treviño, Jaramillo y Campos, 2002). También funcionan como áreas de refugio de muchas especies de aves migratorias y son también importantes depósitos de material genético vegetal (Lozano-Pontón, Brausin-Pulido y Rodríguez-Gaviria, 2013).

Además de desempeñarse como un hábitat de numerosas especies de animales y plantas, los humedales proporcionan a la sociedad numerosos bienes y servicios que dependen del mantenimiento de las funciones ecosistémicas de los mismos. Estas funciones dependen de aspectos de la biodiversidad y de los procesos que ocurren en los humedales. En la tabla 1 se describen las funciones ecosistémicas que cumplen los humedales, así como los bienes y servicios que proveen.

Sin embargo, conociendo los bienes y servicios ecosistémicos que proporcionan los humedales a la sociedad, éstos son degradados constantemente e incluso se consideran entre los ecosistemas más amenazados en el mundo (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

Ante la pérdida y disminución de estos ecosistemas, se considera importante que sean monitoreados. Tradicionalmente los humedales son mapeados a través de estudios en campo. Estos estudios son costosos y consumen tiempo (Lyon y McCarthy, 1995). Las técnicas de percepción remota ofrecen ser una alternativa más económica al reemplazar los estudios de campo, reduciendo además el tiempo empleado (Torres, 1994).

Tabla 1. Funciones ecosistémicas de los humedales y los bienes y servicios que proveen a la sociedad (Modificado de Kandus et al., 2009).

Funciones ecosistémicas	Bienes y servicios
Retención de agua	Presencia de reservorios para el uso doméstico, agrícola, ganadero e industrial.
Regulación de inundaciones	La vegetación de los humedales proporciona una barrera natural al movimiento rápido del agua, causando la desaceleración de los flujos. En zonas costeras, los humedales disminuyen la energía de las olas y de las corrientes lo que permite la estabilización de la línea costera.
Control de erosión	Las raíces de la vegetación impiden que los vientos se lleven las arenas y las tierras del lugar. En zonas costeras, los humedales ayudan a la reducción de la erosión costera derivada de la acción fluvial o mareal.
Control de sedimentos	Retención de sedimentos por la disminución de la velocidad del agua y por la vegetación del humedal.
Recarga de acuíferos	Reservas de agua dulce para consumo directo del hombre y utilización en sus actividades productivas.
Ciclado de nutrientes	Retención de nutrientes, mejoramiento de la calidad del agua, acumulación de Carbono Orgánico y regulación climática (emisiones de metano).
Mantenimiento de la productividad de los suelos	Se da como resultado de la alta productividad, la trasformación y exportación de carbono, y la retención y trasformación de nutrientes.
Transformación y degradación de contaminantes	Las plantas y los sustratos de los humedales tienen la capacidad de retener y transformar nutrientes y sustancias tóxicas, que en conjunto con la función de retención de sedimentos proporcionan el servicio de tratamiento de aguas residuales.

Regulación de procesos de evapotranspiración	Como resultado de los altos niveles de humedad y de evapotranspiración, los humedales pueden tener una influencia considerable sobre el clima local y, eventualmente regional, según sea su tamaño. Esta función de los humedales reduce la ocurrencia de eventos climáticos extremos y mantiene un clima favorable (temperatura, precipitación, etc.) que permite el desarrollo de numerosas actividades, principalmente, las productivas.
Producción primaria y secundaria	Provisión de alimentos, materiales para construcción y manufacturas, combustibles y energía, fertilizantes, recursos medicinales y ornamentales, etc.
Provisión de hábitat	Para diferentes usos y actividades (agricultura, forestación, ganadería, pesca, turismo, recreación, etc.), provisión de hábitats críticos para especies migratorias y reproducción de especies animales.
Interés social	Pueden representar ciertos valores para las comunidades locales, como el estético, el religioso, el histórico o el arqueológico, y también pueden ser sitios de importancia para la investigación o lugares adecuados para actividades educativas.

2.2. Área de estudio

El río Colorado es un afluente que cruza el suroeste de los EUA y noroeste de México (Figura 1), es uno de tres ríos compartidos entre EUA y México. Desde su nacimiento en las Montañas Rocallosas en el estado de Colorado (EUA), el río recorre más de 2,300 km, desde una elevación de 4,200 m, siguiendo en dirección suroeste, por los estados de Colorado, Utah, Nevada, Arizona y California en EUA. Los últimos 140 km, el río Colorado pasa por los estados de Baja California y Sonora en México, donde forma el Delta del río Colorado y desemboca en el Alto Golfo de California.

La cuenca binacional del río Colorado cubre una superficie total de aproximadamente 637,000 km^2 (Figura 1); principalmente en siete estados de EUA (Wyoming, Utah, Colorado, Nuevo México, Arizona, Nevada y California), y en México, en los estados de Baja California y Sonora con una superficie de 3,840 km^2. Históricamente, desde 1922, por criterios operativos, la cuenca del río Colorado se ha dividido en la llamada “Cuenca Alta” y la “Cuenca Baja” (Figura 1). En donde, alrededor del 72 % del volumen de agua disponible en la cuenca es captado en las zonas de gran elevación ($>$ 2,400 m) en la cuenca alta, en un área que cubre tan sólo el 10 % de la superficie total de la cuenca del río Colorado (Cohen, 2011). El volumen de agua acarreado anualmente por el río Colorado varía entre 16,000 y 18,500 millones de m^3, sin embargo, el 70 % del volumen anual fluye en la temporada de deshielo (mayo a julio) (Cohen, Henges-Jeck y Castillo-Moreno, 2001).

La cuenca del río Colorado contiene una variedad de zonas climáticas que van desde las características alpinas hasta las zonas desérticas (González-Casillas, 1991), con una gran diversidad espacial y temporal. Esto tiene implicaciones fundamentales en su hidrología, y a su vez, en la conformación de los tipos de hábitats y especies que se encuentran en su cuenca (Cotler et al., 2010).

La cuenca de río Colorado es vital para la ecología y la economía de la región oeste de Norteamérica. El río proporciona agua para aproximadamente 35 millones de personas (el 92 % están establecidos en EUA). De acuerdo con Cohen (2011), el 60 % del total de personas que reciben suministros de agua de la cuenca del río Colorado viven fuera de ésta, en el corredor urbano que se extiende desde Los Ángeles, EUA, hasta Tijuana,

México. Las áreas metropolitanas de Denver, Salt Lake City y Albuquerque también importan agua de la cuenca del río Colorado. Las cuatro áreas metropolitanas dentro de la cuenca son Phoenix, Arizona (4,3 millones de habitantes), Las Vegas, Nevada (2 millones), Tucson, Arizona (1 millón) y Mexicali, Baja California, México (936,826). Con la excepción de las cuatro zonas metropolitanas mencionadas, la cuenca del río Colorado está muy poco poblada.

Dentro de la cuenca del río Colorado existen entre 1.2 y 1.3 millones de ha de terrenos agrícolas que son irrigadas (Pitt, Hinojosa-Huerta y Carrillo-Guerrero, 2010). El agua exportada desde la cuenca, ayuda a regar millones de hectáreas fuera de ella, principalmente en el norte de Colorado (Cohen, 2011). Las principales zonas agrícolas son el Valle Imperial en California, EUA y el Valle de Mexicali en Baja California, México, ubicados en la parte sur de la cuenca. En la región mexicana, las comunidades del Valle de Mexicali son altamente dependientes del agua superficial del río Colorado; el cual abastece aproximadamente el 65 % del total anual de recursos hídricos de la región, mismo que se complementa con agua subterránea (35 %), y que a su vez recibe aportaciones significativas de las infiltraciones del río Colorado (IELBC, 2013).

Históricamente, el río Colorado como consideraba como uno de los ríos más poderosos del mundo, con flujo máximo de 6,200 m^3/s y con alta turbidez (Adler, 2007). El río tenía un gran dinamismo e importantes variaciones estacionales, que acarreaban enormes cantidades de material aluvial y generaban numerosos cambios en la corriente e inundaciones. En el delta, el río mantenía 400,000 ha de bosques riparios y humedales, conformando una de las regiones más importantes para la vida silvestre en el continente (Sykes, 1937).

En la actualidad, el río Colorado es el río más controlado en el mundo. En los últimos 100 años, se realizaron grandes obras en su cuenca para controlar, almacenar, y derivar los flujos del río y protegerse de inundaciones (Malagamba, 2004; Samaniego, 2008). Veinticinco presas principales y cientos de obras de derivación se han construido en el cauce principal del río y en sus tributarios. La capacidad de almacenamiento de todas las presas en la cuenca es de más de 4 veces el volumen anual del río (Morrison, Postel y Gleik., 1996). En la tabla 2 se resume la información acerca de las ocho presas

principales a lo largo del cauce principal de río Colorado, mientras que en la figura 2 se muestra la ubicación de estas presas.

Dichas obras han modificado drásticamente el régimen hidrológico del río, disminuyendo la variabilidad estacional, volumen, velocidad, turbidez y temperatura de los flujos en el cauce principal. Estas modificaciones hidrológicas, en conjunto con los generados directos e indirectos de degradación, han causado la desaparición de más del 90 % de los bosques riparios y el 80 % de las marismas en la cuenca baja del río Colorado (Ohmart, Anderson y Hunter, 1988). Los impactos del manejo del río Colorado han repercutido de manera más drástica en la zona del delta y en la desembocadura del río en el Alto Golfo de California, donde, de acuerdo con Glenn et al., (1996), se han perdido 85 % de las zonas de humedales y bosques riparios, y ha desaparecido la porción estuarina del río.

Sin duda, la cuenca del río Colorado, sobre todo la cuenca baja, es un claro ejemplo de prácticas poco sustentables en el manejo y el uso del agua. Por lo tanto, el desarrollo de un nuevo plan de manejo integral de la cuenca es urgente para evitar la crisis binacional de agua y pérdida de hábitat para la vida silvestre.

Figura 1. Cuenca del río Colorado (Imagen de fondo: Worl d Imagery recuperada de: http://www.arcgis.com/home/item.html?id=10df2279f9684e4a9f6a7f08febac2a9).

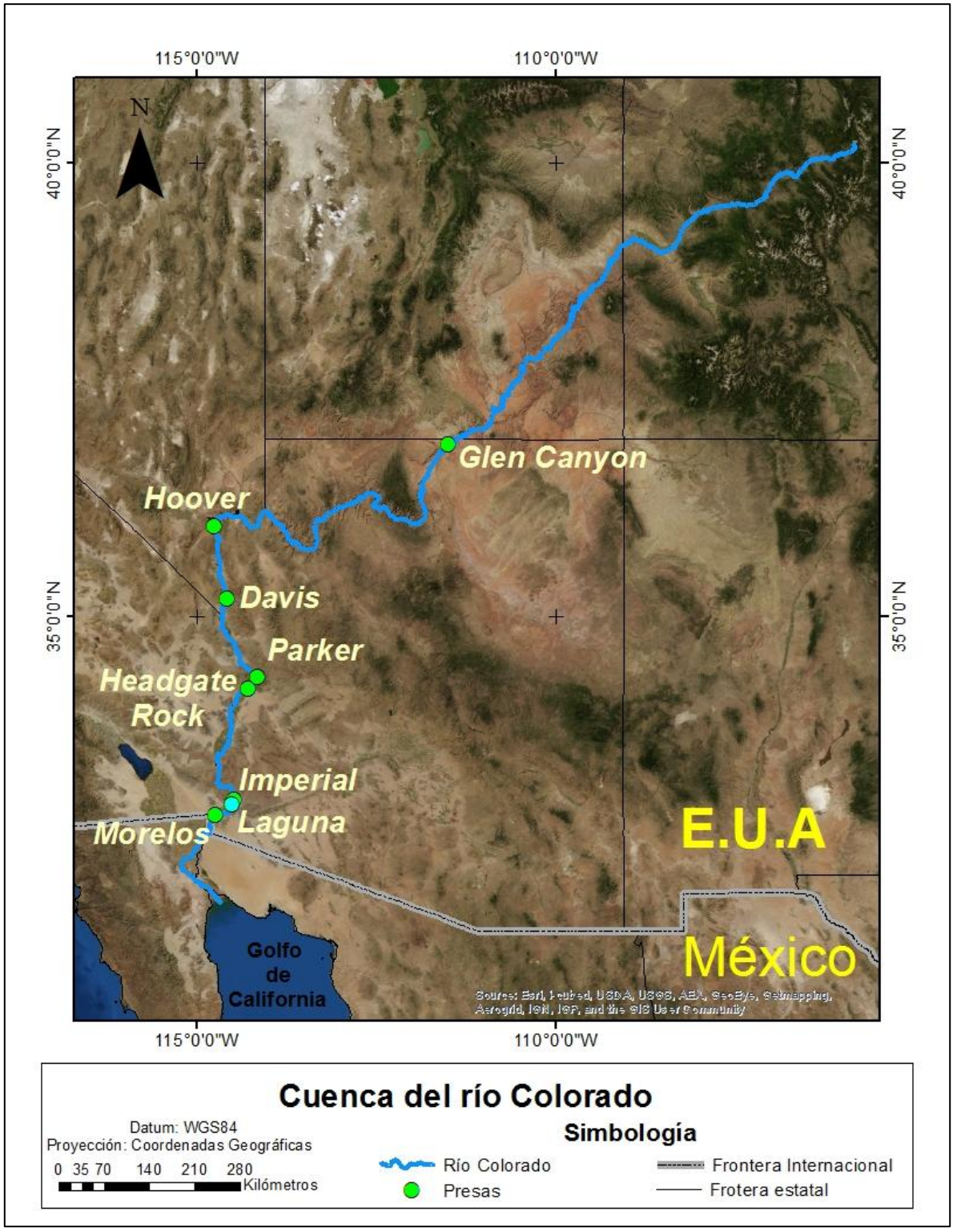


Figura 2 . Ubicación geográfica de las principales presas ubicadas en el cauce principal del río Colorado (Imagen de fondo: World Imagery recuperada de: http://www.arcgis.com/home/item.html?id=10df2279f9684e4a9f6a7f08febac2a9).

Tabla 2. Principales presas en el cauce principal del río Colorado y sus funciones.

Presa	Año de construcción	Funciones
Glen Canyon	1956-1966	Segunda presa en tamaño del río Colorado, su principal propósito es generar energía eléctrica (451 MW) y almacenar agua para los áridos estados del suroeste.
Hoover	1931-1936	Suministra electricidad a los estados de Nevada, Arizona y sur de California.
Davis	1942-1950	El propósito de la presa es regular las liberaciones derivadas de la presa Hoover y facilitar el suministro de agua del río Colorado a México.
Parker	1934-1938	Las funciones principales de la presa son la creación de un embalse y la generación de energía.
Headgate Rock	1980	Su principal función es proporcionar energía adicional a la Reserva India del río Colorado.
Imperial	1936-1938	Su principal función es proporcionar el flujo por gravedad al canal Todo Americano.
Laguna	1903-1905	Primer presa construida en el río Colorado. Su principal función es regular los flujos de salida de la presa Imperial.
Morelos	1944-1950	Su principal función es desviar agua del río Colorado hacia canales que la llevarán a ciudades (Mexicali, San Luis Río Colorado, Los Algodones, Riíto, Tijuana y Rosarito) y zonas agrícolas en Sonora y Baja California.

2.3. Métodos de estudio de los cambios hidrológicos y de vegetación de los humedales

En el marco de la Convención de Ramsar se reconoce la necesidad de desarrollar inventarios, evaluaciones y monitoreo de los humedales, dada su importancia como herramientas para los procesos de planificación del manejo de los humedales. El inventario de humedales se utiliza para reunir la información que describe las características ecológicas de los mismos; la evaluación permite determinar el estado de los humedales y las amenazas que pesan sobre ellos; y el monitoreo brinda información sobre la magnitud de los cambios (negativos o positivos) en las características ecológicas (Secretaría de la Convención de Ramsar, 2010, 2013).

Según la Resolución IX.1, Anexo A, del "Marco Conceptual para el uso racional de los humedales y el mantenimiento de sus características ecológicas" de 2005, las características ecológicas de un humedal se definen como la combinación de los componentes, procesos y beneficios/servicios del ecosistema que caracterizan al humedal en un determinado momento. Según la definición de los humedales (ver capítulo 2.1) su componente fundamental es el agua. Otro de los componentes característicos de humedales es la vegetación. Por lo tanto, los estudios de cambios hidrológicos y de vegetación de los humedales son de gran importancia.

Las técnicas tradicionales utilizadas para la identificación y delimitación de los humedales y estudio de sus características ecológicas requieren la planificación y desarrollo de trabajo de campo para la toma de medidas in situ. Las mediciones in situ proporcionan la información detallada sobre los humedales, que incluye mapas de humedales, listas de especies de flora y fauna, así como también, la química del agua y la caracterización de los suelos (Abarca, 2007; U.S. EPA, 2002; Lopez y Siobhan, 2002). Sin embargo, estas técnicas demandan alta inversión de recursos financieros y, además, para la continuidad de las series de datos es necesario que se formalicen programas de seguimiento de las variables ambientales.

La técnica de fotointerpretación, ampliamente usada a partir de los años 30's del siglo pasado, permite realizar mapas de humedales de manera más eficiente y precisa a partir de fotografías aéreas, las cuales han sido el insumo más utilizado en el inventario

de humedales, como lo reportan los trabajos de Ibrahim y Hashim (1990), Tiner (1990) y Warner (1990).

En las últimas décadas la teledetección espacial - término aplicable a una amplia variedad de medios de observación remota a bordo de plataformas espaciales - se ha desarrollado de una manera espectacular, diseñándose aplicaciones para casi todas las áreas de las Ciencias de la Tierra (Ventura, 1999), incluyendo los estudios sobre humedales (Rani, Kumar, Yadav y Hooda, 2011). Esto debido a las grandes posibilidades y ventajas que presenta: la cobertura global y exhaustiva, perspectiva panorámica, observación multiescala, información sobre regiones no visibles del espectro electromagnético, multitemporalidad de las observaciones y registro digital de la información (Chuvieco, 2002). El uso de imágenes satelitales permite, en la mayoría de los casos, reducir el tiempo empleado y el dinero invertido en los estudios sobre el terreno (Torres, 1994; Baker, Lawrence, Montagne y Patten, 2006; Shanmugan, Ahn y Sanjeevi, 2006).

La Secretaría de la Convención Ramsar (2010), recomienda el uso de los sensores remotos y de los SIG para la elaboración de inventarios de humedales, que son esenciales para los procesos de planificación del manejo adecuado de los mismos.

2.4. Percepción remota : conceptos básicos

En este subcapítulo se presenta una breve introducción a los conceptos básicos de percepción remota, necesarios para entender el tipo de datos y la metodología aplicada en el presente trabajo. El subcapítulo se basó en los trabajos de Lissesand y Kiefer (1994), Chuvieco (1990; 1996 y 2008), Chuvieco, Salas, Meza y Vargas (2002), Díez (1993), Short y Robinson (1998), Lunetta y Elvidge (1999), Campbell (2002), Lillesand, Kiefer y Chipman, (2004), Hewitt (2006), Jensen (2005; 2007), Sabins (2007), Schott (2007), Lira (2010) y Barrett (2013) que pueden ser consultados para obtener más información acerca el tema.

2.4.1 Definiciones básicas

Una definición formal y comprensiva de la percepción remota (PR) aplicada es la adquisición y medición de datos y/o información de alguna(s) propiedad(es) de un

fenómeno, objeto o material mediante un instrumento que no se encuentra en contacto íntimo con los rasgos bajo observación. Las técnicas involucran una gran cantidad de ambientes: medición de campos de fuerza, radiación electromagnética, energía acústica utilizando cámaras, láser, receptores de radio, sistemas de radar, sonar, sensores térmicos, sismógrafos, etc. Sin embargo, una definición más circunscrita a los estudios de la superficie terrestre sería: la PR es una técnica basada en el muestreo de la energía electromagnética ya sea reflejada o emitida por los diferentes tipos de cobertura de la Tierra. La PR de energía electromagnética es también llamada teledetección.

El fenómeno de la PR es posible gracias a la interacción de la energía electromagnética con los distintos tipos de coberturas terrestres. Estas tienen un comportamiento reflectivo que varía tanto por factores externos (ambientales) como sus características fisicoquímicas propias al momento de la toma de la imagen.

La PR ha demostrado ser una fuente rentable de valiosa información para numerosas aplicaciones, por ejemplo para el inventario de recursos naturales, la planificación urbana y rural, el monitoreo y gestión del medio ambiente, la agricultura, infraestructuras, obras civiles, exploraciones mineras, respuestas rápidas a desastres y operaciones militares, entre muchas otras.

2.4.2 Espectro Electromagnético

La energía transportada por las ondas electromagnéticas se llama energía radiante, y el proceso físico generador de energía radiante se llama radiación. La radiación electromagnética comprende una amplia variedad de frecuencias o de longitudes de onda que abarcan desde los rayos gamma hasta las ondas de radio. Todas estas emisiones constituyen el denominado espectro electromagnético (EEM) (Figura 3). Si bien las longitudes de onda varían de forma continua dentro del EEM, éste está dividido en una serie de regiones o bandas. Estas divisiones surgen a partir de los distintos métodos para detectar cada tipo de radiación más que de diferencias intrínsecas en las características de la energía, en las distintas longitudes de onda. Desde la perspectiva de la teledetección, las regiones espectrales más empleadas en la actualidad son: la región del visible (de 0.4 a 0.7 μm; 1 μm = 10^{-6}m), denominada así porque se trata de la

radiación electromagnética que puede percibir el ojo humano, y la región del infrarrojo (IR) cercano (de 0.7 a 1.3 µm), también denominado IR reflejado o fotográfico. Aunque las regiones de IR medio (1.3 a 8 μm), de IR lejano o térmico (8 a 14 μm), y de microondas (de 1000 µm a 0.3 m, aproximadamente) son también ampliamente usadas.

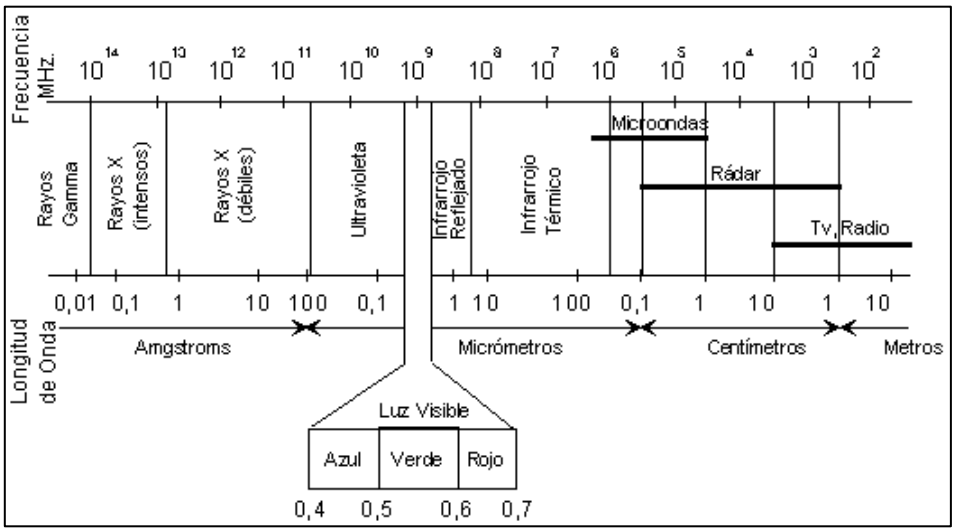


Figura 3 . El espectro electromagnético (EMM) (Imagen tomada de: http://atlasneuquen.uncoma.edu.ar/articulos/?e=18).

2.4.3 Firmas espectrales

La radiación electromagnética que incide sobre la superficie terrestre, al tener contacto con objetos o materiales que la recubren, puede ser reflejada, transmitida y absorbida; de esta última proviene la energía emitida resultado de la ganancia de temperatura. La proporción de energía reflejada, absorbida y transmitida varía para los distintos materiales u objetos del terreno, que depende del tipo de material y de su condición. Estas diferencias permiten discriminar unos objetos de otros en una imagen. Por otra parte, aún dentro de un mismo objeto o material, la proporción de energía reflejada, absorbida y transmitida varía con las distintas longitudes de onda. Dentro de la región del visible del EEM estas diferencias espectrales se traducen en el efecto visual denominado color.

Las características de reflectividad de las coberturas de la superficie terrestre se pueden cuantificar midiendo la relación entre la energía reflejada sobre la energía incidente. A esta relación se le denomina "reflectancia espectral", y es función de la

longitud de onda. Dado que la cantidad de energía reflejada por la superficie siempre será menor o igual que la energía recibida (incidente), la reflectancia tendrá valores comprendidos entre 0 y 1. Normalmente suele expresarse en porcentaje.

Se denomina "curva de reflectancia espectral" o "firma espectral" al gráfico de la reflectancia espectral frente a la longitud de onda (Figura 4). El conocimiento de las firmas espectrales es fundamental en PR, no sólo para identificar los distintos objetos dentro de una imagen, sino para elegir las bandas más apropiadas y el sensor más conveniente para una aplicación en particular. La figura 4 muestra las firmas espectrales de cinco tipos coberturas de la superficie terrestre: vegetación, suelo seco, suelo húmedo, agua clara de lago y agua turbia de río, y junto a éstas se muestran las bandas espectrales del satélite Landsat TM (Thematic Mapper, por sus siglas en inglés).

Con respecto a los distintos tipos de cobertura presentes en la superficie terrestre, se pueden dividir en tres grandes grupos de acuerdo a su respuesta espectral (Figura 4), lo que hace posible su identificación a partir de las imágenes; estos grupos son descritos en la tabla 3.

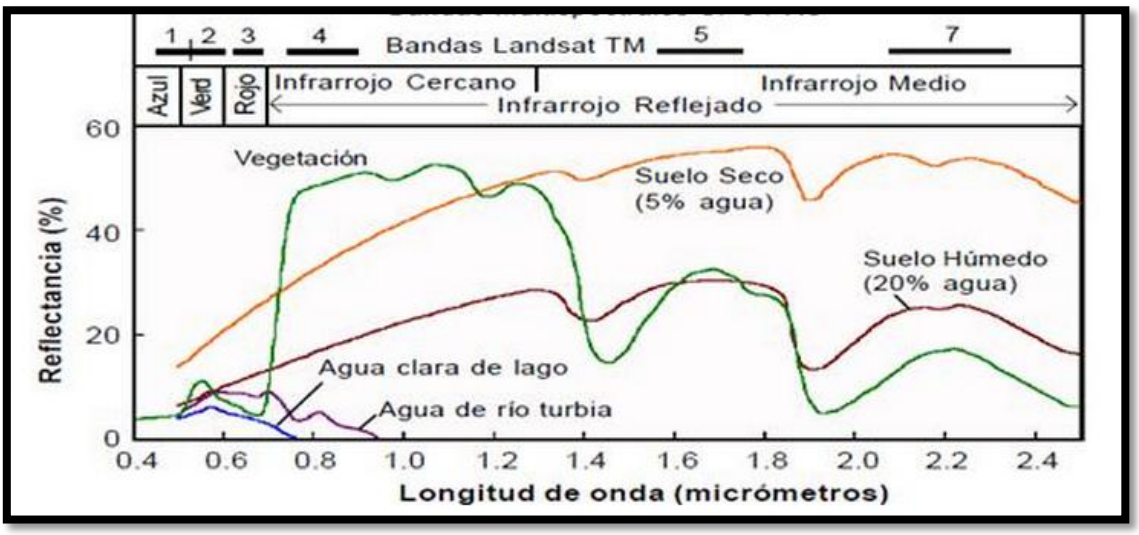


Figura 4. Firmas espectrales de los diferentes tipos de coberturas de la superficie terrestre y las regiones del EEM correspondientes a las bandas del sensor Lands at TM. (Modificado de: http://www.monografias.com/trabajos82/manejo -envi/manejo -envi2.shtml).

Generalmente las firmas espectrales de distintos materiales u objetos, tales como: componentes del paisaje a distintas escalas, distintos tipos de vegetación, suelos, minerales, rocas o incluso materiales artificiales como contaminantes u otros materiales construidos por el hombre, se obtienen en laboratorios mediante espectrómetros o espectrofotómetros (Escribano, 2009), sin considerar el efecto atmosférico de la trayectoria objeto-sensor, y medidas en condiciones ideales de ángulo incidente. Es importante resaltar que los factores, como el ángulo de iluminación solar, influencia de la atmósfera, variaciones ambientales, ángulo de observación y topografía del terreno, causan la modificación del comportamiento espectral característico de las coberturas de la superficie terrestre.

Tabla 3. Grupos de cobertura terrestre de acuerdo a su respuesta o comportamiento espectral (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable Ministerio de Salud y Ambiente, 2004).

Grupo	Respuesta espectral
Vegetación	A nivel micro: La reflectancia espectral de la vegetación depende principalmente de los factores como: los tipos de pigmentos, estructura de las hojas y el contenido de humedad. En la región del visible del EEM (0.4 – 0.7 µm) son los pigmentos foliares como la clorofila, los responsables de la alta absorción de la radiación solar, y su poca transmisividad y reflectividad, principalmente en el rojo. En la región del infrarrojo cercano (0.7 – 1.3 μm) se observa una alta reflectividad y transmisividad de la energía incidente, producto de la estructura interna de las hojas (capa esponjosa del mesófilo). En la región del infrarrojo medio del EEM (1.3 – 3 µm), la respuesta espectral es gobernada por el contenido de agua entre y dentro de las células. Los mínimos locales (valles) de la reflectancia a 1.45, 1.95 y 2.5 µm corresponden a la elevada absorción de las moléculas de agua presentes en las hojas. Aquí cabe mencionar que la respuesta espectral de la vegetación puede tener variaciones dependiendo de la especie, el estado de crecimiento y la geometría de la hoja, también debido a factores externos como estrés, deficiencia en agua, exceso de minerales, época de sequía o infecciones parasitarias. A nivel macro: El comportamiento espectral de una masa de vegetación (cultivo, vegetación natural o modificada) está determinado por la combinación de sus componentes: el tipo, la densidad, el grado de desarrollo, su estado fenológico, y la naturaleza del suelo entre las plantas, si está desnudo o si posee materia orgánica, etc.
Suelo	La curva de reflectancia espectral del suelo es más monótona que la de la vegetación (Figura 4). Los principales factores que influyen en el comportamiento espectral del suelo son el contenido de humedad, su textura (proporción de arena), rugosidad, presencia de materia orgánica y contenido de óxido de hierro. En particular, el contenido de humedad está estrechamente ligado a la textura: los suelos arenosos, de partículas grandes, usualmente están bien drenados, resultando con baja humedad y relativamente alta reflectancia. Ocurre lo contrario con los suelos mal drenados. La rugosidad y la materia orgánica, así como el óxido de hierro disminuyen la reflectancia del suelo, a lo menos en la región del visible.
Agua	La reflectancia que presenta el agua es bastante baja y es considerablemente menor si se compara con la reflectancia de la vegetación y los suelos (Figura 4). La mayor reflectancia del agua clara está en torno a la banda del azul de la región del visible, disminuyendo cuando se alcanza la región del IR cercano. De ahí la facilidad a estas longitudes de onda de distinguir la línea de costa. La variabilidad del agua se detecta mejor en longitudes de onda más cortas de la región del visible (azul y verde) y está relacionada con el contenido de partículas o sedimentos, materia orgánica, rugosidad de la superficie y profundidad. Así, la reflectancia espectral aumente en aguas poco profundas.

2.4.4 Generalidades sobre los sensores remotos

La obtención de información de un objeto a distancia involucra el uso de los instrumentos llamados "sensores remotos", capaces de ver o captar las relaciones espectrales y espaciales de objetos y materiales observables a una considerable distancia de aquellos. Los métodos más comunes para recoger información incluyen el uso de sensores colocados sobre plataformas terrestres, aéreas y espaciales (satelitales). Los diferentes tipos de sensores, según el origen de la señal utilizada, se pueden agrupar en dos categorías:

1. Sensores activos: son los que emiten una señal electromagnética hacia el objeto observado y luego detecta y registra la energía reflejada por los distintos elementos del terreno. Son los instrumentos de tipo radar. La mayoría de los sensores activos trabajan en longitudes de onda de microondas, aunque actualmente también existen sensores láser aerotransportado (LIDAR) que operan en la región del visible y del infrarrojo (IR) cercano.
2. Sensores pasivos (ópticos): son los que captan la radiación solar reflejada o radiación emitida por las distintas coberturas de la superficie terrestre, en diversas bandas del espectro electromagnético. Un tipo de sensor pasivo son las cámaras ópticas multiespectrales, que capturan bandas (regiones definidas del espectro electromagnético) como imágenes separadas.

En este trabajo de tesis se utilizan los datos de sensores pasivos (ópticos) ubicados en las plataformas satelitales. La mayoría de los sensores remotos pasivos utilizan sensores electro-ópticos. Este tipo de sensores son detectores electrónicos fotosensibles que crean una señal eléctrica proporcional a la cantidad de energía electromagnética que reciben. Las señales eléctricas son grabadas electrónicamente usando un sistema de computación o electrónico adicional. Estos datos digitales pueden ser reconstruidos en una imagen digital o electrónica.

2.4.5 Resolución de los sensores remotos

La salida de radiación (emitida o reflejada) de la superficie terrestre es un fenómeno continuo en 4 dimensiones (espacio, tiempo, longitud de onda y radiancia). Un sensor debe muestrear en este continuo discretizándolo. La habilidad para registrar

discriminando la información a detalle es la resolución de un sensor. Este concepto implica cuatro tipos de resolución: espacial; espectral; radiométrica y temporal, las cuales están descritas y ejemplificadas en la tabla 4.

Tabla 4. Descripción de las modalidades de resolución de un sensor .

Resolución	Descripción	Ejemplo
Espacial	Es la aptitud de un sensor para distinguir los objetos en el plano espacial. Está definida por las dimensiones del pixel sobre el terreno. La resolución espacial depende de varios factores como son: la altura orbital, el ángulo de visión, la velocidad de escaneo, y las características ópticas del sensor.	El sensor TM de los satélites Landsat 4 y 5 tiene una resolución espacial de 30 m x 30 m en las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7 y de 120 m x 120 m en la banda 6.
Espectral	Indica el número y anchura de las regiones del espectro que puede discriminar el sensor. En este sentido, un sensor será tanto más idóneo cuanto mayor número de bandas proporcione, ya que facilita la caracterización espectral en distintas coberturas del terreno.	Los satélites Landsat 4 y 5 estan equipados por el sensor MSS cuya resolución espectral es de 4, y por el sensor TM cuya resolución espectral es de 7.
Radiométrica	Indica la sensibilidad del sensor, es decir su capacidad para detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe y se codifica en una imagen a un sistema binario. Por lo que la resolución radiométrica suele identificarse con el rango posible de valores que almacena el sensor, medido como el número de bits que necesita cada valor numérico para almacenarse. Cuanto mayor sea la precisión radiométrica, mayor número de detalles podrán captarse en una imagen.	En los primeros MSS (Landsat 1-3) la resolución espectral era de 7 bits, lo que daba 2^7=128 niveles de energía (Números Digitales, DN, por sus siglas en inglés), para las banda 4 a 6, 6 bits (2^6=64 DN) para la banda 7. Los MSS de la segunda generación (Landsat 4 y 5) codificaban las cuatro bandas con 8 bits (2^8= 256 DN).
Temporal	Es la periodicidad con la que el sensor adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre. El ciclo de cobertura está en función de las características orbitales de la plataforma (altura, velocidad, inclinación), así como el diseño del sensor.	El ciclo de repetición de los satélites Landsat 1-3 era de 18 días, mientras que el ciclo de repetición de los Landsat posteriores se redujo a 16 días.

2.4.6 Imágenes digitales

Una imagen digital originada desde una plataforma aérea o espacial, consiste en un arreglo matricial bidimensional (2D) de elementos de imagen llamados "pixeles" (el término pixel es la abreviación de picture element) ordenados en filas y columnas formando una malla o grid; las imágenes organizadas de esta manera son conocidas como imágenes ráster (Figura 5-a). Cada píxel representa un área de superficie terrestre y es el menor elemento no divisible de la imagen.

Para cada pixel existe un valor numérico conocido como Número Digital (DN, por sus siglas en inglés) o nivel de brillo, que codifica digitalmente la cantidad promedio de energía electromagnética, ya sea reflejada o emitida, detectada por el sensor sobre el área terrestre correspondiente a dicho píxel y en una banda espectral. El rango de valores DN dependen de la resolución radiométrica del sensor (ver apartado 2.4.4). En una base binaria de 8 bits el DN poseerá un rango de valores de 0 a 255. Estos valores pueden ser modulados para producir en la pantalla de una computadora una imagen en escala de grises (imagen pancromática). En caso de un sensor que capta las imágenes en distintas bandas del EEM (sensores multiespectrales; p. ej. Landsat TM), se obtiene una imagen multiespectral (Lira, 2010), compuesta por el conjunto de imágenes captadas para distintas bandas. Estás imágenes pueden considerarse como “versiones distintas de un mismo objeto”.

Cada pixel de cada banda está en perfecto registro geométrico con sus equivalentes de las bandas restantes (Figura 5-b). La imagen de cada banda puede ser exhibida como una imagen en escala de grises (pancromática) o en combinación de tres bandas, a la vez, como una composición de color.

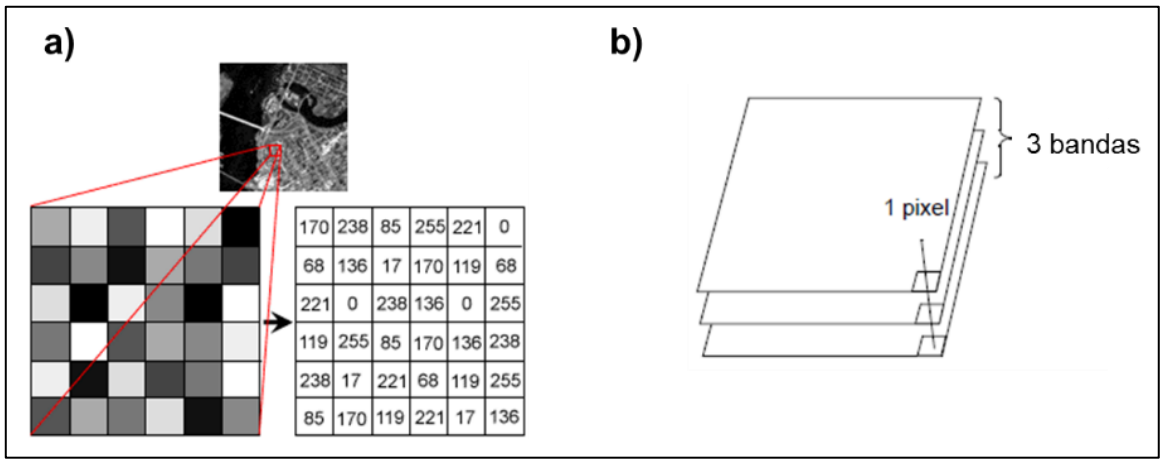


Figura 5. Representación esquemática de a) una imagen digital en formato ráster (De http://hosting.soonet.ca/eliris/remotesensing/bl130lec10.html), b) una i magen digital que consta de 3 bandas.

2.4.7 Procesamiento de las Imágenes digitales

El procesamiento de imágenes digitales, es la aplicación de técnicas matemáticas, estadísticas y computacionales, que permiten mejorar, corregir, analizar y extraer información de las imágenes captadas por los sensores remotos. La elección de la técnica que debe ser empleada y de los algoritmos que se aplicarán depende de las metas que se pretenden alcanzar en cada proyecto. El procesamiento de imágenes digitales permite realizar operaciones complejas, muy costosas o inaccesibles para el análisis visual. Tiene la ventaja de permitir una rápida comparación de fenómenos multitemporales por la accesibilidad a la información que posee. El procesamiento de imágenes digitales requiere para su realización de un software especializado y hardware adecuado.

Se pueden considerar tres grupos de procesamiento básico de la información proveniente de los sensores satelitales:

1) Correcciones de la imagen (pre-procesamiento)
2) Realces y mejoramiento de la imagen
3) Extracción de la información

1) Correcciones de la imagen (pre -procesamiento):

La parte de procesamiento relacionada con las correcciones de errores de una imagen digital también se conoce como “pre-procesamiento”. La adquisición de datos provenientes del espacio está influenciada por distorsiones que son inherentes a la posición de la plataforma que lleva al sensor, al relieve, la distorsión natural por la curvatura y rotación de la Tierra, condiciones atmosféricas, etc. También se producen errores por mala lectura de los sensores, esto puede deberse por fallas mecánicas, desajustes o mal funcionamiento del sensor. Algunos de estos errores se corrigen en el centro de recepción de las imágenes y otros se solucionan con correcciones geométricas o radiométricas.

A. Corrección geométrica . Los errores geométricos se deben, principalmente, a anomalías propias de la plataforma, por ejemplo, cambios de altitud u orientación orbital. También el sensor, puede ser causa de errores geométricos, por ejemplo, distorsión por ángulo de barrido, mala calibración de detectores, etc. La corrección geométrica comprende cualquier cambio en la posición que ocupan los pixeles en la imagen. Esto se hace para corregir cartográficamente una imagen o si queremos sobreponerla con otras. En el primer caso se busca una relación que pase los DN a una proyección cartográfica determinada, haciendo que la imagen resultante pueda integrarse a un SIG (Sistema de Información Geográfica), sin alterar los valores radiométricos de la imagen original. En el segundo caso la transformación geométrica consiste en ajustar la imagen a otra que se tiene como referencia. Los procedimientos para esta corrección no se presentan aquí debido a que no fue necesario usarlos en este trabajo, ya que las imágenes utilizadas cuentan con corrección geométrica. Dichos procedimientos pueden ser consultados en el libro Sistemas de Información Geográfica de Olaya (2014) en el apartado 16.2.1.

B. Corrección radiométrica. Como corrección radiométrica se conoce a las técnicas que modifican los números digitales (DN, por sus siglas en inglés) originales de los pixeles, con el objetivo de acercarlos a los que habría presentes en la imagen en caso de una recepción ideal. Dentro de este concepto se engloban las distorsiones provocadas por el efecto que la atmósfera ejerce sobre la radiación, así como los problemas radiométricos derivados del mal funcionamiento del sensor. Los procesos

de corrección radiométrica tienen que ser específicos para la naturaleza de la distorsión. Las técnicas más habituales de corrección radiométrica son: correcciones de errores del sistema, correcciones atmosféricas, calibración radiométrica y corrección topográfica.

Correcciones de errores del sistema. Corrección radiométrica del bandeado, en sensores de barrido producido por desajustes en el calibrado de los sensores. Corrección radiométrica de líneas o píxeles perdidos, producido por fallos del sensor o de transmisión de los datos. Para mayor información acerca de errores radiométricos causados por el mal funcionamiento de sensor y métodos de su corrección consultar la bibliografía adecuada al tema (p. ej. Richards y Jia, 1999; Jensen, 2005; 2007).

Correcciones atmosféricas. En realidad los efectos de la atmósfera no son considerados como errores debido a que forman parte de la radiación incidente. Los sensores colectan radiación electromagnética que puede ser dispersada y/o absorbida por los gases y aerosoles presentes en la atmósfera; la cantidad de estos elementos no es constante en tiempo ni espacio (Kaufman, 1993), y se hace aún más variable, en imágenes con diferentes fechas de adquisición, hora y ángulo de observación del sensor. Esta particularidad, se debe tener en cuenta antes de realizar cualquier tipo de análisis multitemporal de imágenes, y se hace una corrección que tome en cuenta los efectos de la atmósfera (Lu, Mausel, Brondizio y Moran, 2002; Brizuela, Aguirre y Velazco, 2007).

El mecanismo de la dispersión atmosférica se presenta bajo dos formas distintas: la dispersión de Rayleigh, producida por las moléculas de los gases atmosféricos y la dispersión de Mie o dispersión por los aerosoles, que se produce sobre partículas más grandes (López, 1991; Rejas, 2008). Los efectos de dispersión atmosférica son dependientes de la longitud de onda que el sensor registra. La dispersión de Rayleigh, tiene un mayor efecto en la región espectral del visible, siendo aditivo; este efecto decrece cuando la longitud de onda se incrementa; para longitudes de onda mayores a 1 µm el efecto es mínimo (Slater, 1980). La dispersión generada por aerosoles no decrece como lo hace la dispersión de Rayleigh; se estima que el efecto multiplicativo de los aerosoles es aproximadamente el 10 % de toda la

radiación recibida por el sensor bajo condiciones atmosféricas típicas, afectando las longitudes de onda más cercanas a 1 µm. Los efectos de estos factores se manifiestan en un difuminado de la imagen, disminución de contraste (efecto Rayleigh por niebla) (Tagestad, 2000) y la cantidad total de radiación que llega al sensor. La corrección atmosférica busca entonces disminuir o eliminar estas distorsiones que se introducen en las imágenes producto de la interacción de la atmósfera con el sensor.

La dispersión y absorción de la radiación son conocidas como procesos de transferencia radiativa; existen diferentes métodos para modelar sus efectos (Lenoble, 1985). Sin embargo, las correcciones atmosféricas constituyen un problema muy complejo si se quieren aplicar sobre la base de estos modelos físicos de transferencia radiativa (Song, Woodcock, Seto, Lenney y Macomber, 2001). En efecto, estos modelos tienen el mérito de su rigor científico, precisión y aplicabilidad a un amplio rango de circunstancias, pero suelen exigir complejos software, así como información meteorológica detallada relativa a las condiciones en las que la imagen fue adquirida. Esta información es muy difícil de obtener y es complicado el uso de estos modelos de forma rutinaria. Por esta razón, se han desarrollado una serie de métodos que proponen una solución para el problema de la corrección atmosférica utilizando sólo la información derivada de la imagen. De forma genérica, se llama a este tipo de métodos sustracción del objeto negro o modelos de DOS (Dark-Object Subtraction, por sus siglas en inglés) (Chavez, 1988, 1996; Chavez y Mackinnon, 1994).

El modelo de DOS se basa en estos supuestos: en primer lugar el efecto multiplicativo de la atmósfera es constante, la superficie de la Tierra se comporta como una superficie Lambertiana (una superficie ideal que refleja la energía incidente desde una dirección igual en todas direcciones), los efectos de la dispersión son uniformes; hay algunos pixeles en la escena que están en la obscuridad (áreas cubiertas con materiales de fuerte absorción de energía electromagnética, como agua o zonas de sombra), si el sensor capta alguna radiación de estos pixeles oscuros, se debe a dispersión de las partículas y moléculas de la atmósfera; esta información puede ser usada para calibrar el resto

de imagen. Operacionalmente, los pixeles más oscuros pueden ser seleccionados examinando el histograma de los DN de una imagen o calculando sus estadísticas. La ecuación (1) define el DN corregido en la posición del pixel i, j para la banda k ($DN'_{i,j,k}$) como:

$$DN'_{i,j,k} = DN_{i.j.k} - DN_{min,k} \quad (1)$$

Donde $DN_{i,j,k}$ es el DN original y $DN_{min,k}$ es el DN mínimo para la banda k.

Calibración radiométrica . Consiste en conversión de DN a parámetros físicos. Los valores de los pixeles en las imágenes satelitales expresan la cantidad de energía radiante recibida por el sensor en la forma de valores relativos no calibrados simplemente llamados números digitales (DN, por sus siglas en inglés) o brillo. Para muchas (quizás la mayor parte de las) aplicaciones, como la clasificación de una imagen de fecha única usando clasificación no supervisada, no es necesario convertir estos valores a parámetros físicos. Pero si se trata de realizar comparaciones entre imágenes de distintas fechas, de la misma área, será necesario realizar las correcciones de los datos de manera que sean comparables (Chuvieco et al., 2002). Para ello se requiere, primero convertir los DN de cada banda a valores de radiancia, y después transformar la radiancia a valores de reflectancia a tope de atmósfera “Top of Atmosphere” (TOA, por sus siglas en inglés), también conocida como reflectancia aparente. En caso de considerar la reflectancia TOA, hay que tomar en cuenta, que los efectos de la absorción atmosférica, la irradiación difusa de la superficie terrestre y la dispersión atmosférica son discriminados. La aplicación de correcciones atmosféricas basadas en modelos de transferencia radiativa es requerida para obtener los valores de reflectancia de la superficie (Chander, Markham, y Helder, 2009; Ariza, Garcia, Rojas y Ramírez, Sin Año).

La radiancia es la cantidad de energía electromagnética que pasa a través o es emitida desde un área en particular, confinada en un ángulo sólido en una dirección

específica. El ángulo sólido tiene su vértice en la apertura del sistema sensor o del sistema óptico y base en la fuente o superficie de reflexión (Brizuela-Amador et al., 2007). Como se indicó anteriormente, los DN de la imagen son proporcionales a la radiancia, pero son multiplicados por un factor de conversión que permite almacenar los datos en formatos más compactos. Los factores de conversión que revierten este proceso son característicos de cada sensor y por lo general son suministrados por el fabricante. Para revertir la compresión sólo es necesario multiplicar los valores de cada banda por el factor de compresión, ya sea un factor único para toda la imagen o un factor específico por cada banda, según haya dispuesto el fabricante del sensor, en ciertos casos incluso proporciona una fórmula que debe aplicarse a los datos para revertir esta compresión. En general, se considera que la radiancia recibida por el sensor, para una banda dada, es:

$$Ls = DN * gain + offset \quad (2)$$

Donde, Ls es la radiancia recibida por el sensor ($W \cdot (m^2 \cdot srad \cdot \mu m)^{-1}$), DN es el número digital registrado por el sensor, $gain$ y $offset$ son valores de calibración propias de cada banda del sensor.

La radiancia medida por el sensor, Ls, puede relacionarse con la reflectancia TOA, o reflectancia aparente, R^{TOA}, como:

$$R^{TOA} = \frac{\pi Lsd^2}{ESUN \cos \theta_s} \quad (3)$$

Donde, d es la distancia astronómica Tierra-Sol (unidades astronómicas), $ESUN$ es la irradiancia solar media exoatmosférica ($W \cdot (m^2 \cdot \mu m)^{-1}$), y θ_s es el ángulo solar zenit (°, grados).

Corrección topográfica . También conocida como corrección por sombra topográfica. La corrección topográfica permite compensar las diferencias de iluminación solar, debidas a la variación altitudinal del terreno. Las zonas de umbría

presentaban menos reflectividad de lo que debieran, mientras que las zonas en solana presentaban una reflectividad más alta de lo esperado (Riaño, Salas, Chuvieco, Aguado y Gómez, 2000). No se realizó este tipo de corrección en este trabajo de tesis, debido a que nuestras zonas de estudio se encuentran en zonas relativamente planas, y por lo tanto no se esperan errores significantes relacionados con la topografía.

En este trabajo de tesis, el pre-procesamiento incluyó la sustracción de objeto obscuro y la conversión de DN a radiancia y a reflectancia TOA (ver capítulo 4).

2) Realces y mejoramiento de la imagen:

Consiste en ejecutar procesamientos numéricos para realzar, enfatizar o suprimir, ciertas características de la imagen con el objeto de mejorar los resultados de su interpretación. Por ejemplo, puede desearse un mayor contraste entre los objetos que integran la imagen, necesitar poner énfasis en los límites de distintas coberturas vegetales, etc. Las principales técnicas de realce y mejoramiento de la imagen son: ajuste de contraste, filtros, composiciones en color y operaciones entre bandas.

Ajuste de contraste. Los procesos de ajuste del contraste tienden a adaptar la resolución radiométrica de la imagen a la capacidad de visualización del monitor.

De acuerdo con Rejas (2008), se presentan dos opciones, que darán lugar a dos técnicas distintas de ajuste. Por un lado, que el rango de DN de la imagen sea menor que el número de visualización (NV) que facilita la memoria gráfica de los equipo de cómputo y por otro, que esta capacidad de visualización sea menor que el rango de DN de la imagen.

Compresión del contraste viene a solucionar el segundo de los casos que se planteaban, que se puede producir cuando el sistema de visualización usado no tiene suficiente capacidad gráfica o en casos de imágenes correspondientes a sensores de gran sensibilidad radiométrica.

La expansión del contraste son técnicas que vienen a solucionar el desajuste entre el rango de DN de la imagen y una mayor capacidad de NV de los sistemas de visualización. Normalmente los sensores actuales codifican la señal en un rango de 256 niveles de grises que coinciden con los NV de los sistemas de visualización. Por lo tanto, en teoría, no tendría que hacerse ningún ajuste del contraste. Lo que ocurre es que una imagen difícilmente tendrá una variedad de paisaje tal como para tener que utilizar los 256 niveles de grises, variedad por la que fueron pensados y diseñados los sensores. Por lo tanto, parte de los niveles de gris que ofrece el monitor quedan inactivos, y la imagen se visualiza poco contrastada. Para solucionarlo, se realiza una expansión del contraste que hace corresponder el rango de DN presente en la imagen con el total de los NV posibles que ofrece el monitor. Existen varios procedimientos encaminados a cumplir este objetivo, entre ellos los más usados son: la expansión lineal, la expansión cuadrática, la ecualización del histograma (Para más detalle se puede consultar a Jensen, 2005 y 2007).

Filtros. Bajo la denominación de filtros se incluyen a aquellas funciones encaminadas a obtener unas características dadas de la señal eliminando otras que no se desean, aislando componentes de interés. Mediante estas técnicas de filtraje, se pretende suavizar o reforzar contrastes en la imagen, de tal forma que los DN de la imagen se asemejen o diferencien más de los correspondientes a los píxeles que le rodean.

Composiciones en color. Debido a que el ojo humano es menos sensible a las tonalidades de color gris que al cromatismo, la composición en color es la técnica más utilizada para resaltar los detalles de una imagen multiespectral.

Aunque existen varios modelos que permiten describir los colores, el modelo aditivo RGB es el que se emplea para generar los colores en los aparatos electrónicos, como los televisores y los monitores informáticos. El modelo RGB utiliza tres colores primarios: el rojo, el verde y el azul (de ahí las siglas RGB, que corresponde a los nombres de dichos colores en inglés: Red, Green y Blue), que se pueden combinar de distintas maneras para generar una amplia gama de colores, desde los colores secundarios (amarillo, magenta, cian), hasta los grises, el negro y el blanco.

La composición en color es un proceso mediante el cual, se asigna a tres bandas de una imagen multiespectral uno de los colores primarios del monitor (RGB) de tal manera, que se los superpone y se visualizan simultáneamente las tres bandas en pantalla. Cada valor de pixel, en cada banda, intervendrá con el porcentaje que le corresponde por su reflectancia original. Este proceso permite visualizar, simultáneamente, información de distintas regiones del EEM, lo que facilita la delimitación visual de algunas cubiertas.

La combinación en color verdadero (real o natural) es formada por las bandas que corresponden al rojo, verde y azul espectral (región del visible de EEM) en el orden RGB. La imagen en color verdadero imita la percepción natural de la escena por el ojo humano. Se habla de imágenes en falso color cuando en uno (o más de uno) de los colores primarios se visualizan las longitudes de onda del EEM, que están fuera de la región del visible. La combinación de las bandas para generar imagen de color compuesto es determinada por las necesidades de cada aplicación.

Operaciones entre bandas. Las operaciones entre bandas se definen como los procesos aplicados a las imágenes, mediante los cuales, obtenemos imágenes resultantes al realizar operaciones matemáticas pixeles a pixeles entre los distintos valores en las distintas bandas. El resultado es una nueva banda con el mismo tamaño y estructura de la imagen original, pero con sus valores que no responden ya, a la radiancia obtenida por el sensor sino a los provenientes de la operación aplicada. Una de las operaciones más utilizadas son los denominados índices. Ver más detalles sobre índices en el apartado 2.4.8.

3) Extracción de información:

Una de las grandes ventajas que posee el análisis de datos a través del procesamiento digital, es la de extraer información temática útil. Para ello, se recurre a la clasificación de imágenes. La clasificación es un concepto del procesamiento digital de imágenes, que contempla los procedimientos mediante los cuales una computadora puede agrupar los pixeles de una imagen, en categorías o clases, dentro de un espacio multiespectral. Los procedimientos de clasificación pueden ser “supervisados” o “no supervisados”.

No se ha realizado la clasificación multiespectral en esta tesis, por lo que se sugiere para mayor detalle referirse a la bibliografía pertinente al tema.

Cabe mencionar que se utilizó una técnica de segmentación basada en el uso de un umbral. La segmentación de las imágenes digitales es una parte importante para muchas tareas en el análisis y procesamiento digital. Esta técnica, permite una primera interpretación de la imagen, lo que trae como consecuencia la obtención de un primer mapa temático. Este tipo de segmentación, permite separar un objeto dentro de la imagen del fondo que lo circunda. La técnica se basa en comparar alguna propiedad de una imagen con un umbral fijo o variable, realizando tal comparación para cada uno de los pixeles que conforman la imagen. La imagen de salida, es una imagen binaria en la cual aquellos pixeles cuyo valor es 1, pertenecen al objeto y los pixeles cuyo valor es cero, pertenecen al fondo. Ávila (2014) define el umbral (t) como: "Sea p un pixel objeto de análisis de una imagen, el cuál debe ser asignado a una clase P_0o P_1 de acuerdo con las condiciones $p < t$ o bien $p > t$, donde t es el umbral establecido."

2.4.8 Índices

En el apartado 2.4.7, se presentaron las operaciones entre bandas como, una forma alternativa para mejorar la capacidad de interpretación de las imágenes digitales. Por ejemplo, se puede obtener una nueva banda dividiendo una banda original por la otra. Así se obtiene una banda que actúa como un índice que podría mejorar la interpretación de algún tipo de cobertura en particular. Existen índices adecuados para la interpretación de tipos de minerales, para la detección de humedad en el suelo, salud de la vegetación y miles de detalles invisibles al ojo humano.

El conjunto de operaciones matemáticas con un mayor éxito en sus aplicaciones son los denominados índices de vegetación, cuyo objeto es el de realzar la respuesta espectral de la vegetación al mismo tiempo que atenúan las de otros factores como el suelo, y las condiciones de iluminación y atmosféricas. Existe una gran variedad de índices de vegetación, la mayoría están basados en las distintas interacciones entre la vegetación y la energía electromagnética de las bandas del rojo e infrarrojo (aprovechando la alta absorción de la banda de rojo y la fuerte reflectancia del infrarrojo cercano). El desarrollo de estos índices han sido de ayuda para el monitoreo de la

vegetación y son aplicables a imágenes con distintas resoluciones como los Landsat MSS y TM.

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) (Rouse, Hass, Schell y Deering, 1973) es el índice de vegetación más utilizado para todo tipo de aplicaciones. La razón fundamental es su sencillez de cálculo, y disponer de un rango de variación fijo (entre -1 y $+1$), lo que permite establecer umbrales y comparar imágenes, etc.

Respecto a otros índices de vegetación más complejos, el NDVI tiene las ventajas de tener una gran sencillez de cálculo y de facilitar la interpretación directa de los parámetros biofísicos de la vegetación, ya que está relacionado con la actividad fotosintética de la vegetación (Chengyuan, Shaohong, y Chaunyang, 2008). Además permite la comparación entre datos obtenidos por diferentes investigadores. Por otro lado, tiene el inconveniente de que posee poca capacidad de minimizar la influencia del suelo y de la atmósfera (Valor y Caselles, 1996; Merg et al., 2011).

El cálculo del NDVI se expresa como:

$$\boldsymbol{NDVI} = \frac{(\boldsymbol{R_{IRC}} - \boldsymbol{R_R})}{(\boldsymbol{R_{IRC}} + \boldsymbol{R_R})} \qquad (4)$$

Donde R_{IRC} es la reflectancia en infrarrojo cercano, y R_R es la reflectancia en rojo visible.

El cálculo del NDVI produce una medida cuantitativa que está relacionada con las condiciones de la vegetación y su biomasa. Los valores de este índice oscilan entre -1 y $+1$. Según los valores que toma NDVI, se puede diferenciar varios tipos de cobertura de la superficie terrestre:

- El agua tiene reflectancia mayor en el infrarrojo cercano que en el rojo ($R_{IRC} > R_R$), por lo tanto valores negativos de NDVI.

- Las nubes presentan valores de reflectancia similares en el infrarrojo cercano y el rojo visible, por lo que su NDVI es cercano a cero.
- El suelo desnudo o suelo descubierto y con vegetación rala (de baja densidad) presenta valores positivos, aunque no muy elevados.
- La vegetación densa, sana y bien desarrollada presenta los mayores valores de NDVI.

El NDVI permite identificar la presencia de vegetación verde en la superficie y caracterizar su distribución espacial, así como, la evolución de su estado a lo largo del tiempo. Esto está determinado fundamentalmente por las condiciones climáticas. La interpretación del índice debe, asimismo, considerar los ciclos fenológicos y de desarrollo anual, para distinguir oscilaciones naturales de la vegetación con los cambios en la distribución temporal y espacial, causados por otros factores (Di, Rundquist y Han, 1994; Merg et al., 2011).

Otros índices que han sido ampliamente usados, sobre todo en ciencias ambientales, son los índices que permiten determinar la superficie de cuerpos de agua, así como resaltar los suelos saturados de humedad y estimar el contenido de agua de la vegetación (Castro, Balderas y Hernández, Sin año; Engman, 1995; Álvarez-Mozos y Crespo, 2005). El agua posee un comportamiento espectral distintivo (ver apartado 2.4.3), presenta una baja reflectancia, especialmente en las regiones de infrarrojo cercano e infrarrojo medio del EEM.

Existen en la literatura distintos procedimientos para identificar zonas inundadas, basados en la baja reflectividad del agua en el infrarrojo, de los cuales los más usados son:

i. Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI, por sus siglas en inglés). Es útil para discriminar aguas que no tengan grandes concentraciones de sólidos o “blooms” de algas (acumulación de la población de algas en un sistema acuático). También ha sido frecuentemente relacionado con el contenido de humedad de la vegetación (Ceccato, Flasse, Tarantola, Jacquemoud y Grégoire, 2001). El NDWI maximiza la reflectividad del agua usando para ello la banda del

infrarrojo cercano y la absorción de la vegetación y del suelo adyacente en la banda del verde de la región del visible (McFeeters, 1996):

$$\boldsymbol{NDWI} = \frac{(\boldsymbol{R_V} - \boldsymbol{R_{IRC}})}{(\boldsymbol{R_V} + \boldsymbol{R_{IRC}})} \quad (5)$$

Donde R_{IRC} es la reflectancia en infrarrojo cercano, y R_V es la reflectancia en verde visible.

Los valores del NDWI varían entre -1 y $+1$, asociando valores positivos para las superficies con agua o húmedas y cero o negativo para el suelo y la vegetación terrestre. Adicionalmente, los valores positivos del NDWI pueden relacionarse con la vegetación fotosintéticamente activa por el alto contenido de agua.

Cabe mencionar que en la literatura se puede encontrar el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) que utiliza la reflectividad en el infrarrojo medio e infrarrojo cercano y fue propuesto por Gao (1995):

$$\boldsymbol{NDWI_{Gao}} = \frac{(\boldsymbol{R_{IRC}} - \boldsymbol{R_{IRM}})}{(\boldsymbol{R_{IRC}} + \boldsymbol{R_{IRM}})} \quad (6)$$

Este índice se usa principalmente para las estimaciones del contenido de agua de la vegetación.

ii. Modificación al Índice de Agua de Diferencia Normalizada (MNDWI). Este índice surgió como respuesta a la incapacidad del NDWI para separar territorios artificializados (espacios conformados por edificaciones y los espacios adyacentes a la infraestructura edificada) del agua (Ariza et al., S.F.). Por este motivo Xu (2006) propuso modificar el NDWI remplazando en la ecuación (5) la

reflectancia en el infrarrojo cercano (R_{IRC}) por la reflectancia en el infrarrojo medio (R_{IRM}):

$$\boldsymbol{NDWI = \frac{(R_V - R_{IRM})}{(R_V + R_{IRM})}} \quad (7)$$

Los valores de este índice varían entre -1 y $+1$, dónde los valores mayores a cero corresponden a cuerpos de agua. Es importante mencionar que el agua tendrá valores más altos de MNDWI que NDWI ya que absorbe más energía en el infrarrojo medio que en infrarrojo cercano; la tierra urbanizada tendrá valores negativos de MNDWI, igual que el suelo y la vegetación (Xu, 2006).

iii. Índice de Agua ICEDEX. El índice ICEDEX es utilizado por el CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas) para mapear aguas continentales y es uno de los que presenta valores más estables, siendo uno de los menos sensibles a la influencia de vegetación o a la presencia de material en suspensión (sedimentos, algas, etc.) (Ángel-Martínez, 1994). Este índice se obtiene a partir de las relaciones entre las reflectancias en el rojo (R_R), el infrarrojo cercano (R_{IRC}) y el infrarrojo medio (R_{IRM}):

$$\boldsymbol{ICEDEX = \left(\frac{R_{IRC}}{R_R}\right) - \left(\frac{R_{IRC}}{R_{IRM}}\right)} \quad (8)$$

El valor de referencia establecido para discriminar la superficie inundada es el cero, los valores por encima de cero son considerados agua (Ji, Zhang y Wylie, 2009).

Es importante mencionar, que los índices diseñados para discriminar los cuerpos de agua en ocasiones no funcionan correctamente (Domínguez, 2002; Bustamante, Díaz-Delgado y Aragonés, 2005). Domínguez (2002), Martínez, Palà y Arbiol (2003) sugieren como el mejor método el análisis del histograma de la banda del infrarrojo cercano. Mientras que el análisis radiométrico de aguas con distintos niveles de turbidez

realizado por Lee, Kim, Yun y Shin (2001) demuestra que la banda del infrarrojo medio es la menos sensible a la carga de sedimentos del agua y por lo tanto la que tiene una mejor capacidad para delinear el límite agua-suelo en aguas turbias.

2.4.9 Percepción remota en el estudio de los humedales

En este apartado se presenta una revisión de la literatura sobre el uso de las técnicas de PR espacial (satelital) en los estudios de los humedales, debido a que el objetivo principal de esta tesis es evaluar los cambios espacio-temporales de los humedales a lo largo del cauce principal del río Colorado mediante el procesamiento y análisis de imágenes satelitales.

En las últimas décadas las técnicas de PR satelital han sido eficazmente usadas como una herramienta metodológica y tecnológica en una gran variedad de estudios sobre la superficie terrestre, permitiendo identificar, clasificar y monitorear una gran variedad de ecosistemas, entre ellos los humedales (Cabello y Paruelo, 2008; Acosta-Velázquez et al., 2010; Cerdeira-Estrada et al., 2012 y Flores, Caravantes, Peña y Patricio, 2012).

La PR satelital ofrece ventajas para colectar y analizar información espacial relevante para el seguimiento de variables ambientales relacionadas con la estructura, dinámica y usos de los humedales en diferentes intervalos de tiempo y espacio (Green, Mumby, Edwards y Clark, 1996; O'Regan, 1996; Mumby y Edwards, 2000). Las técnicas de PR satelital es una importante herramienta no solo para identificación, mapeo de los humedales y el monitoreo de las respuestas de estos ecosistemas a las acciones naturales y antropogénicas, sino también permite una planificación de un adecuado manejo de los humedales para la conservación de los mismos.

Landsat MSS (Multi Spectral Scanner, en inglés), Landsat TM (Thematic Mapper, en inglés) son los sensores satélites más importantes que se han utilizado para los estudios de los humedales, ya que las características técnicas de las bandas de los sensores de estos satélites permiten la discriminación de superficies inundadas y de vegetación. Otros sistemas satelitales que se han utilizado son la constelación de satélites SPOT (Sistema Probatorio de Observación de la Tierra o Satélite Para la Observación de la Tierra), el radiómetro avanzado de muy alta resolución, AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer, en inglés), satélites de percepción remota

de India, IRS (Indian Remote Sensing, en inglés), y sistemas de radar, como satélites europeos de percepción remota, ERS 1/2, (European Remote Sensing, en inglés), y TerraSAR-X (Rundquist, Narumalani, Ram y Narayanan, 2001; Ozesmi y Bauer, 2002; Oyola, 2009; Tiner, Lang y Klemas, 2015).

Existe un considerable número de estudios de los humedales mediante las técnicas de PR satelital en diferentes partes del mundo. Algunos ejemplos de estos estudios se presentan a continuación.

En 1990 Wakelin utilizó, además de fotografía aérea y datos generados en campo, imágenes Landsat (Landsat MSS y TM) para el mapeo y la caracterización de los humedales en la parte noroeste de los EUA. El trabajo realizado por Hewitt (1990) demostró la utilidad de las imágenes Landsat TM, por sus características espectrales y espaciales, para el inventario de ecosistemas ripariános. Elvidge, Miura, Jansen, Groeneveld y Ray (1998) utilizaron imágenes Landsat MSS para obtener tendencias del vigor de la vegetación en humedales. Para determinar el estado de salud de regiones de humedales de la zona oeste de Puerto Rico. Colón-Ortiz (2004) utilizó imágenes Landsat TM e IKONOS, mediante índice de vegetación y clasificación no supervisada. Xin (2004) estimó las condiciones hidrológicas de la vegetación emergente de los humedales en Lake Baiyang, China, utilizando el índice NDVI, datos de nivel de agua y la temperatura de la superficie. Baker et al., (2006) utilizaron las imágenes multitemporales de Landsat ETM (Enhanced Thematic Mapper, en inglés), junto con datos adicionales de topografía y tipos de suelo, y diversos algoritmos de clasificación para el mapeo de los humedales y zonas ripiaras en Gallatin Valley, suroeste de estado de Montana, EUA. Jones et al., (2009) evaluaron la capacidad de los sensores remotos satelitales para realizar un inventario, clasificación y monitoreo de los humedales usando diferentes métodos y datos. El análisis fue realizado para 21 países e involucró 50 humedales. En este estudio, las imágenes de los sensores Landsat TM/ETM+, SPOT-5, Quickbird y Radar de Apertura Sintética (Synthetic Aperture Radar (SAR), en inglés), junto con el número muy limitado de datos in-situ, han sido utilizadas. El estudio mostró que las técnicas de percepción remota tienen la capacidad para proporcionar la información para la evaluación y el monitoreo del estado de los humedales en diferentes partes del mundo. Rebelo, Finlayson y Nagabhatla (2009) cuantificaron las

condiciones de los humedales a lo largo de la costa occidental de Sri Lanka usando los datos de Landsat TM del periodo de 1992 a 2002. También identificaron, mapearon y clasificaron los humedales utilizados para agricultura en ocho países de sureste de África usando los datos de Landsat TM y ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, en inglés). Rebelo y Finlayson (2010) utilizaron los datos del sistema de radar PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar, en inglés) para obtener las características temporales y espaciales de los humedales de los países del sureste de África.

Estudios sobre los humedales en México que usaron las técnicas de PR satelital:

- Salinas et al., (2002). El objetivo de este trabajo fue identificar y clasificar los humedales naturales o artificiales en el estado de Tamaulipas, México, de importancia para las aves acuáticas migratorias. El inventario de humedales se basó en el análisis de siete imágenes Landsat ETM+ del año 2000, así como en datos de muestreo de 261 sitios visitados durante el 2001. Se generaron los mapas base y se aplicó el análisis de sistemas de información geográfica (SIG) para clasificar estos cuerpos de agua.
- Berlanga-Robles, Ruíz-Luna y Trujillo-Batiz (2008). El trabajo presenta un inventario de los humedales costeros del sistema Altata-Ensenada del Pabellón, Sinaloa, México, localizado en el Golfo de California, realizado a partir de la clasificación no supervisada de imágenes Landsat TM del 2005 y la digitalización de datos auxiliares. Como resultado se obtuvo el mapa temático de los diferentes humedales del sistema a partir del cual se estimaron métricas del paisaje con el fin de describir los patrones espaciales, incluyendo extensión, complejidad y conectividad.
- Cervantes-Escobar, Ruíz-Luna y Berlanga-Robles (2008). Se determinó la distribución y extensión de manglares del noroeste de México, proponiendo indicadores cualitativos y cuantitativos sobre su estado actual. La evaluación se basó en el análisis digital de imágenes satelitales y trabajo de campo realizado en cuatro de los cinco estados que limitan al Golfo de California, excluyendo a Baja California debido a lo limitado de la distribución y abundancia de este recurso en esta entidad. Se utilizaron imágenes Landsat MSS de 1973 y Landsat TM del 2005, a partir de las que se derivó el índice de NDVI, y diversas métricas del paisaje, para conocer la condición vegetal, el

grado de fragmentación del manglar y definir un sistema de puntaje para valorar la condición ambiental de estos ecosistemas de humedales costeros.

- Acosta-Velázquez et al., (2010). En este trabajo se estimó la distribución actual y la extensión de los manglares, que son los ecosistemas de humedales costeros, en México, con imágenes de satélite de alta resolución y trabajo de campo. Se utilizaron 134 imágenes SPOT-5 del 2005-2006 para el mapeo de la distribución de los manglares. Como resultado se obtuvo el primer mapa temático de los manglares nacional a escala 1:50,000, con una exactitud global del 90 %. La superficie total estimada de los manglares fue de 770,057 ha.
- Brena-Zepeda, Castillo-Romano, Castillo-Campos, Pale-Pale y Moreno-Casasola (2012). El estudio tuvo dos objetivos: 1.- elaborar dos mapas de uso de suelo y de vegetación en la cuenca del río Papaloapan, ubicada al sureste de México (parte norte de Oaxaca, parte sur de Puebla y parte centro de Veracruz), basándose en imágenes Landsat MSS de 1979 y Landsat ETM+ del año 2003. De esta manera se obtuvieron los cambios en las coberturas de vegetación y uso de suelo en un intervalo de 25 años. La comparación entre coberturas de 1979 y 2003 mostró cambios negativos en la clase hidrófila, cuerpos de agua y forestal, lo que constituye una seria amenaza a la sustentabilidad de los humedales. 2.- elaboración del inventario de los humedales de la cuenca del río Papaloapan y del mapa detallado de uso de suelo y vegetación para el humedal Laguna de Alvarado (el humedal más grande de la cuenca).
- Estrada, Barba y Ramos (2013). El trabajo presenta la cuantificación de la cobertura de los humedales y sus cambios temporales (temporadas de mínima y máxima inundación) en la cuenca del río Usumacinta, en el municipio de Balancán, Tabasco, México, mediante el análisis visual de las imágenes Landsat TM y el uso del sistema de información geográfica (SIG).

Algunos de los estudios realizados en los humedales del Delta del río Colorado, son:

- Mexicano (2004). En este trabajo se realizó un análisis retrospectivo de los humedales del Delta del río Colorado mediante imágenes satelitales Landsat MSS y TM en el periodo de 1972-2002 y su relación con el flujo volumétrico a través de la frontera EUA-México, mediante el índice NDVI y el método de segmentación del histograma de

la banda 5 TM. El trabajo concluyó que las variaciones en el flujo volumétrico del río Colorado tienen un impacto directo en las áreas de inundación y de vegetación.

- Mexicano, Glenn, Hinojosa-Corona, García-Hernández e Hinojosa-Huerta (2013a): En este trabajo se estudió el desarrollo de la Ciénaga de Santa Clara, desde su creación en 1977 hasta el 2011 para determinar su sostenibilidad en términos de vegetación, hidrología y valor del hábitat. Utilizaron el NDVI mediante imágenes Landsat desde 1975 al 2011 para determinar el área e intensidad de la vegetación y la evapotranspiración para la construcción de un balance hídrico en conjunto con datos hidrológicos, estudios de campo y otras fuentes de información del humedal. Los resultados obtenidos fueron que el área aumentó en los años 1978-95 y ha sido constante, el NDVI más alto se registró en 1995, los flujos de agua hacia el humedal han sido estables y alrededor del 37 % del agua de entrada se consume en evapotranspiración. La sostenibilidad del humedal se atribuye a: las tasas de flujo de entrada estables; salinidades dentro del límite de tolerancia de la vegetación dominante; y enrojecimiento de las mareas, que mantiene al humedal como un sistema abierto.
- Mexicano, Nagler, Zamora-Arroyo y Glenn (2013b). En este trabajo se realizó mapas de vegetación de la Ciénaga de Santa Clara, un humedal antropogénico que se encuentra en el Delta del río Colorado en México; con imágenes de alta resolución de los satélites Quickbird y WorldView-2. Las imágenes que trabajaron fueron antes, durante y después de una prueba de funcionamiento de la Planta Desalinizadora de Yuma. Además utilizaron imágenes MODIS para el cálculo de NDVI, para determinar los factores que controlan la densidad de la vegetación durante los años 2000-2011. Determinaron que el factor más importante era el fuego, mientras que el segundo factor fue la tasa de flujo de agua de drenaje agrícola de los EUA y un tercer y adicional factor fue la salinidad, según lo determinado en experimentos de invernadero. La conclusión fue de que cualquier reducción en el flujo del agua da lugar a una disminución en la densidad del follaje en el humedal.
- Glenn et al., (2013): En este trabajo se realizó una estimación de la evapotranspiración y otros componentes del balance hídrico para la Ciénaga de Santa Clara, un humedal antropogénico que se encuentra en el Delta del río Colorado en México. El estudio se realizó en el periodo 2009-2011 antes, durante y después de un periodo de prueba de la Planta Desalinizadora de Yuma en los EUA., que desvió el

agua del humedal y fue reemplazado con salmuera de la operación de desalación. Se utilizaron un algoritmo de teledetección para estimar la evapotranspiración a partir de datos meteorológicos y valores de NDVI de imágenes MODIS. Los resultados obtenidos fueron que las estimaciones medias anuales de la evapotranspiración varió entre 2.6 y 3.0 mm d^{-1}, o de 50 a 60 % de referencia la evapotranspiración. El agua registró una salinidad media de 2.6 gL^{-1} TDS y la media de la salinidad en el humedal fue 3.73 gL^{-1} TDS durante el período de estudio.

Las técnicas de percepción remota son ampliamente usadas en los Inventarios Nacionales de Humedales en diferentes países. Por ejemplo, en EUA la entidad encargada del Inventario Nacional de Humedales (INH) es el Departamento de Pesca y Vida Silvestre (US Fish and Wildlife Service, FWS, por sus siglas en inglés). Desde 1970 dicho departamento opera un programa para hacer el inventario de humedales de los EUA en el que se utilizaban fotografías aéreas y en la actualidad se utilizan imágenes satelitales, además de trabajo en campo. El programa tiene como finalidad proporcionar al público la información sobre el grado y estado de los humedales de la nación. El INH de los EUA puede ser consultado en línea: http://www.fws.gov/wetlands/Data/Mapper.html.

En México, desde 1991, DUMAC (Ducks Unlimited de México) ha llevado a cabo el proyecto “Inventario y Clasificación de Humedales en México”, utilizado imágenes digitales de sensores Landsat TM (satélite Landsat 5) y ASTER para clasificar y cuantificar los humedales del país. Para los propósitos de este proyecto DUMAC utilizó como base la “Clasificación de Humedales y Hábitats de Aguas Profundas”, del Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos (Cowardin, Carter, Golet y LaRoe, 1979). Esta clasificación fue utilizada, por lo que al tener un sistema de clasificación de estos recursos bajo el mismo esquema, se obtienen muchos beneficios en la modelación de grandes espacios o eco-regiones, compartidos por ambos países, para la conservación y manejo de estos recursos. A la fecha (más de 20 años desde el inicio), el proyecto ha cubierto la mayoría de los humedales costeros de México, tanto los del Golfo y Caribe, como los de la zona costera del Pacífico, así como los humedales del centro de México y los principales humedales del Altiplano Norte. El proyecto ha generado una serie de productos, incluyendo mapas temáticos de

diferentes escalas y base de datos que contiene la información para cada polígono de humedales y tierras altas en cuanto a localización, área total, clase a la que pertenece, etc. La información del “Inventario y Clasificación de Humedales en México”, pretende apoyar en la toma de decisiones en materia de manejo, conservación y restauración de los humedales en México, así como sensibilizar a la población en general, mediante el acceso a la información geográfica que se ha generado durante el proyecto. Actualmente, la implementación de un servidor de mapas en línea: http://www.dumacservidordemapas.org/, facilita el acceso a la información geográfica del “Inventario y Clasificación de Humedales en México”.

En 2012, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en coordinación con el Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de México (UNAM), realizaron el “Inventario Nacional de Humedales” basado en imágenes satelitales, fotografías aéreas, cartografía digital, información estadística, estudios e inventarios ya realizados. El proyecto aún está vigente, sin embargo, algunos de sus resultados pueden consultarse en línea: http://sigagis.conagua.gob.mx/Humedales/. Se cuenta con el mapa del INH con un enfoque multiescalar (1:250,000 nivel nacional, 1:50,000 nivel cuencas y 1:20,000 nivel humedal). El INH, escala 1:250,000, cuenta con información que permite ubicar, identificar y tipificar los objetos que lo conforman, en este caso los humedales, por lo que el producto del inventario son mapas que muestran la ubicación, tamaño, forma y tipo de humedales en una localidad geográfica, así como la superficie cubierta por cada tipo de humedal. De esta manera, el inventario auxilia en el desarrollo e implementación de las políticas que giran alrededor de dichos sistemas.

3. Descripción de los datos

3.1. Datos hidrológicos

El volumen de agua que pasa por un río u otra superficie, medido en una unidad de tiempo se conoce como caudal o flujo volumétrico. El río Colorado cuenta con diversas estaciones hidrométricas que miden este flujo a lo largo del cauce principal y de los tributarios.

La Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA o IBWC, por sus siglas en inglés) tiene la responsabilidad de la aplicación de los tratados de límites y aguas entre los Estados Unidos de América (EUA) y México y de la solución de las diferencias que puedan surgir durante dicha aplicación. Además CILA lleva a cabo el monitoreo de los flujos volumétricos de los ríos transfronterizos que comparten México y EUA (río Colorado, río Tijuana y río Grande o Bravo).

Para este trabajo, los datos del flujo volumétrico del agua del río Colorado que entra a México se obtuvieron de la estación Lindero Internacional Sur (Southerly International Boundary, ID: 09-522200), que se encuentra a la altura del puente de San Luis, donde el río Colorado separa a Baja California, México de Arizona, EUA (Figura 6). La estación Lindero Internacional Sur (ID: 09-522200) es la última estación hidrométrica sobre el río. Los datos que proporciona CILA son datos diarios del flujo en metros cúbicos por segundo desde los años 50´s hasta el 2011 (http://www.ibwc.state.gov/wad/DDQSIBCO.HTM).

Los datos de flujo volumétrico a lo largo del cauce principal del río Colorado en la parte de EUA se obtuvieron de la base de datos de USGS Water Data for the Nation (http://waterdata.usgs.gov/nwis). La base de datos mencionada cuenta con los datos de estaciones localizadas en 50 entidades de los EUA, que obtienen información de diversos parámetros (flujo volumétrico, temperatura, distribución, composición química, precipitación y etc.) tanto de aguas superficiales como de aguas subterráneas de los principales ríos, lagos, embalses (acumulación de agua producida por una obstrucción), manantiales y pozos. Esta base de datos contiene datos históricos y actuales.

Los datos del flujo volumétrico medidos a lo largo del cauce principal del río Colorado en la parte de EUA se obtuvieron de las siguientes estaciones: ID: 09-521100, 09-523000, 09-429010, 09-427520, 09-423000, 09-180500 y 09-163500 (Figura 6). Los datos que proporciona la USGS Water Data for the Nation son datos diarios del flujo en pies cúbicos por segundo desde los años 20´s (dependiendo de la estación) hasta el 2011.

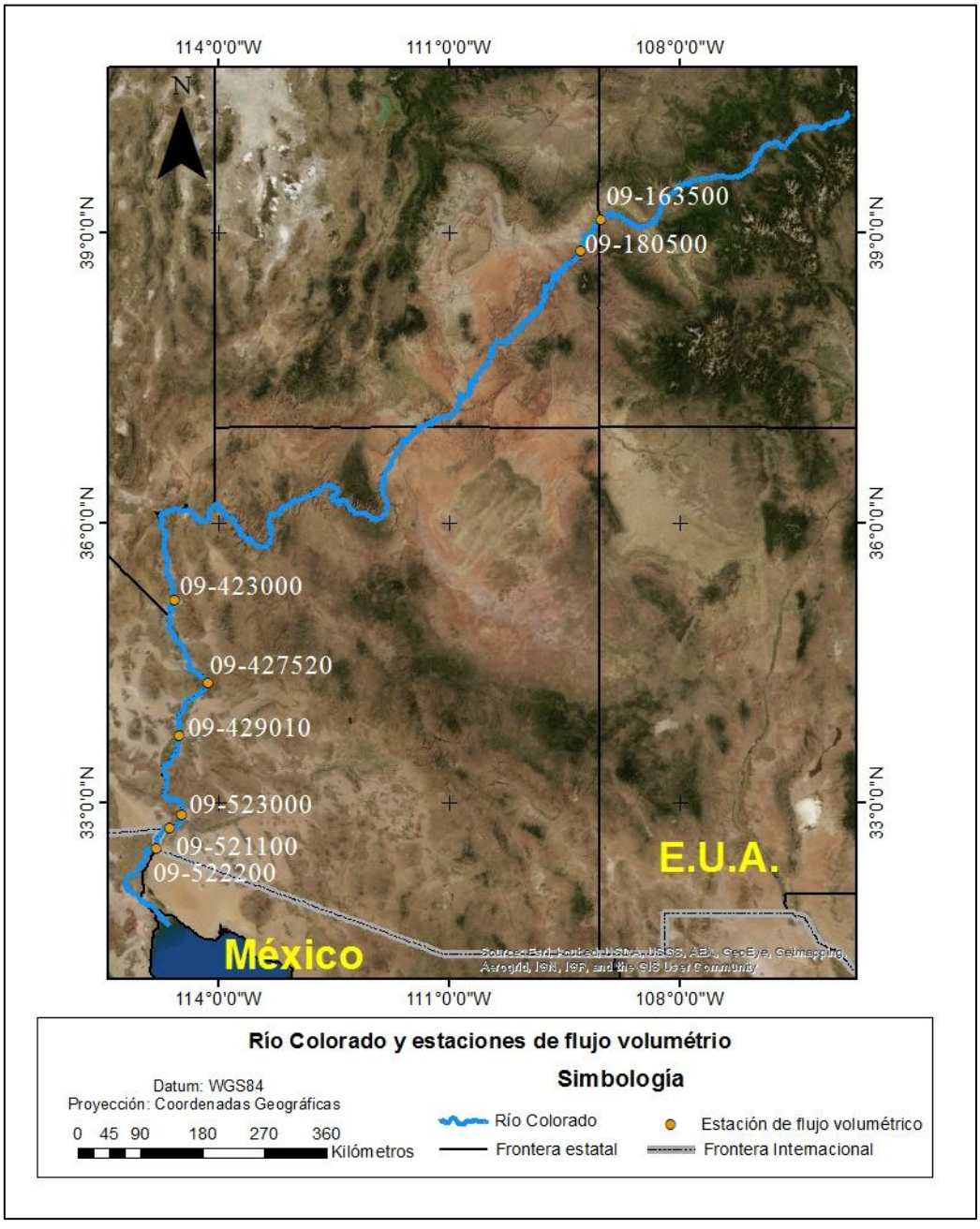


Figura 6 . Ubicación geográfica de las estaciones hidrométricas. (Imag en de fondo: World Imagery recuperada de: http://www.arcgis.com/home/item.html?id=10df2279f9684e4a9f6a7f08febac2a9).

3.2. Imágenes Landsat

La constelación de satélites Landsat (LAND = Tierra y SAT = satélite), que inicialmente se llamaron ERTS (Earth Resources Technology Satellites, por sus siglas en inglés), fue la primera misión de los EUA para el monitoreo de los recursos terrestres. La forman 8 satélites de los cuales sólo se encuentran activos el Landsat 7 y el Landsat 8. Su mantenimiento y operación está a cargo de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA, por sus siglas en inglés) en tanto que la producción y comercialización de las imágenes depende del Servicio Geológico los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés).

El primer satélite de esta constelación, Landsat 1 (denominado en un principio ERTS-1), fue puesto en órbita el 23 de julio de 1972 y desde entonces otros siete satélites más llegaron al espacio en diferentes momentos (Tabla 5). En conjunto, los satélites Landsat, han adquirido millones de imágenes (Mena, 2014) y que en la actualidad son de libre disposición. Entre los satélites de recursos, el programa Landsat puede considerarse el más productivo, puesto que ha proporcionado datos multiespectrales de resolución media a una amplia gama de usuarios durante más de 4 décadas, lo que representa el registro más largo de información sobre la superficie terrestre obtenido de forma global y repetitiva desde el espacio. Esta base de datos Landsat han permitido la modelación temporal de las tendencias en la cobertura y uso del suelo (Flores, et al., 2012).

Los tres primeros satélites Landsat (1, 2 y 3) fueron construidos a partir de una modificación del satélite meteorológico Nimbus. Tenían una órbita circular, casi polar, sincrónica con el Sol, con una inclinación cerca de 99°, a una altura aproximada de 910 km. Estos satélites realizaban una órbita completa alrededor de la Tierra cada 103 minutos, cubriendo 14 fajas de la superficie terrestre por día. Cada 18 días los satélites pasaban sobre la misma región de la superficie terrestre. Los siguientes cinco satélites (Landsat 4 - 8) sufrieron algunas modificaciones tanto en la forma de la plataforma como en sus características orbitales. La altitud fue modificada a 705 Km, el tiempo de revisita pasó a 16 días, el período orbital a 99 minutos y la inclinación de órbita a 98º aproximadamente.

Tabla 5. Características de los satélites que conforman la constelación Landsat.

Satélite	Fecha de lanzamiento	Fin de Operación	Altitud (km)	Periodo (días)	Tipo de Sensor	Resolución espectral **(µm)**	Resolución espacial (m)
Landsat 1	23 jul 1972	06 ene 1978	910	18	MSS	(4): 0.5-0.6 (5): 0.6-0.7 (6): 0.7-0.8 (7): 0.8-1.1	79 79 79 79
					RBV	(1): 0.48-0.57 (2): 0.58-0.68 (3): 0.70-0.83	80 80 80
Landsat 2	22 ene 1975	25 feb 1982	910	18	Idéntico al Landsat 1		
Landsat 3	05 mar 1978	31 mar 1983	910	18	MSS	(4): 0.5-0.6 (5): 0.6-0.7 (6): 0.7-0.8 (7): 0.8-1.1 (8): 10.4-12.6	79 79 79 79 240
					RBV	(1): 0.5-0.75	40
Landsat 4	16 jul 1982	14 dic 1993	705	16	MSS	(4): 0.5-0.6 (5): 0.6-0.7 (6): 0.7-0.8 (7): 0.8-1.1	82 82 82 82
					TM	(1): 0.45-0.52 (2): 0.52-0.60 (3): 0.63-0.69 (4): 0.76-0.90 (5): 1.55-1.75 (6): 10.4-12.5 (7): 2.08-2.35	30 30 30 30 30 120 30

Landsat 5	01 mar 1984	18 nov 2011	705	16	Idéntico al Landsat 4		
Landsat 6	03 oct 1993	Operación fallida	705	-	ETM+	Operación fallida	
Landsat 7	15 abr 1999	En operación	705	16	ETM+	(1): 0.45-0.52 (2): 0.52-0.60 (3): 0.63-0.69 (4): 0.76-0.90 (5): 1.55-1.75 (6): 10.4-12.5 (7): 2.08-2.35 (8): 0.52-0.90	30 30 30 30 30 60 30 15
Landsat 8	11 feb 2013	En operación	705	16	OLI	(1): 0.43-0.45 (2): 0.45-0.52 (3): 0.52-0.60 (4): 0.63-0.68 (5): 0.85-0.89 (6): 1.56-1.66 (7): 2.10-2.30 (8): 0.50-0.68 (9): 1.36-1.39	30 30 30 30 30 30 30 15 30
					TIRS	(10): 10.6-11.2 (11):11.5-12.50	120 120

Los satélites Landsat llevan a bordo diferentes sensores. Su evolución buscó siempre captar más información de la superficie terrestre, con mayor precisión y detalle, de ahí las mejoras radiométricas, geométricas y espaciales que se incorporaron a los sensores pasivos. En lo que a equipamiento se refiere, el programa Landsat puede ser estructurado en tres generaciones (Naranjo, 2012). La primera generación está constituida por los satélites Landsat 1, 2 y 3 cuyo equipamiento estaba formado por un explorador de barrido multiespectral MSS (Multispectral Scanner, por sus siglas en inglés) y un conjunto de cámaras Vidicon RBV (Return Beam Vidicon, por sus siglas en inglés). Los satélites de la segunda generación Landsat (4 y 5) mantienen el sensor MSS para garantizar la continuidad de los datos anteriores, eliminan las cámaras RBV e incorporan un nuevo sensor denominado TM (Thematic Mapper, por sus siglas en inglés) diseñado para la cartografía temática que proporciona datos de mayor resolución espacial, espectral y radiométrica. Con el lanzamiento del Landsat 7 (ya que el 6 no llegó a funcionar) entra una versión mejorada de la segunda generación, con la incorporación de una versión actualizada del TM denominado ETM (Enhanced Thematic Mapper, por sus siglas en inglés). El sensor MSS fue eliminado en Landsat 7. Por último, el Landsat 8 que forma parte de la tercera generación, posee los sensores OLI (Operational Land Imager, por sus siglas en inglés) y TIRS (Thermal Infrared Sensor, por sus siglas en inglés) (Naranjo, 2012). En la tabla 5 se resume la información más relevante de cada uno de los satélites de la constelación Landsat y las características más importantes de sus sensores.

Las imágenes obtenidas por los distintos sensores son transmitidas a una red de estaciones que están distribuidas en todo el planeta, con la finalidad de no saturar la memoria del satélite.

Cada imagen tiene un número de identificación, por ejemplo: LXSPPPRRRYYYYDDDGSIVV, que se basa en la siguiente nomenclatura: L= Landsat, X= Sensor, S= Satélite, PPP= Path, RRR= Row, YYYY= Año, DDD= Día de año (1 - 366), GSI= Identificador de la estación en Tierra, VV= Versión.

Al ejecutar un proyecto que involucre el uso de las imágenes de satélite de la constelación Landsat, es necesario identificar las imágenes que cubren el área de estudio. Para este propósito se emplea el Sistema de Referencia Mundial (WRS, por

sus siglas en inglés). El WRS provee un esquema de indexación para el patrón de repetición de la trayectoria orbital terrestre seguida por las plataformas espaciales Landsat. Este sistema de indexación permite al usuario obtener la ubicación de una imagen satelital obtenida por los satélites Landsat de cualquier parte del planeta simplemente especificando el par ordenado de la escena (imagen) que está definido por el PATH (órbita aproximada del satélite) y ROW (centro nominal de la escena o imagen). El WRS ha demostrado ser muy útil para catalogar, referenciar y permitir el uso continuo de las imágenes transmitidas por los sensores Landsat. El WRS-1 fue diseñado para las misiones Landsat 1, 2, y 3 sobre los 18 días de su repetitivo ciclo orbital y la altura de la órbita de aproximadamente 910 km. El actual WRS-2 fue diseñado para la órbita a 705 km usada para las últimas cinco misiones (Landsat 4 - 8), los cuales se mueven en una órbita más baja y con un ciclo repetitivo orbital menor (16 días).

El número de escenas para cubrir el área de estudio es de 13 para WRS-1, y 12 para WRS-2 (Tabla 6), geográficamente se pueden observar en la figura 7. La necesidad de adquirir tales escenas está ligada a los objetivos del proyecto de tesis.

Tabla 6. Path/Row para WRS-1 y 2 que cubren el área de estudio .

Path /Row WRS-1	37/32	39/33	41/35	42/35
	37/33	39/34	41/36	
	38/32	40/34	41/37	
	38/33	40/35	41/38	

Path /Row WRS-2	34/32	36/34	39/35
	35/32	37/34	38/36
	35/33	37/35	38/37
	36/33	38/35	38/38

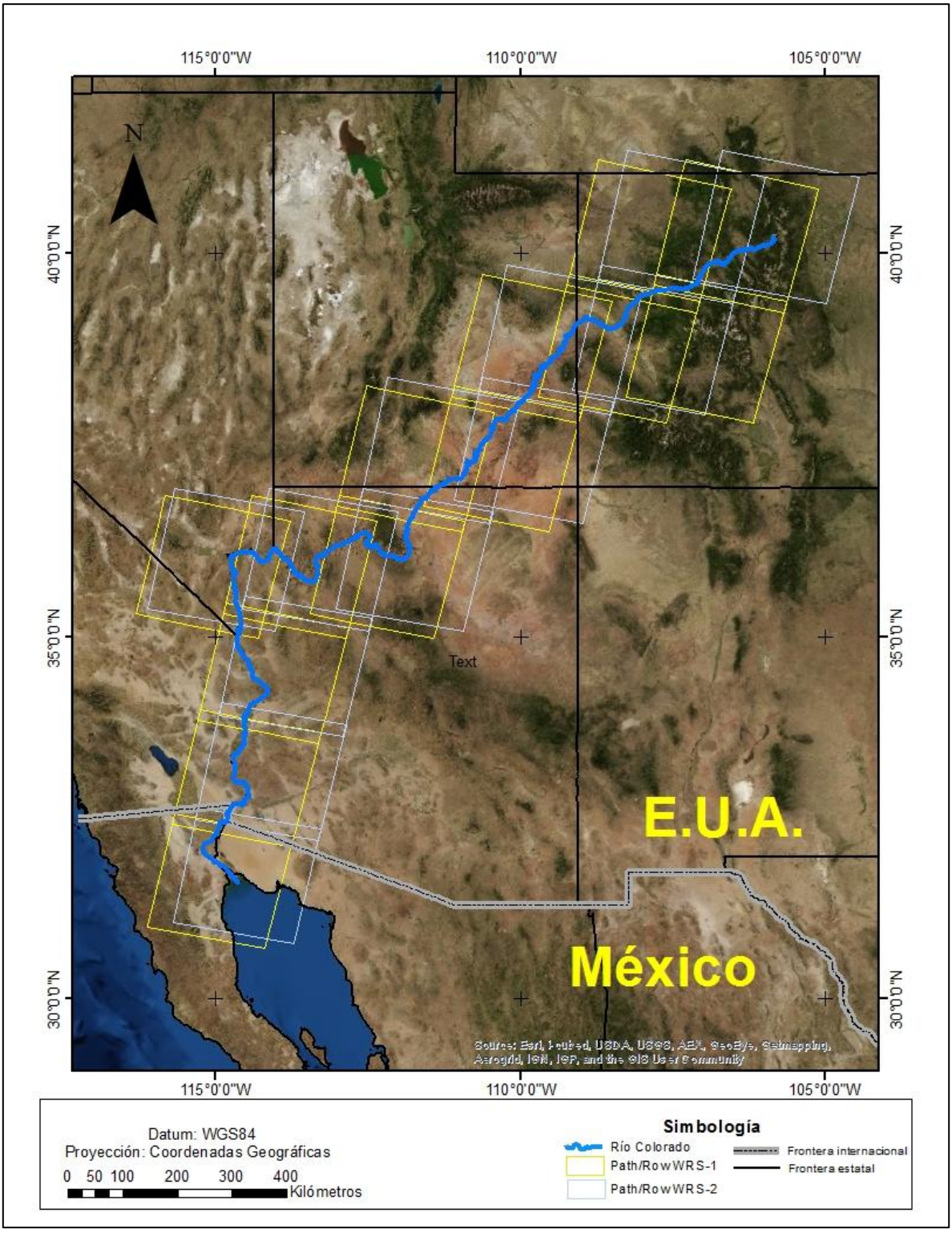


Figura 7. Path/Row que cubren el área de estudio con los sistemas de referencia WRS-1 (color amarillo) y WRS -2 (color azul) (Imagen de fondo: World Imagery recuperada de: http://www.arcgis.com/home/item.html?id=10df2279f9684e4a9f6a7f08febac2a9).

4. Método s

El planteamiento metodológico de este estudio se ha llevado a cabo desde dos puntos de partida relacionados con los tipos de datos que se han utilizado:

1. Análisis de datos hidrológicos
2. Análisis de las imágenes Landsat
   - 2.1 Selección y estadística de las imágenes
   - 2.2 Pre-procesamiento de las imágenes
   - 2.3 Análisis de las imágenes Landsat 5 TM de dos décadas diferentes
   - 2.4 Análisis de los cambios temporales de la hidrología superficial en las zonas de estudio seleccionadas
   - 2.5 Análisis de los cambios temporales de la cobertura vegetal de los humedales en las zonas de estudio seleccionadas
3. Análisis de correlación

4.1. Análisis de datos hidrológicos

Se analizaron los datos de flujo volumétrico de diversas estaciones hidrométricas a lo largo del cauce principal del río colorado. La descripción detallada de los datos se presentó en el subcapítulo 3.1. Los datos provenían de dos diferentes instituciones: USGS Water Data for the Nation (http://waterdata.usgs.gov/nwis) y de la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA), y estos se encontraban en diferentes unidades.

De CILA se obtuvieron los datos del flujo volumétrico diario en m^3/s de la estación Lindero Internacional Sur (ID: 09-522200) para el periodo de 1950 al 2011. Los datos del flujo volumétrico medidos a lo largo del cauce principal del río Colorado en la parte de EUA en siete estaciones hidrométricas (ID: 09-521100, 09-523000, 09-429100, 09-427520, 09-423000, 09-1800500 y 09-163500) se obtuvieron de la base de datos de USGS Water Data for the Nation. Estos datos vienen en ft^3/s y son promedios mensuales.

A partir de los datos originales se calculó el flujo volumétrico promedio anual para cada estación para los últimos 40 años (1972-2011). Con el fin de tener los datos

provenientes de ambas instituciones en las mismas unidades, los datos de flujo volumétrico promedio anual de las estaciones de USGS Water Data for the Nation se convirtieron de ft^3/s a m^3/s. Un pie cúbico (ft^3) equivale aproximadamente a 0.028316846592 metros cúbicos (m^3). Se optó por trabajar en metros cúbicos por segundo (m^3/s), por pertenecer al Sistema Internacional de Unidades (SI).

La serie de tiempo de los valores de flujo volumétrico promedio anual en cada estación durante los años 1972-2011 se graficó con la finalidad de analizar la tendencia del flujo volumétrico anual durante el periodo analizado e identificar los cambios aleatorios (disminución y/o aumento) de éste. Se interpretaron los cambios aleatorios del flujo volumétrico promedio anual desde el punto de vista de sus causas, como la construcción y llenado de presas y lagos artificiales, y eventos meteorológicos extraordinarios (por ejemplo, lluvias fuertes, anómalas, o años de sequía). Los resultados de análisis e interpretación de los datos hidrológicos se compararon con los resultados del análisis e interpretación de las imágenes satelitales (imágenes Landsat).

4.2. Análisis de las imá genes Landsat

4.2.1 Selecció n y estadística de las imágenes

Es importante mencionar que se realizó la selección de las imágenes para este trabajo de tesis dos veces, con objetivos diferentes.

Primero, se realizó la selección de imágenes del Landsat 5 TM de dos décadas diferentes para toda el área de estudio. Dichas imágenes se seleccionaron con el propósito de identificar las zonas de humedales con mayores cambios en cobertura vegetal e hidrología superficial. Para realizar esta selección, se realizó un análisis estadístico con la finalidad de conocer el total de imágenes disponibles para el periodo de 1984 - 2011. Se optó por utilizar en esta etapa solo las imágenes del satélite Landsat 5 TM para analizar las imágenes de dos décadas diferentes provenientes del mismo sensor. El satélite Landsat 5 TM tiene el archivo de imágenes de mayor cobertura temporal, comparado con otros satélites de la misma constelación Landsat.

El USGS Global Visualization Viewer (Visor Global del Servicio Geológico de los Estados Unidos, http://glovis.usgs.gov/) es una herramienta rápida y fácil para la

búsqueda y descarga de imágenes de satélite de diversas misiones, incluyendo la constelación de satélites Landsat, y datos de fotos aéreas. En su mayoría la información disponible en este sitio web es de uso libre y gratuito con fines tanto comerciales como educativos para usuarios de todo el mundo. Poseen imágenes muy antiguas y datos actuales de gran parte del mundo. La búsqueda y descarga de las imágenes Landsat para este trabajo de tesis se realizó mediante este sitio web.

Al momento de seleccionar imágenes satelitales para los propósitos específicos de cada estudio, hay que tener en cuenta que no todas las imágenes disponibles para un área determinada tienen potencial suficiente para ser consideradas aptas para su utilización. Existe una serie de criterios intrínsecos a cada imagen individual que resultan importantes y fundamentales para la selección correcta de las imágenes.

Uno de los criterios a considerar es la cobertura nubosa de cada escena. La presencia de nubes sobre el área del estudio es un obstáculo importante teniendo en cuenta que las mismas no son transparentes a las imágenes satelitales ópticas. En este estudio, las imágenes que se contabilizaron debían cumplir con dos criterios: contar con un porcentaje de nubes menor o igual al 10 % y tener una buena calidad (mayor que 7). Se contabilizaron un total de 3,275 imágenes disponibles que cubren el área de estudio desde el año de 1984 hasta el 2011, con un promedio de 272.92 imágenes por path/row.

Un criterio adicional que se usó en la selección de las imágenes fue su adquisición en la misma temporada del año, con el propósito de reducir al mínimo las diferencias en geometría de observación e iluminación de las imágenes comparadas, y excluir la influencia del ciclo fenológico y de desarrollo anual de la vegetación de nuestro análisis de cambios de la cobertura vegetal. Para tener la máxima expresión de la vegetación en las imágenes analizadas, se seleccionaron las imágenes de las temporadas cuando la vegetación en el área de estudio se encontraba en su etapa más activa. Las imágenes seleccionadas para los estados del sur, se adquirieron después de la temporada de lluvia, en los meses de abril, mayo o junio, y para los estados del norte se seleccionaron las imágenes adquiridas después de la temporada de deshielo, en los meses de junio, julio o agosto.

Del total de imágenes Landsat 5 TM disponibles que cubren el área de estudio se seleccionaron 24 (Tabla. 7) adquiridas en los años de 1986 y 2009, y una sola escena adquirida en 1987, ya que en estos años se cuenta con la disponibilidad de las imágenes para todas las escenas con las características ya mencionadas.

Segundo, luego de identificar dentro de nuestra área de estudio las zonas de humedales que presentaron mayores cambios en la cobertura vegetal e hidrología superficial entre los años 1986/1987 – 2009, se seleccionaron las imágenes de Landsat 1 – 3 MSS y Landsat 5 TM adquiridas en los años de 1972 al 2011, en intervalos de 5 años (1 imagen cada 5 años) (Tabla 8). En general, los criterios para la selección de estas imágenes fueron los mismos que para el primer objetivo del capítulo, las imágenes que no cumplieron con los criterios, debido a su baja calidad se optó por buscar una mejor pero en distinta temporada. Sin embargo, algunas imágenes mantuvieron la baja calidad y de entre ellas se seleccionó la mejor. Las imágenes seleccionadas fueron utilizadas para realizar un análisis más detallado de los cambios en la cobertura vegetal e hidrología superficial de las zonas previamente seleccionadas.

Tabla 7. Imágenes Landsat 5 TM seleccionadas para realizar la comparación visual de dos décadas di ferentes.

Número de identificación	Fecha de adquisición	Path/Row	Cobertura de nubes	Calidad de imagen
LT50340321987205XXX03	24 jul 1987		0%	9
LT50340322009233PAC01	21 ago 2009	34/32	0%	9
LT50350321986209XXX05	28 jul 1986		0%	9
LT50350322009240PAC02	28 ago 2009	35/32	5%	9
LT50350331986209XXX13	28 jul 1986		0%	9
LT50350332009224PAC01	12 ago 2009	35/33	3%	9
LT50360331986216AAA03	04 ago 1986		0%	9
LT50360332009231PAC01	19 ago 2009	36/33	0%	9
LT50360341986216AAA03	04 ago 1986		0%	9
LT50360342009199PAC01	18 jul 2009	36/34	0%	9
LT50370341986207XXX09	26 jul 1986		0%	9
LT50370342009190PAC01	09 jul 2009	37/34	1%	9
LT50370351986191XXX03	10 jul 1986		0%	9
LT50370352009190PAC01	09 jul 2009	37/35	0%	9
LT50380351986134XXX04	14 may 1986		0%	9
LT50380352009181PAC01	30 jun 2009	38/35	2%	9
LT50380361986134XXX04	14 may 1986		0%	9
LT50380362009133PAC01	13 may 2009	38/36	0%	9
LT50380371986182XXX04	01 jul 1986		0%	9
LT50380362009133PAC01	13 may 2009	38/37	0%	9
LT50380381986182XXX04	01 jul 1986		10%	9
LT50380382009101EDC00	11 abr 2009	38/38	5%	9
LT50390351986125XXX03	05 may 1986		0%	9
LT50390352009172PAC01	21 jun 2009	39/35	0%	9

Tabla 8. Imágenes de Landsat 1 – 3 MSS y Landsat 5 TM adquiridas en los años de 1972 al 2011 para realizar el análisis de cambios en hidrología superficial y cobertura vegetal en las zonas seleccionadas.

Número de identificación	Fecha de adquisición	Path/Row	Nombre del satélite	Nombre del sensor	Cobertura de nubes	Calidad de imagen
LM10410371972220AAA05	07 ago 1972	41/37	Landsat 1	MSS	0%	5
LM10410371972238GDS03	25 ago 1972	41/37	Landsat 1	MSS	1%	8
LM10390331972218GDS03	05 ago 1972	39/33	Landsat 1	MSS	3%	8
LM10410381972220GDS03	07 ago 1972	41/38	Landsat 1	MSS	0%	6
LM10410381972256AAA05	12 sep 1972	41/38	Landsat 1	MSS	9%	5
LM10410361972220AAA05	07 ago 1972	41/36	Landsat 1	MSS	0%	5
LM20410371977166AAA05	15 jun 1977	41/37	Landsat 2	MSS	0%	5
LM20410361977166AAA05	15 jun 1977	41/36	Landsat 2	MSS	0%	5
LM20390331977218GDS04	06 ago 1977	39/33	Landsat 2	MSS	1%	9
LM20410361977166AAA05	15 jun 1977	41/36	Landsat 2	MSS	0%	5
LM20410381977094AAA04	04 abr 1977	41/38	Landsat 2	MSS	0%	5
LM20410381982014AAA03	14 ene 1982	41/38	Landsat 2	MSS	1%	9
LM30410371982167AAA03	16 jun 1982	41/37	Landsat 3	MSS	0%	9
LM30390331982183AAA06	02 jul 1982	39/33	Landsat 3	MSS	0%	8
LM30410361982167AAA03	16 jun 1982	41/36	Landsat 3	MSS	0%	9
LT50380371987169XXX07	18 jun 1987	38/37	Landsat 5	TM	0%	9
LT50360331987251XXX02	08 sep 1987	36/33	Landsat 5	TM	0%	7
LT50380361987153XXX02	02 jun 1987	38/36	Landsat 5	TM	0%	9

LT50380381987153XXX02	02 jun 1987	38/38	Landsat 5	TM	0%	9
LT50380371992167XXX03	15 jun 1992	38/37	Landsat 5	TM	0%	9
LT50380381992135XXX02	14 may 1992	38/38	Landsat 5	TM	0%	9
LT50360331992233XXX02	20 ago 1992	36/33	Landsat 5	TM	0%	9
LT50380361992167XXX03	15 jun 1992	38/36	Landsat 5	TM	0%	9
LT50380371997164AAA02	13 jun 1997	38/37	Landsat 5	TM	0%	9
LT50380361997196XXX02	15 jul 1997	38/36	Landsat 5	TM	0%	9
LT50360331997182XXX02	01 jul 1997	36/33	Landsat 5	TM	0%	9
LT50380381997100AAA02	10 abr 1997	38/38	Landsat 5	TM	0%	9
LT50380372002162LGS01	11 jun 2002	38/37	Landsat 5	TM	0%	9
LT50380362002162LGS01	11 jun 2002	38/36	Landsat 5	TM	0%	9
LT50380382002130LGS01	10 may 2002	38/38	Landsat 5	TM	0%	9
LT50360332002228LGS01	16 ago 2002	36/33	Landsat 5	TM	0%	9
LT50380382007096PAC01	06 abr 2007	38/38	Landsat 5	TM	0%	9
LT50380362007176PAC01	25 jun 2007	38/36	Landsat 5	TM	0%	9
LT50380372007176PAC01	25 jun 2007	38/37	Landsat 5	TM	0%	9
LT50360332007242PAC01	30 ago 2007	36/33	Landsat 5	TM	4%	9
LT50380372011251PAC02	08 sep 2011	38/37	Landsat 5	TM	0%	9
LT50360332011221PAC01	09 ago 2011	36/33	Landsat 5	TM	0%	9
LT50380362011171PAC01	04 jun 2011	38/36	Landsat 5	TM	0%	9
LT50380382011091EDC00	01 abr 2011	38/38	Landsat 5	TM	0%	9
LT50380372011171PAC01	20 jun 2011	38/37	Landsat 5	TM	0%	9

4.2.2 Pre-procesamiento de imágenes Landsat

Con la finalidad de llevar a cabo una correcta interpretación y un buen análisis de las imágenes, es imprescindible realizar un pre-procesamiento a las imágenes de partida. El pre-procesamiento se aplicó a todas las imágenes utilizadas en este trabajo de tesis. El proceso de pre-procesamiento fue descrito con detalle en el apartado 2.4.7, del capítulo 2. El pre-procesamiento incluyó la substracción de objeto obscuro y la conversión de DN a radiancia y a reflectancia TOA. La figura 8 presenta el diagrama de flujo de las correcciones realizadas.

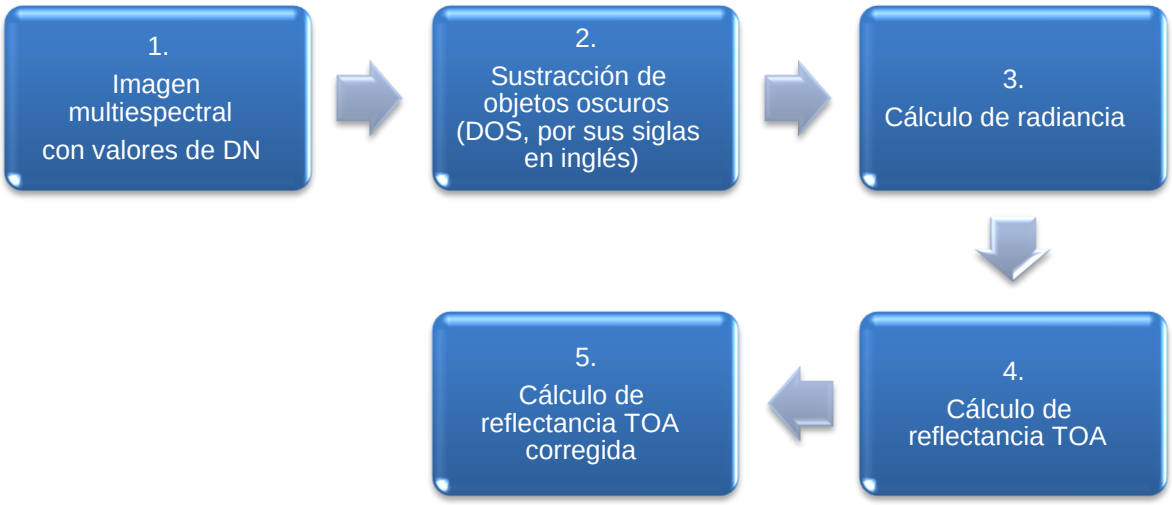


Figura 8. Diagrama de flujo del pre-procesamiento realizado a cada una de las imágenes Landsat.

No se realizó pre-procesamiento a la banda 6 del Landsat 5 TM y banda 8 del Landsat 3 MSS, debido a que dichas bandas no se utilizaron en este trabajo. Las bandas 6 TM y 8 MSS corresponden a la región de IR lejano o IR térmico.

La sustracción del objeto oscuro, DOS (Dark-Object Subtraction en inglés), se realizó aplicando la ecuación 1 (ver apartado 2.4.7) a cada banda (excepto las bandas mencionadas en el párrafo anterior) de las imágenes de partida. El valor de DN mínimo para cada banda se obtuvo calculando la estadística de imagen.

La conversión de DN a radiancia y a reflectancia TOA se realizó aplicando la ecuación 2 y 3, respectivamente (ver apartado 2.4.7). Los valores de calibración propias de cada banda del sensores, $gain$ y $offset$, la irradiancia solar media exoatmosférica, $ESUN$, y la distancia astronómica Tierra-Sol, d, se obtuvieron de la publicación de Chander et al., (2009). El valores del ángulo solar zenit, θ_s, se obtuvo de la información del archivo de metadatos de la imagen.

La reflectancia TOA o reflectancia aparente tiene valores adimensionales comprendidos entre 0 y 1 (también puede expresarse en porcentaje (%) teniendo valores comprendidos entre 1 y 100). Sin embargo, en las imágenes pre-procesadas existen algunos pixeles con valores de reflectancia TOA (R^{TOA}) negativos, de magnitudes muy pequeñas (milésimas), por lo que fueron considerados como cero aplicando la siguiente condición:

$$if\ R^{TOA} < 0\ then\ 0\ else\ R^{TOA} \quad (9)$$

4.2.3 Análisis de imágenes Landsat 5 TM de dos décadas diferentes

Se realizó la comparación visual de las imágenes Landsat 5 TM, previamente pre-procesadas, de dos décadas diferentes, con la finalidad de detectar las zonas de humedales con mayores cambios en la vegetación y en la hidrología superficial. La comparación visual se realizó a partir de composiciones o combinaciones en color (RGB) (ver apartado 2.4.7). Se probaron diferentes combinaciones de bandas, sugeridas por diversos autores: RGB 4/5/2 (Ibrahim y Jusoff, 2009), RGB 3/4/5 (García y Lleellish, 2012; Otieno, Odenyo y Okeyo, 2001), RGB 3/4/6 (Otieno, Odenyo y Okeyo 2001) y RGB 4/3/2 (Pérez-Ortega, 2011; Saleh, 2012), la última combinación, permite mejor diferenciación de la cubierta vegetal del resto de elementos del paisaje. También representa adecuadamente los cuerpos de agua.

La banda 4 TM (0.76 - 0.90 µm) corresponde a IR cercano y es útil para determinar el contenido de biomasa vegetal presente y para enfatizar el contraste de zonas de suelo-vegetación, y suelo-agua. La banda 3 TM (0.63 - 0.69 µm), correspondiente al rojo visible, coincide con la banda de absorción de la clorofila, y es importante para discriminar los tipos de vegetación. La banda 2 TM (0.52 - 0.60 µm) es ajustada al pico

de reflectancia de la vegetación en el verde visible, y permite evaluar el vigor de las plantas.

La combinación RGB de las bandas 4/3/2 de Landsat 5 TM suele llamarse “combinación en falso color infrarrojo”, debido a que los colores resultantes en la imagen son similares a los de las tradicionales fotografías aéreas de color infrarrojo (Figura 9). Al asignar el rojo a la banda 4 TM se obtienen todos los tonos de rojo, desde el rojo muy oscuro al rosado pálido corresponden a la vegetación: los tonos más oscuros se relacionan con la presencia de vegetación arbórea densa, como bosques; los rojos y rojos claros indican cultivos y praderas vigorosas. Los rosados corresponden a vegetación menos densa, como pasturas naturales, y/o vegetación en temprano crecimiento. Las zonas de matorral también aparecen en tonos rosados aunque pueden presentar tonalidades desde beige-dorados a marrones, dependiendo de su estado. El color blanco corresponde a las zonas de máxima reflectancia en las tres bandas, a zonas totalmente descubiertas de vegetación, arenas, depósitos de sal, nieve, glaciares y nubes. El azul oscuro a negro se relaciona con agua clara en curso o cuerpos de agua. Si éstos presentan partículas en suspensión se aparecerán en tonalidades azul-verdosas (cian). El gris azulado a azul-celeste puede corresponder a áreas urbanas e infraestructura civil, como carreteras, también puede tratarse de zonas rocosas y suelo desnudo seco. Los colores verdes a verdes azulados corresponden a parcelas aradas o suelos descubiertos con mayor o menor contenido de humedad.

Mediante la comparación visual de dos imágenes en falso color infrarrojo (RGB 4/3/2) de la misma escena (path/row) de dos décadas diferentes (1986-87 y 2009) se identificaron las zonas de humedales con mayores cambios en la cobertura vegetal e hidrología superficial. La evaluación de las modificaciones hidrológicas superficiales y los cambios en la vegetación en los últimos cuarenta años se realizó en las zonas seleccionadas.

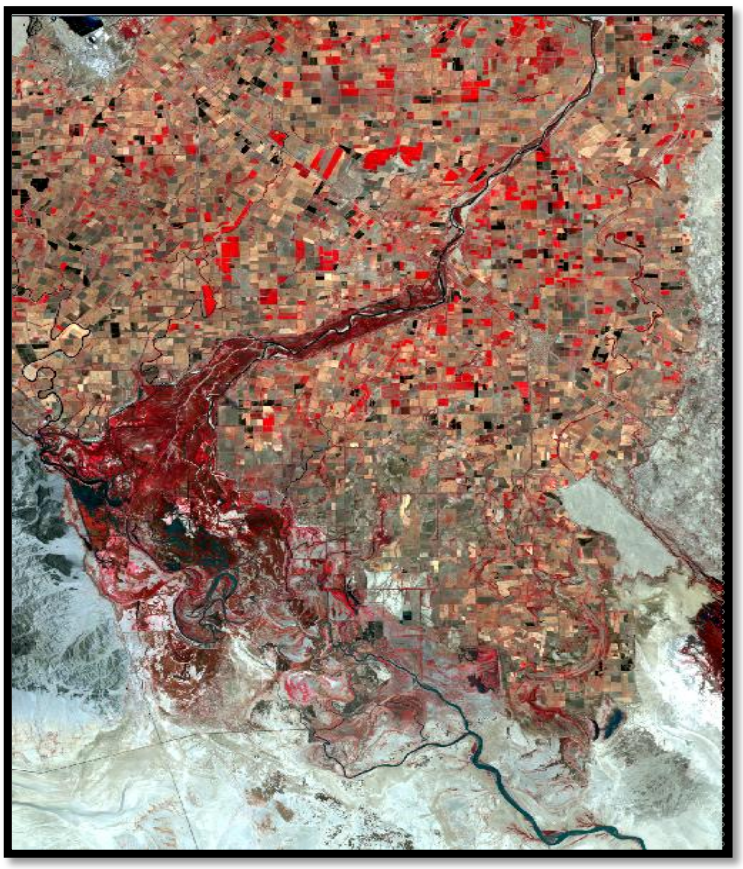


Figura 9. Imagen de Landsat 5 TM en falso color infrarrojo (R/G/B 4/3/2). La imagen fue adquirida en junio 1987, y cubre el área correspondiente al Valle d e Mexicali, Baja California, México (path/row 38/38).

4.2.4 Análisis de los cambios temporales de hidrología superficial en las zonas de estudio seleccionadas

Como se presentó en el apartado 2.4.3, la curva de reflectancia del agua es regularmente decreciente desde el visible hasta el infrarrojo, donde el valor de la reflectancia es muy débil y puede tomar valores muy cercanos a cero, por lo que las bandas de IR cercano e IR medio son ampliamente usadas para delinear el límite agua-suelo (Domínguez, 2002; Lee et al., 2001)

Para diferenciar las superficies cubiertas por agua del resto de coberturas se utilizaron:

1) Banda 6 (0.7 - 0.8 μm) y banda 7 (0.8 - 1.1), ambas del IR cercano, del Landsat 1-3 MSS
2) Banda 4 (0.76 - 0.90 μm) y banda 5 (infrarrojo medio, 1.55 - 1.75 μm), del IR cercano e IR medio, respectivamente, de Landsat 5 TM

Las bandas utilizadas en cada zona y para cada año analizado, se presentan en el anexo 2.

A cada imagen de banda analizada (imagen pancromática, en escala de grises) se aplicó una técnica de segmentación del histograma usando un umbral variable, con el rango de valores comprendidos entre 0.08 y 0.2. El umbral se escogió para cada zona y dependió de la respuesta espectral del agua, que varía dependiendo de la profundidad de los cuerpos de agua y de la cantidad de sólidos en suspensión (Figura 10). Los valores de reflectancia TOA menores que el umbral representan las superficies cubiertas por agua, mientras que los valores de reflectancia TOA mayores que el umbral representan el resto de cubiertas. La segmentación del histograma produce una imagen binaria que es una imagen que contiene solo dos colores: blanco y negro. El color negro corresponde a las superficies cubiertas por agua mientras el blanco representa otras coberturas.

Cada imagen binaria resultante se reclasificó en ArcMap con la herramienta "Reclassify", dándole el valor de 1 a las superficies cubiertas por agua y 0 a las demás coberturas. Una vez reclasificada la imagen, ésta se vectorizó. Sin embargo, en algunos casos, los polígonos resultantes incluían parcelas regadas o con alto contenido de humedad (Figura 10). Para excluir dichas parcelas del análisis y del cálculo del área de las superficies cubiertas por agua, se realizó su identificación visual, basada en la forma que poseen las tierras cultivadas (parcelas circulares o rectangulares). Una vez identificadas, las parcelas con alto contenido de humedad se excluyeron manualmente de los polígonos originales. Finalmente, se calculó el área de la superficie cubierta por agua.

Para cada zona, se compararon los valores del área de la superficie cubierta por agua, obtenidos a partir de las imágenes de fechas diferentes, con el propósito de evaluar los cambios temporales de la hidrología superficial.

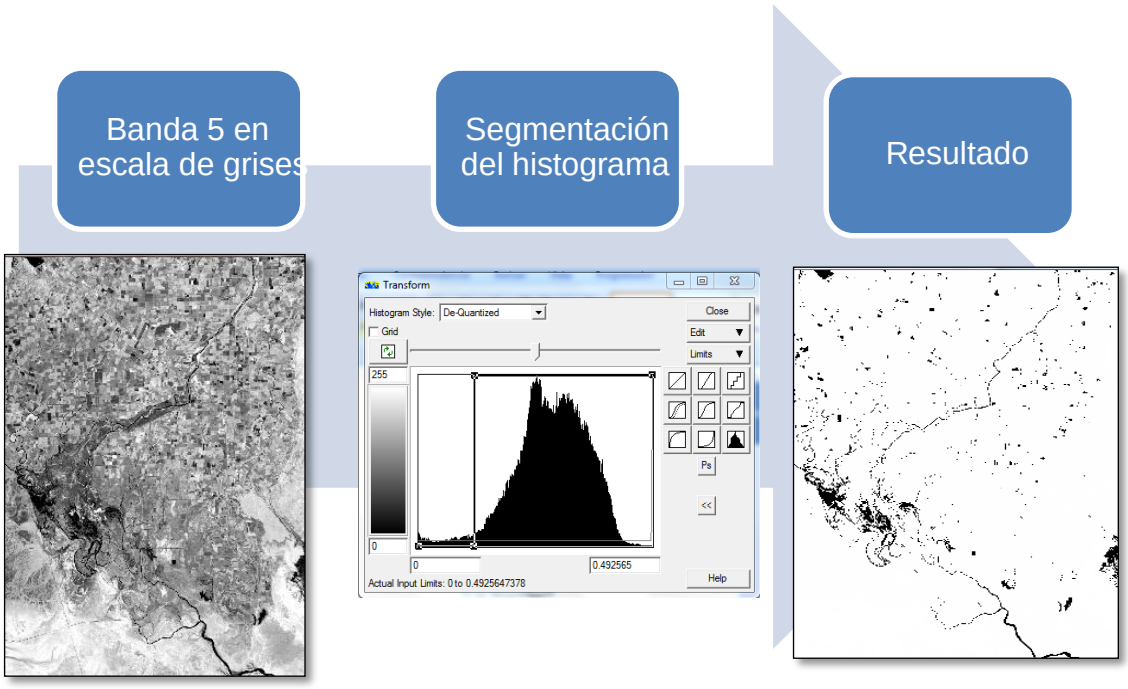


Figura 10. Segmentación de l histograma para diferenciar las superficies cubiertas por agua de las superficies con otros tipos de cobertura (Ejemplo: Valle de Mexicali, Landsat 5 TM, para el año de 1987).

4.2.5 Análisis de los cambios temporales de la co bertura vegetal de los humed ales en las zonas de estudio seleccionadas

La discriminación de la cobertura vegetal del resto de las coberturas se realizó usando el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés). El NDVI se calculó utilizando la ecuación 4 (ver apartado 2.4.8, capítulo 2) y el software ER Mapper 7.1.

Para realizar el cálculo de NDVI a partir de las imágenes del sensor MSS (Landsat 1-3) se utilizaron las bandas 5 y 7, quedando la ecuación 4 como:

$$\boldsymbol{NDVI} = \frac{(\boldsymbol{Banda\ 7} - \boldsymbol{Banda\ 5})}{(\boldsymbol{Banda\ 7} + \boldsymbol{Banda\ 5})} \qquad (10)$$

Mientras que para el cálculo de NDVI a partir de las imágenes del sensor TM (Landsat 5) se utilizaron las bandas 3 y 4, quedando la ecuación 4 como:

$$\boldsymbol{NDVI} = \frac{(\boldsymbol{Banda\ 4} - \boldsymbol{Banda\ 3})}{(\boldsymbol{Banda\ 4} + \boldsymbol{Banda\ 3})} \quad (11)$$

Para cada zona, se calculó el índice de NDVI a partir de las imágenes adquiridas en diferentes fechas, y por diferentes sensores. Las imágenes de NDVI resultantes, se visualizaron en pseudocolor (imagen con una escala de colores asignada), y se les ajustó el límite del histograma de -1 a $+1$ (que es el rango de valores de NDVI), con el propósito de poder comparar visualmente las imágenes de NDVI de misma zona en diferentes fechas.

Con el objetivo de calcular el área total de la cobertura vegetal de los humedales, a cada imagen de NDVI se aplicó una técnica de segmentación del histograma usando un umbral fijo.

De acuerdo con Navarro, Meléndez-Pastor, Gómez y Almendro (2006), existen diferentes metodologías para determinar el umbral discriminativo y cualquiera de ellas posee ciertos pros y contras que contribuyen a la incertidumbre de la aplicación de este tipo de métodos. Una de las metodologías que ellos mencionan es la interpretación visual de las imágenes y ajuste del umbral de discriminación a tal interpretación intuitiva-empírica.

Los valores de NDVI muy bajos, del orden de 0.1, corresponden a áreas rocosas, arenas, o nevadas. Valores de 0.2 a 0.3 corresponden a áreas pobres con arbustos o vegetación rala, como pastizales naturales. Los valores de NDVI mayores a 0.3 corresponden a praderas, cultivos, bosques, etc. dependiendo el valor alcanzado, que puede llegar hasta 0.6 - 0.8, dependiendo del estado y sanidad de la vegetación de tales áreas (Teledet, Sin año).

Conforme a estos valores de NDVI, se empleó un valor de umbral fijo de 0.4 para representar toda aquella vegetación fotosintéticamente activa, ya que entre mayor sea el índice, mayor es la densidad, verdor o vigor de la vegetación.

Las imágenes resultantes se reclasificaron en ArcMap con la herramienta "Reclassify", dándole el valor de 1 a las superficies con vegetación con NDVI ≥ 0.4 y 0 a las demás superficies. Una vez reclasificada la imagen, ésta se vectorizó. Los polígonos obtenidos

en algunos casos, incluían, además de la vegetación de los humedales, los campos de cultivo, por lo que se realizó su identificación visual, basado en la geometría que dichos campos poseen (formas rectangulares o circulares), y su extracción manual de los polígonos originales. Finalmente, se calculó el área total de la cubierta vegetal de los humedales.

Para cada zona, se compararon los valores del área total de la cubierta vegetal de los humedales, obtenidos a partir de las imágenes de fechas diferentes, con el propósito de evaluar sus cambios temporales.

4.3. Análisis de correlación

Una vez obtenidas las series de tiempo de flujo volumétrico promedio anual, de área de la superficie cubierta por agua y de área de cobertura vegetal de los humedales, se procedió a determinar la posible correlación entre estas variables.

La correlación trata de establecer la relación o dependencia que existe entre las dos variables que intervienen en una distribución bidimensional. Es decir, determinar si los cambios en una de las variables influyen en los cambios de la otra. En caso de que suceda, se dice que las variables están correlacionadas o que existe correlación entre ellas (Díaz y Fernández, 2001).

El coeficiente de correlación lineal de Pearson, r_{xy}, es la principal medida de asociación lineal entre dos variables cuantitativas y se define como:

$$r_{xy} = \frac{n\sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{n\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}\,\sqrt{n\sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \qquad (12)$$

Donde x y y son las variables cuantitativas, n es el número de datos y la sumatoria de i desde 1 hasta n.

El valor del índice de correlación varía en el intervalo $[-1,1]$:

- Si $r_{xy} > 0$, se considera que la correlación lineal es positiva, es decir, si sube el valor de una variable sube el de la otra.
- Si $r_{xy} < 0$, se considera que la correlación lineal es negativa, es decir, si sube el valor de una variable disminuye el de la otra.
- Si $r_{xy} = 0$, se considera que no existe correlación lineal entre las variables.

Se habla de una correlación muy alta entre dos variables, si la magnitud de r_{xy} se encuentra entre 0.9 y 1; correlación alta, si la magnitud de r_{xy} se encuentra entre 0.7 y 0.9; correlación moderada, si la magnitud de r_{xy} se encuentra entre 0.5 y 0.7; correlación baja, si el valor de r_{xy} se encuentra entre 0.3 y 0.5; y correlación muy baja o nula, si la magnitud de r_{xy} es inferior a 0.3.

Cabe mencionar que si el coeficiente de correlación lineal de Pearson es igual a 0, ello indica únicamente que no existe correlación lineal entre las variables sobre las que se ha calculado, pero no indica que entre las variables no pueda existir otra forma de asociación. Dos variables pueden tener una fuerte relación de dependencia o asociación no lineal y tener una nula asociación lineal.

5. Resultados y discusión

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos siguiendo la metodología descrita en el capítulo 4 y su análisis.

En el subcapítulo 5.1 se encuentran los resultados obtenidos de la selección de las zonas de estudio.

En el subcapítulo 5.2 está el análisis detallado de los cambios en la hidrología superficial y de la vegetación de los humedales para cada zona seleccionada, en el periodo de estudio (1972-2011). Como ha sido mencionado en el capítulo 4, se utilizaron las imágenes satelitales de la constelación Landsat para obtener las áreas de las superficies cubiertas por agua y de cobertura vegetal de los humedales para las 9 zonas de estudio dentro del periodo de 1972-2011 (40 años).

Las imágenes que se presentan en las figuras del subcapítulo 5.2 son las que corresponden al primer y último año del periodo analizado (1972 y 2011). En algunos casos están también las imágenes antes y después de algún evento extraordinario, como un incendio importante ocurrido durante el periodo analizado. El resto de las imágenes examinadas pueden ser consultadas en los anexos correspondientes. Es importante mencionar que las imágenes analizadas tienen una separación temporal de 5 a 4 años, por lo que para cada una de las zonas se analizaron 9 imágenes, excepto para la zona 1 y 2 (ver apartados 5.2.2 y 5.3.2).

5.1. Selección de las zonas de estudio

Basado en el análisis y comparación visual de las imágenes Landsat 5 TM en falso color infrarrojo (RGB 4/3/2), se seleccionaron 9 zonas que presentaron mayores cambios en la cobertura vegetal en las áreas de los humedales, así como cambios en la hidrología superficial (cambios en cuerpos de agua y modificaciones del cauce principal) entre los años de 1986/1987 y 2009.

Zonas seleccionadas:

1. Ruby Canyon, Utah, EUA
2. Cisco, Utah, EUA
3. Moab, Utah, EUA
4. Topock Marsh, Arizona, EUA
5. Lost Lake, California, EUA
6. Refugio nacional de vida silvestre Cíbola, Arizona y California, EUA
7. Mittry Lake, Arizona, EUA
8. Tramo limítrofe del río Colorado, EUA-México
9. Río Colorado en México

En la figura 11 se muestra la ubicación geográfica de las zonas seleccionadas. Las figuras 12-20 presentan las imágenes en falso color infrarrojo (RGB 4/3/2) del Landsat 5 TM de dos décadas diferentes: 1986 y 2009, para cada una de las zonas seleccionadas y se señalan los cambios que se destacan entre las imágenes en comparación.

Los tonos de rojo, desde el rojo muy oscuro al rosado pálido, de la composición en falso color infrarrojo (RGB 4/3/2), corresponden a la vegetación. Los tonos más oscuros se relacionan con la presencia de vegetación densa, como bosques. Los rojos claros indican cultivos y praderas vigorosas. Los rosados corresponden a la vegetación poco densa como pasturas naturales. El azul oscuro casi negro indica la presencia de superficies cubiertas parcial o totalmente por agua. Y los colores verdes a verdes azulados corresponden a parcelas aradas o suelos descubiertos con mayor o menor contenido de humedad.

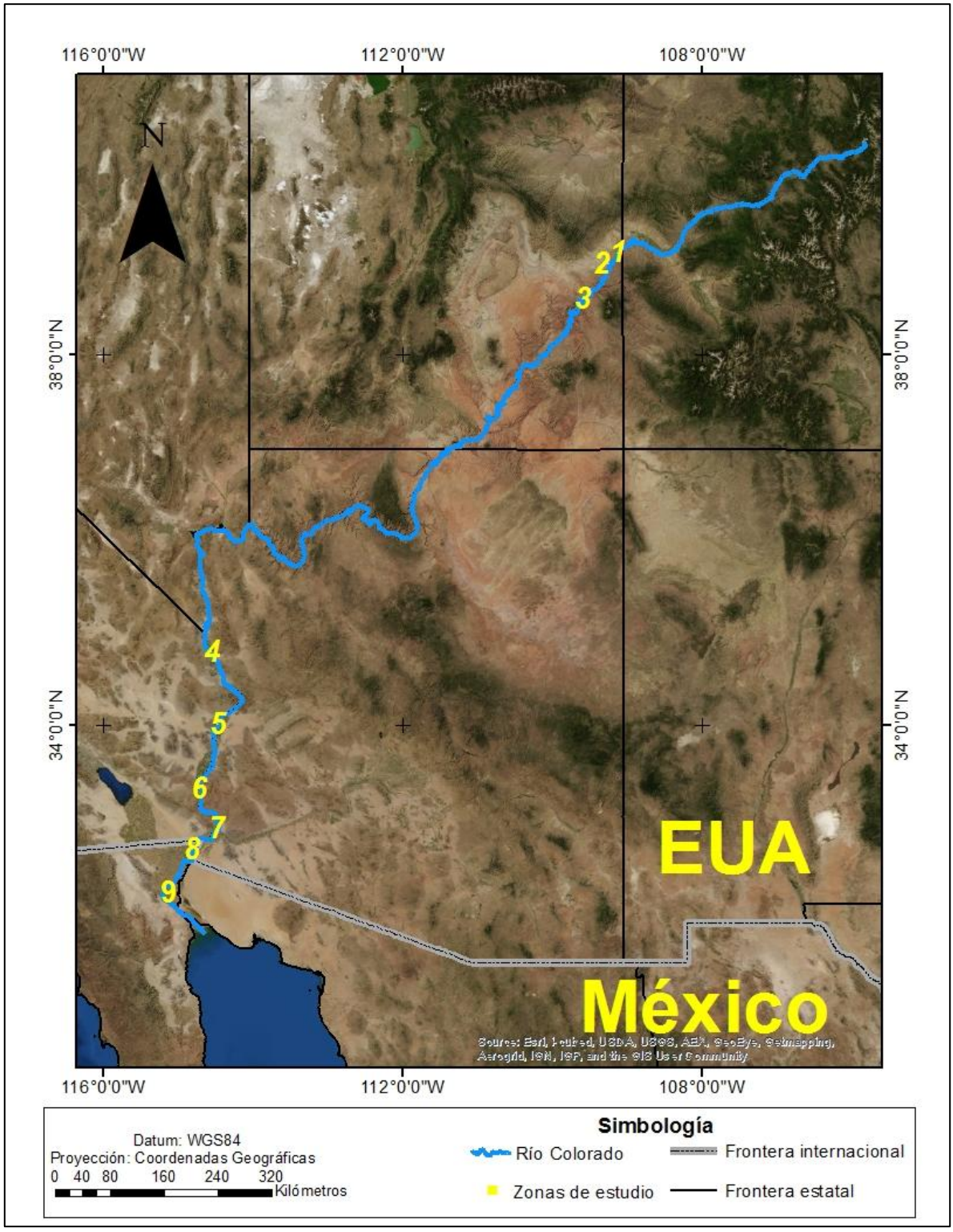


Figura 11. Ubicación geográfica de las zonas de estudio (Imagen de fondo: World Imagery de http://ww w.arcgis.com/home/item.html?id=10df2279f9684e4a9f6a7f08febac2a9).

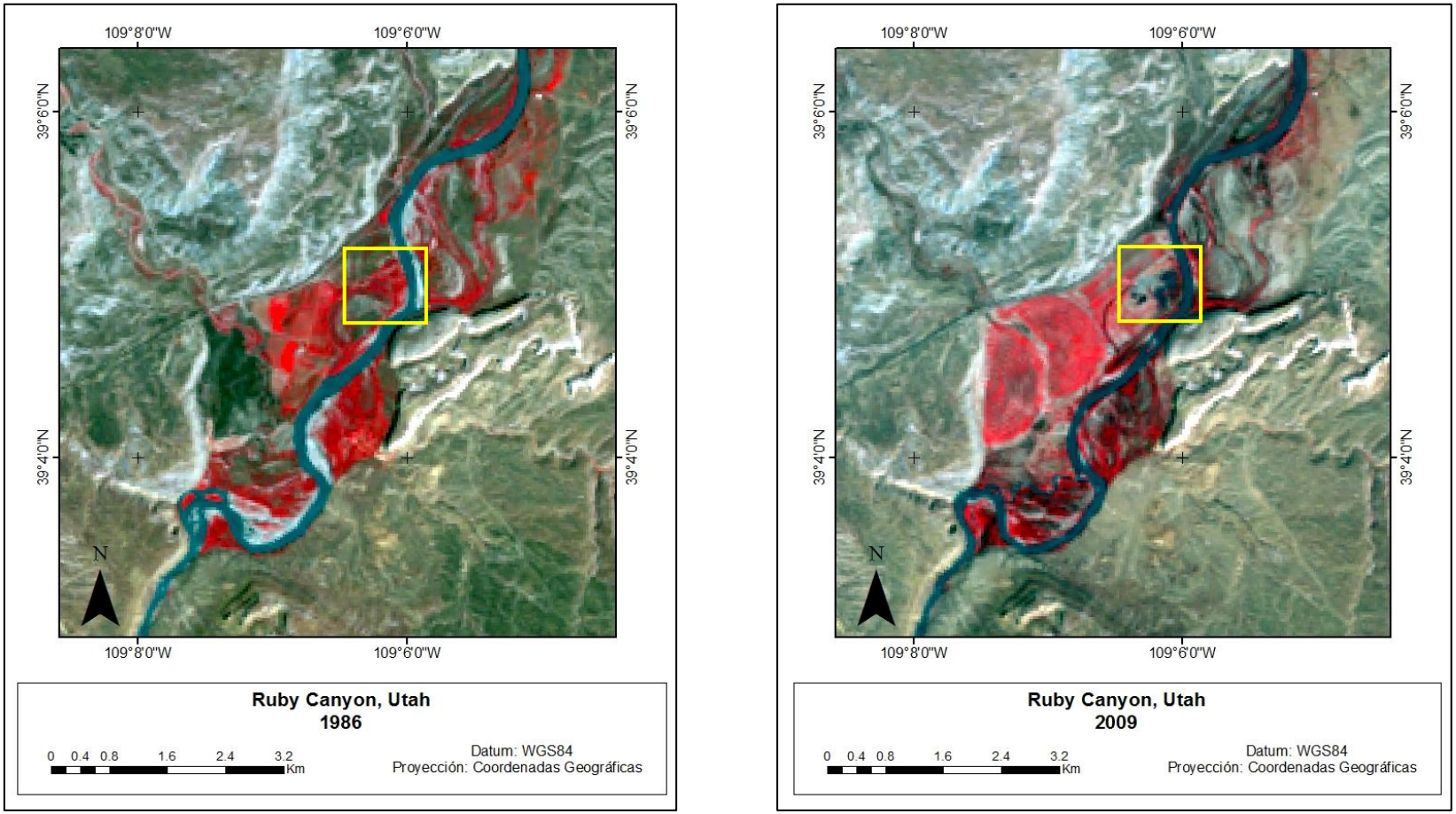


Figura 12. Zona 1: Ruby Canyon, Utah, EUA. Imágenes en falso color infrarrojo (RGB 4/3/2, Landsat 5 TM) de décadas diferentes. En esta zona se observa el cambio de uso de suelo al cual los humedales han sido sometidos. En la imagen del año 2009 es posible apreciar la aparición de dos semicírculos de cultivo en la parte central de la zona, mientras que la vegetación restante disminuyó en un gran porcentaje hasta casi desaparecer. El recuadro amarillo marca la ubicación de un cuerpo de agua presente en la imagen del año 2009 y ausente en 1986.

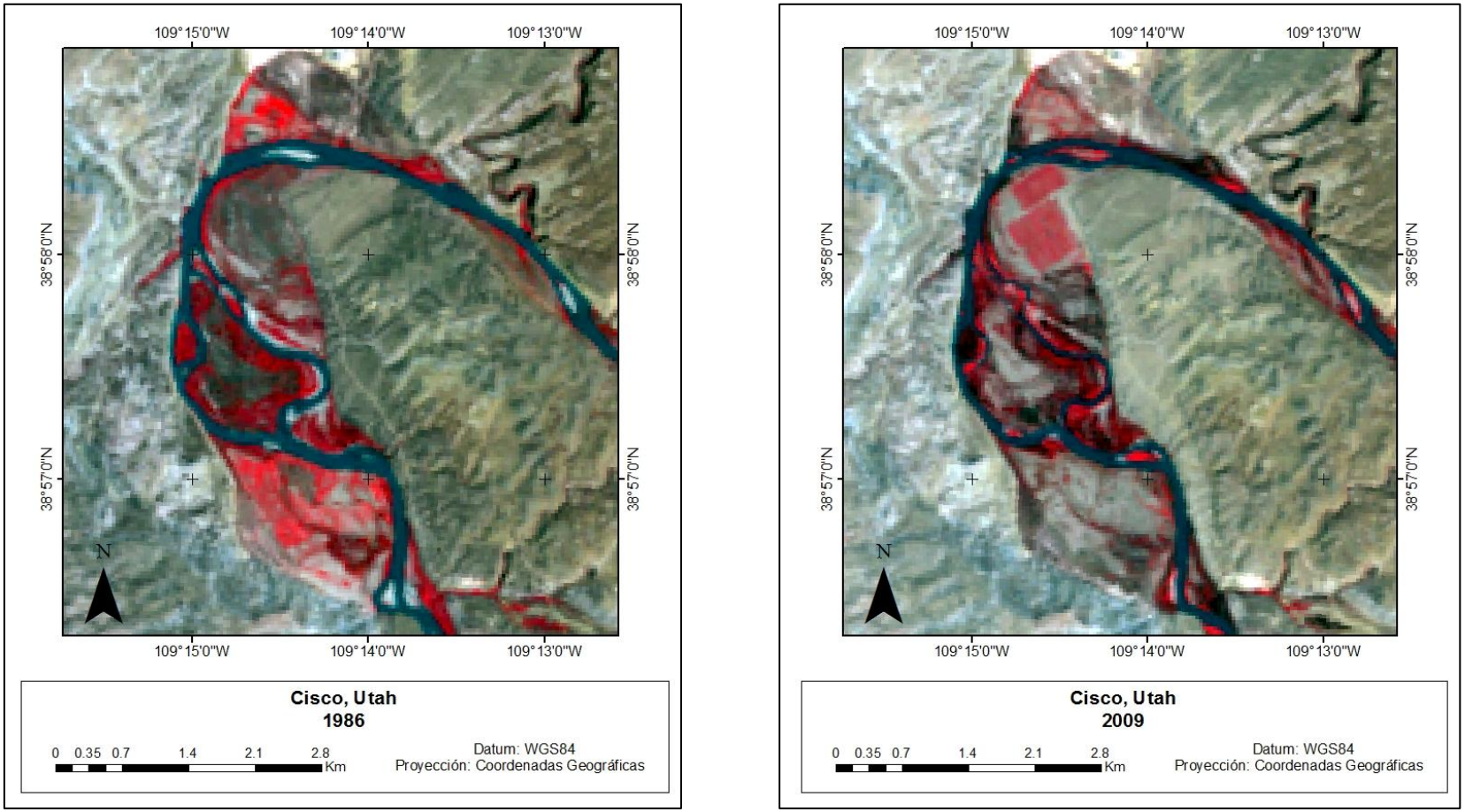


Figura 13. Zona 2: Cisco, Utah, EUA. Imágenes en falso color infrarrojo (RGB 4/3/2, Landsat 5 TM) de décadas diferentes. En esta zona las pérdidas de vegetación de los humedales pueden ser apreciadas, sobre todo en el sur. También se observa el cambio de uso de terreno con aparición de campos de cultivo en la parte norte de la zona en la imagen del año 2009.

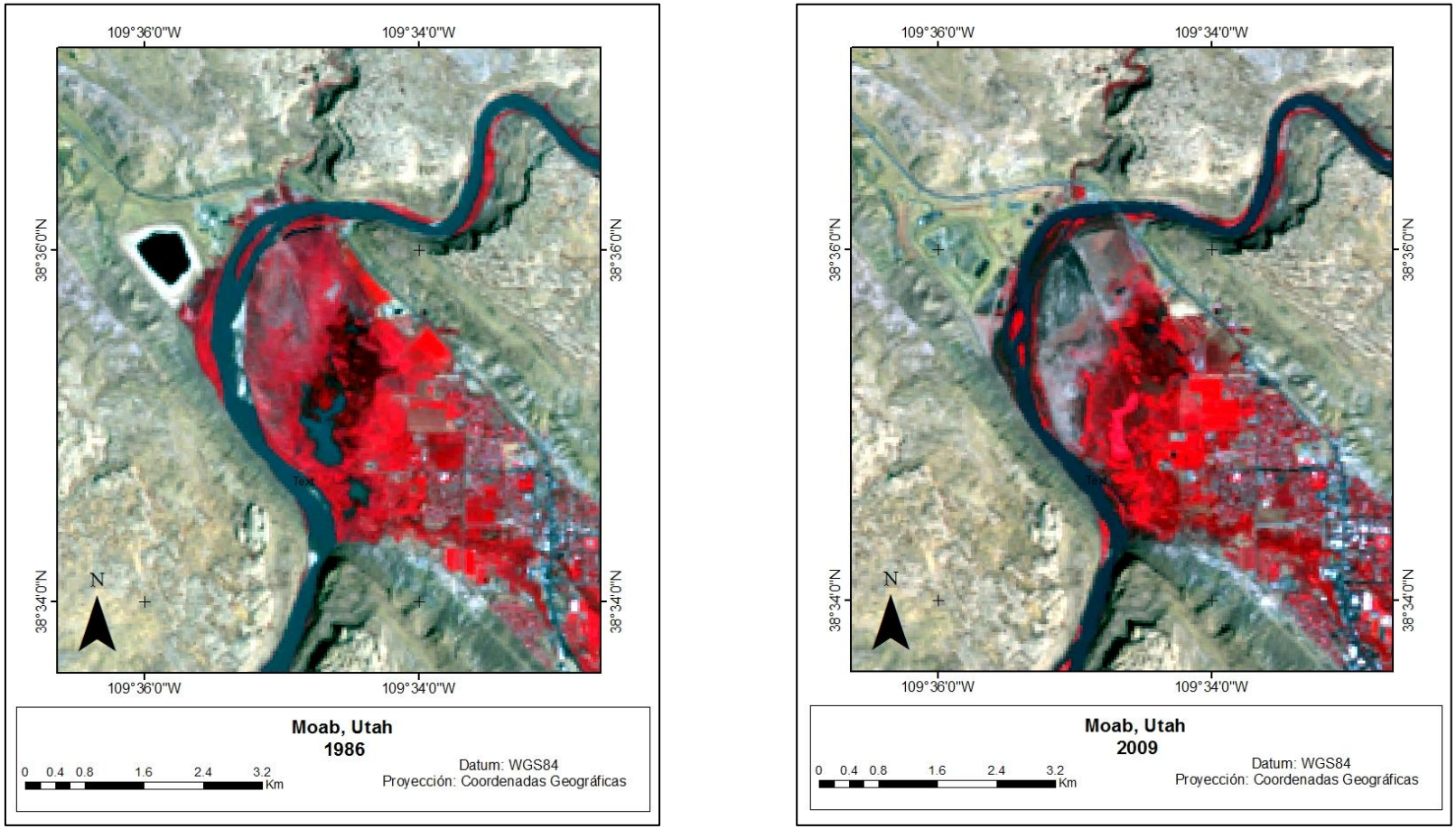
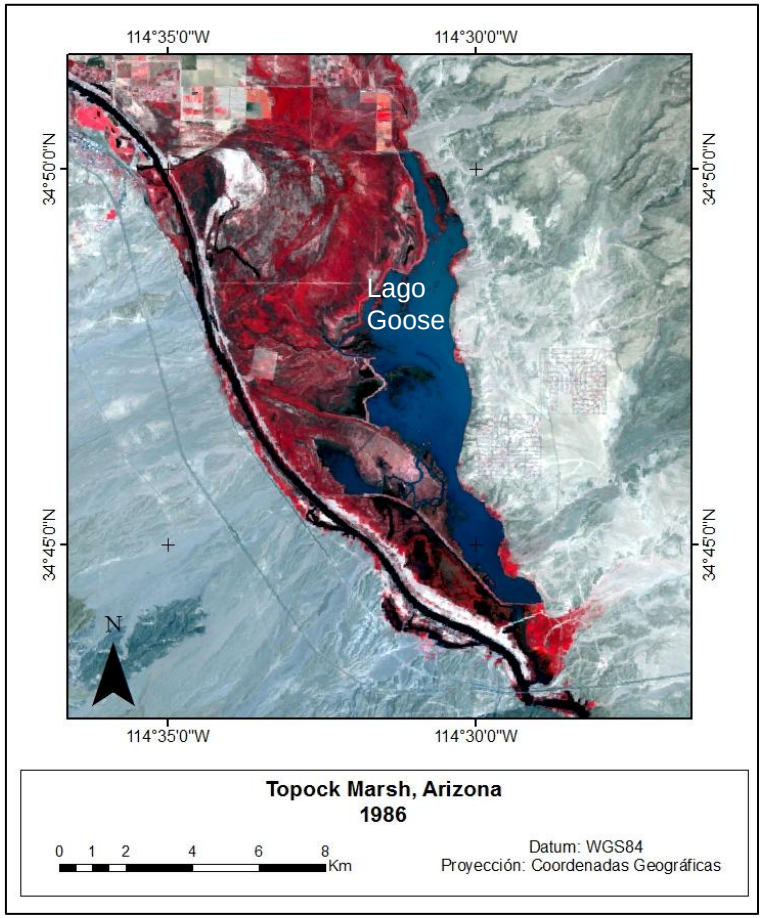


Figura 14. Zona 3: Mo ab, Utah, EUA. Imágenes en falso color infrarrojo (RGB 4/3/2, Landsat 5 TM) de décadas diferentes. La pérdida de vegetación del humedal es notable, sobre todo en su parte central. También se aprecia la reducción del área de algunos cuerpos de agua. El cauc e principal del río se ve más angosto en la imagen del año 2009 y se observa la aparición de pequeñas islas fluviales.



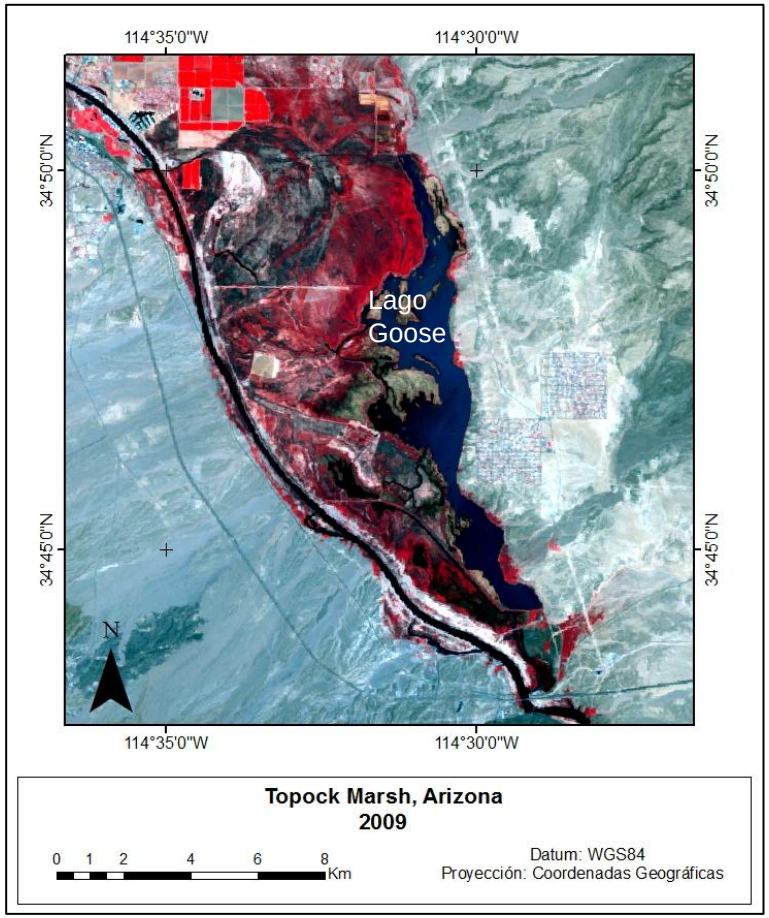


Figura 15. Zona 4: Topock Marsh, Arizona EUA. Imágenes en falso color infrarrojo (RGB 4/3/2, Landsat 5 TM) de dé cadas diferentes . Se observa una drástica reducción del cuerpo de agua correspondiente al Lago Goose. La vegetación de los humedales se ve muy afectada , lo que se refleja en la mayor presencia de suelos desnudos en la imagen del año 2009 en el área de los humedales.

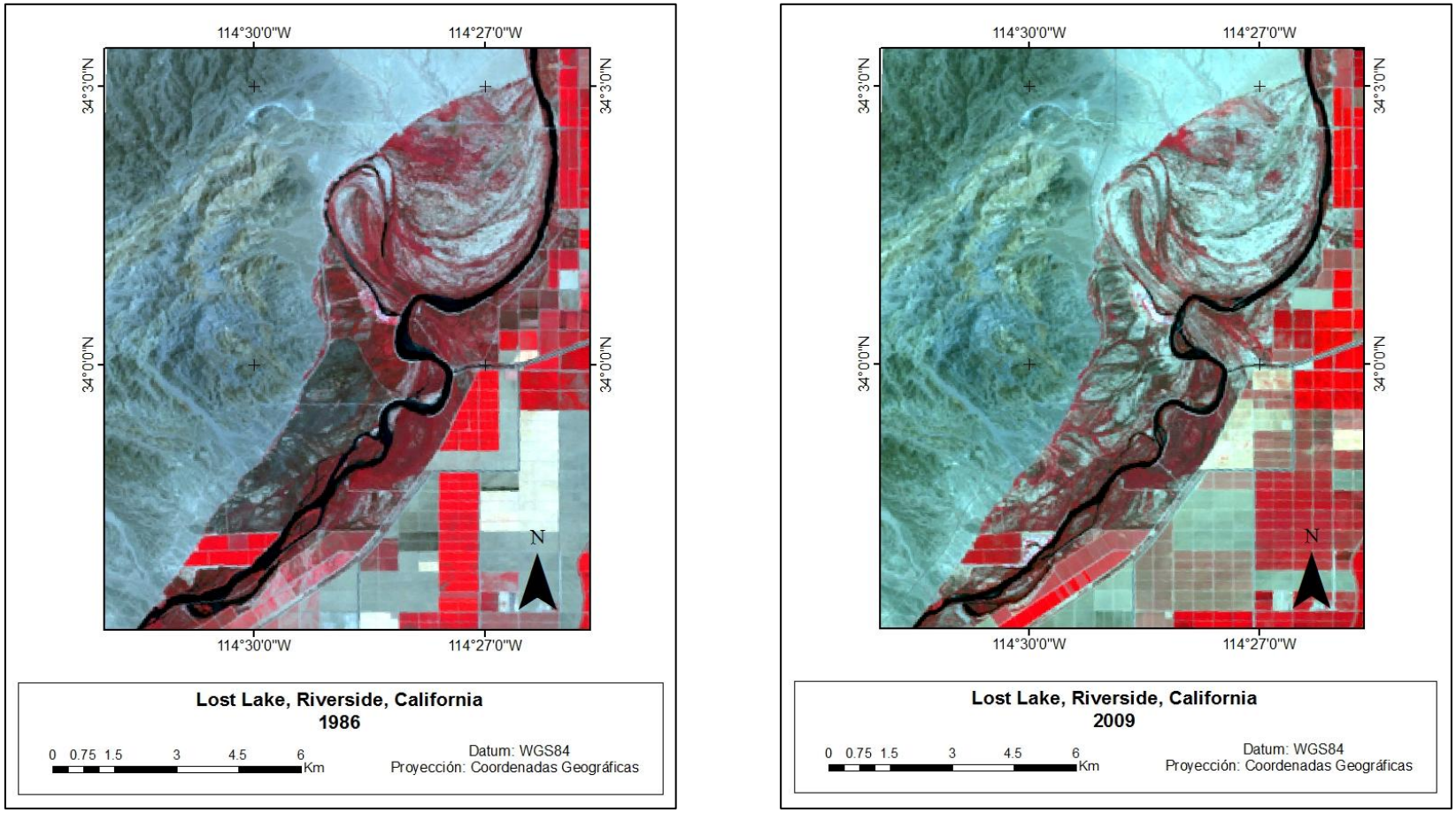


Figura 16. Zona 5: Lost Lake, Rive rside, EUA. I mágenes en falso color infrarrojo (RGB 4/3/2, Landsat 5 TM) de décadas diferentes. Este humedal ha perdido la mayor parte de su vegetación, se observa la pérdida de algunos cuerpos de agua o la reducción de su área.

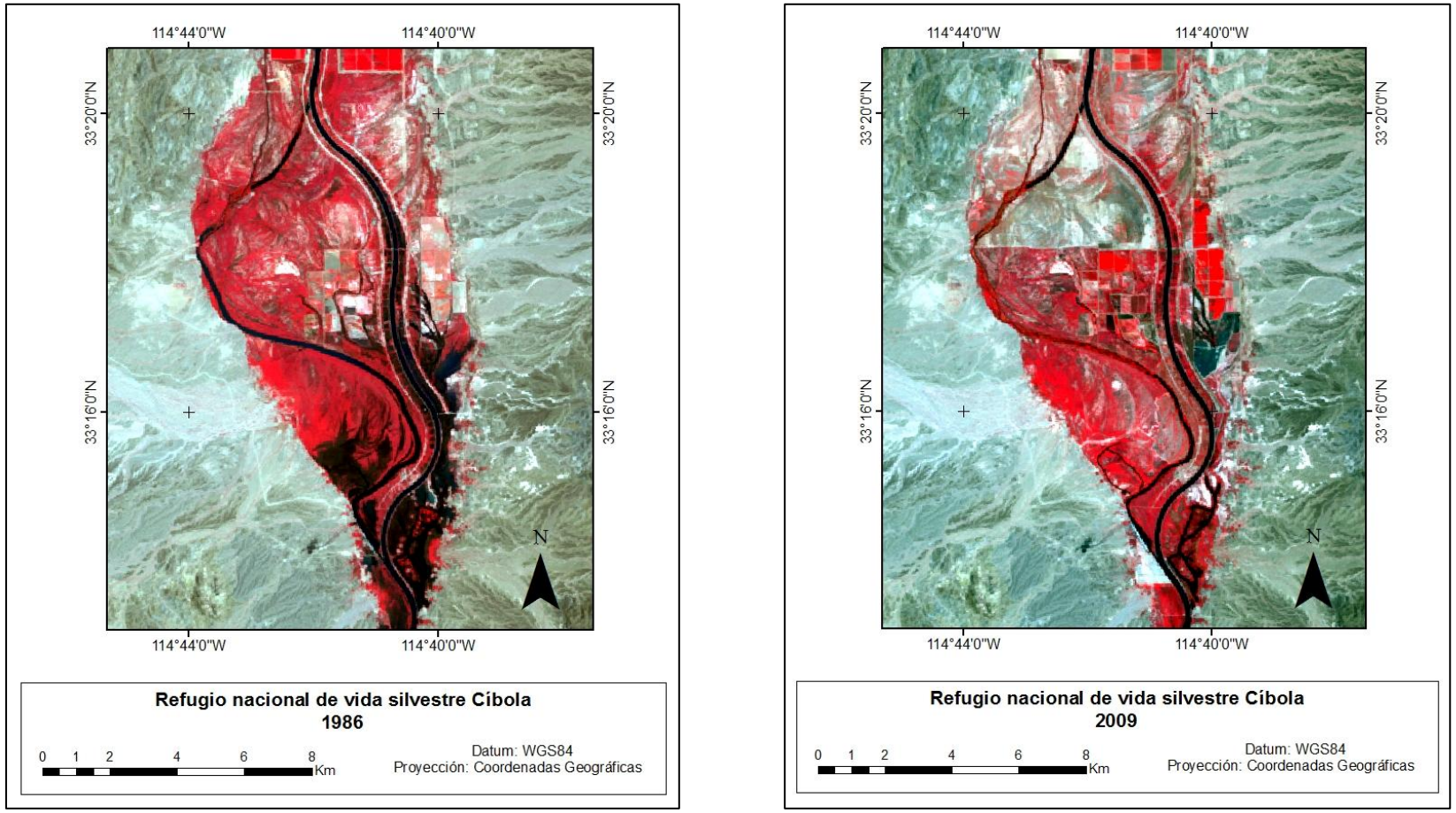


Figura 17. Zona 6: Refugio nacional de vida silvestre Cíbola , Arizona y Cal ifornia, EUA. I mágenes en falso color infrarrojo (RGB 4/3/2, Landsat 5 TM) de décadas diferentes. Esta zona presentó grandes cambios. En la imagen del año 2009, el refugio se ve dividido en dos partes: sur y norte, donde la parte norte se destaca por la ause ncia de vegetación y una importante reducción del área de las superficies cubiertas por agua.

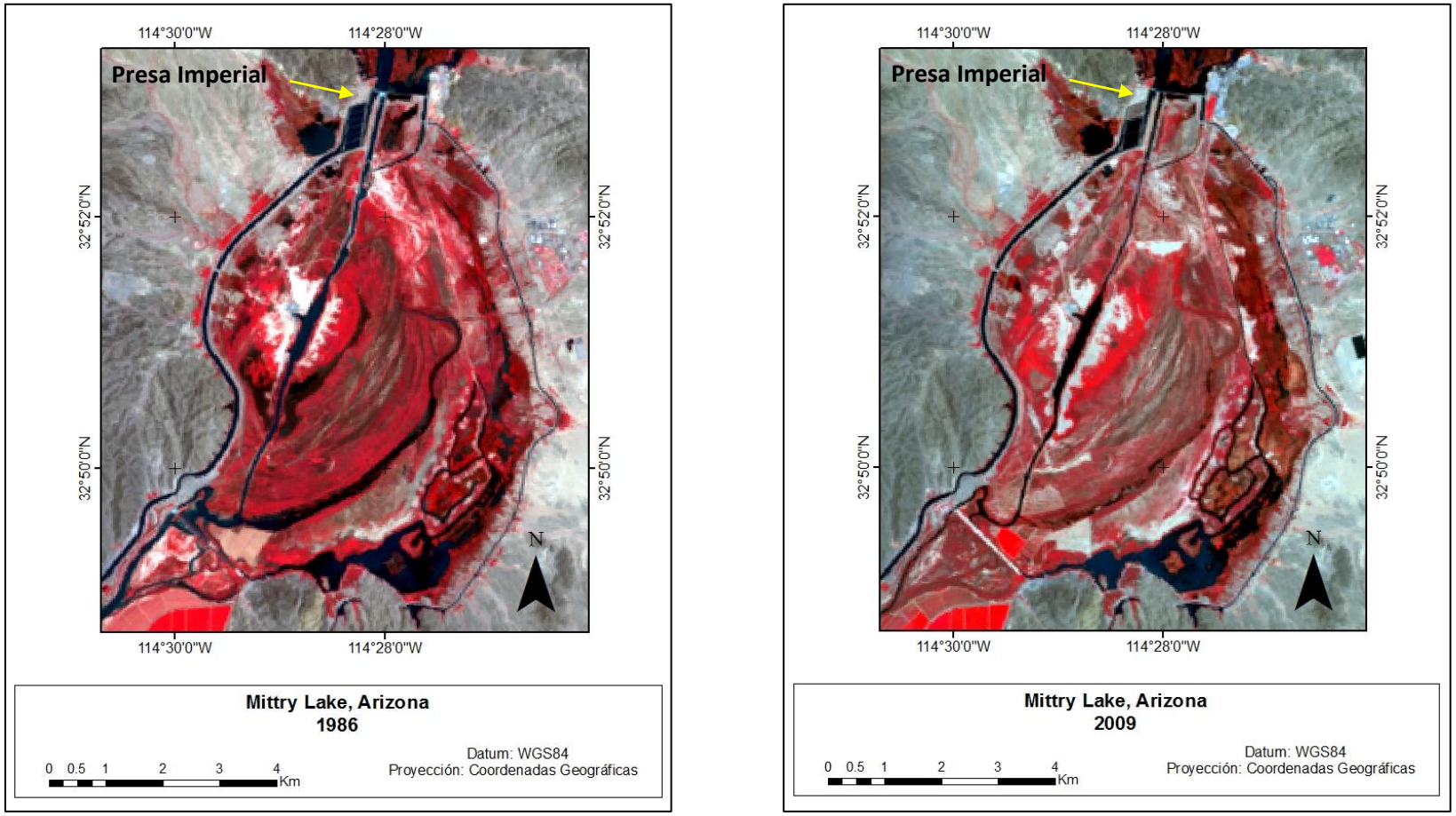


Figura 18. Zona 7: Mittry Lake, A rizona EUA. I mágenes en falso color infrarrojo (RGB 4/3/2, Landsat 5 TM) de décadas diferentes. Se observan importantes cambios en vegetación del humedal de la zona, así como desaparición o reducción de área de los cuerpos d e agua.

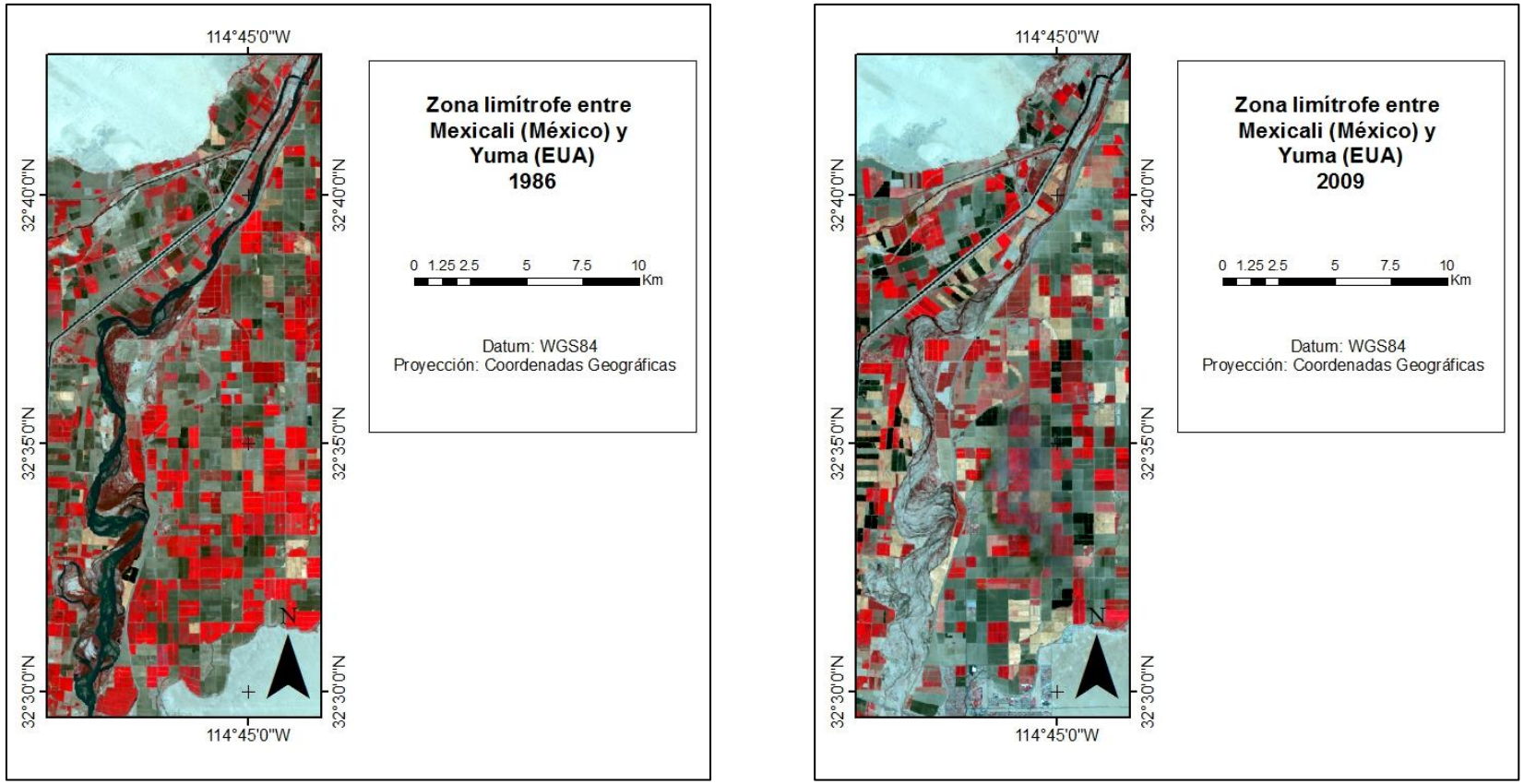
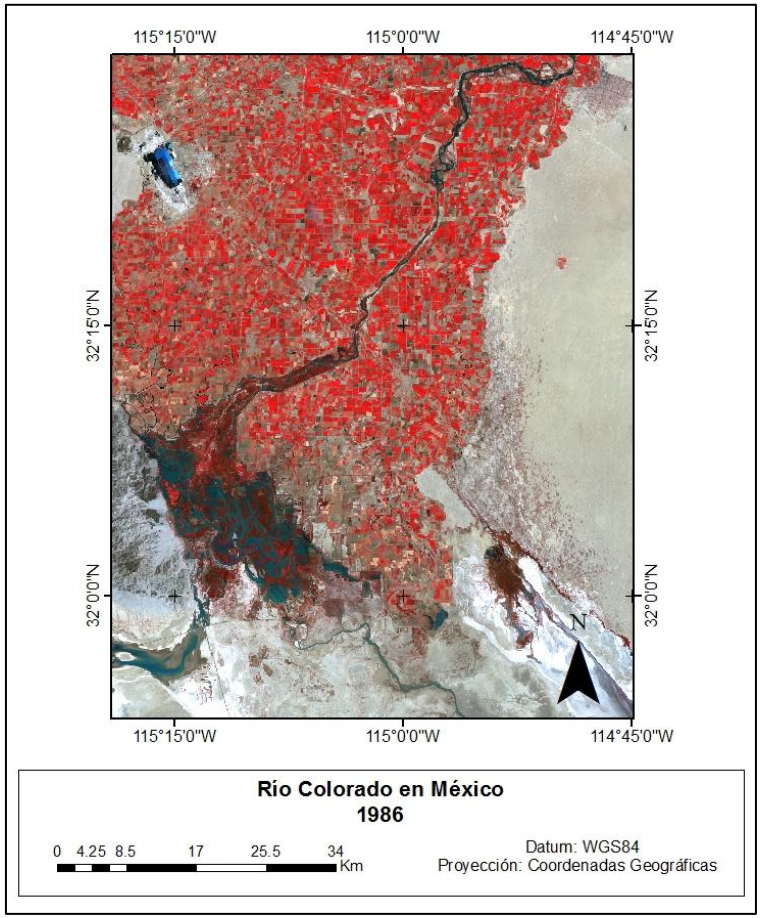


Figura 19. Zona 8: Tramo limítrofe de l río Colorado EUA-México. I mágenes en falso color infrarrojo (RGB 4/3/2, Landsat 5 TM) de décadas diferentes. México y EUA tienen como frontera el cauce principal del río Colorado, esta zona presenta grandes cambios en la vegetación, así como en el ancho del cauce. En la imagen del año 2009 el cauce del río no se distingue , es decir, el agua que llega al sur de la zona es escasa. La vegetación natural a lo largo del cauce principal del rio se ve muy reducida, casi inexistente.



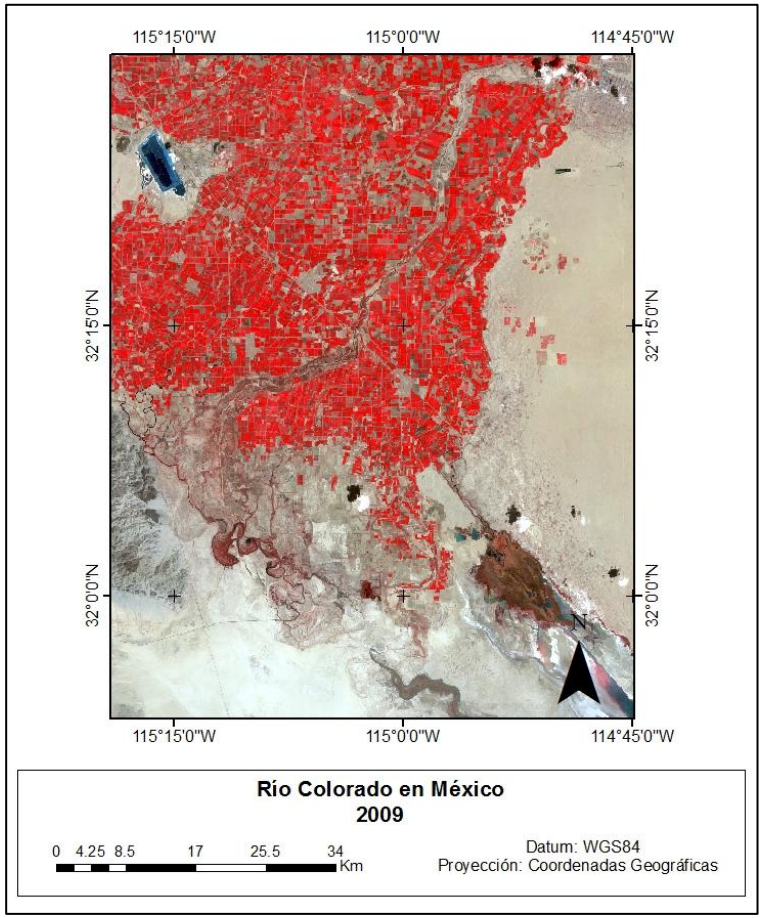


Figura 20. Zona 9: Rí o Colorado en México. I mágenes en falso color infrarrojo (RGB 4/3/2, Landsat 5 TM) de décadas diferentes. Esta zona es el curso bajo del río donde este finaliza desembocando en el Golfo de California. En la imagen del 2009 se observa qu e las aguas del río practicamente no llegan a esta parte del curso, provocando que el río quede casi seco, hecho que afecta a la vegetación de los humedales. También se aprecia el crecimiento de un húmedal artificial al sureste de la región que se identifica como la Ciénaga de Santa Clara y que no es el objeto de este trabajo de tesis.

5.2. Zona 1: Ruby Canyon, Utah , EUA

5.2.1 Descripción de la zona

La zona 1 se localizada en el estado de Utah, EUA. En estudio, la zona 1 se nombró como “Ruby Canyon”, debido a que se encuentra a poco más de 6 kilómetros al suroeste del Ruby Canyon, ubicado a lo largo del cauce principal del río Colorado, en la frontera de los estados de Utah y Colorado.

Según el Inventario Nacional de Humedales (INH) de los EUA realizado por el “U.S. Fish and Wildlife Service”, esta zona cuenta con humedales de tipo palustre. Estos ecosistemas son aquellos que contienen casi permanentemente agua, como las marismas, pantanos y ciénagas. La vegetación dominante de este tipo de humedales está constituida por las plantas perennes, es decir, plantas cuyo ciclo de vida dura 2 o más temporadas. También se puede encontrar vegetación hidrófita, es decir, vegetación acuática que crece principalmente en o por debajo de la superficie del agua, con excepción de musgos y líquenes. Este tipo de vegetación suele estar presente durante la mayor parte del año.

El INH de los EUA indica que en la zona 1 la vegetación perenne es representada principalmente por vegetación leñosa de no más de 6 metros de altura, como arbustos y árboles jóvenes de crecimiento lento. También la vegetación acuática está presente en los humedales de esta zona.

El régimen hídrico que el INH de los EUA reporta para los humedales de la zona 1 suele ser:

- Inundables: El agua superficial está presente durante largos períodos en la mayoría de los años, especialmente al comienzo de la temporada de crecimiento, pero está ausente para el final de la temporada.
- Inundado temporal: El agua superficial está presente por breves períodos durante la temporada de crecimiento, pero el nivel freático por lo general se encuentra muy por debajo de la superficie del suelo durante la mayor parte de la temporada de crecimiento.
- Semipermanentemente inundado: El agua superficial persiste durante toda la temporada de crecimiento en la mayoría de los años. Cuando el agua superficial

está ausente, el nivel freático está por lo general en o muy cerca de la superficie de la tierra.

Además el INH de los EUA reporta la existencia de un canal artificial en esta zona.

5.2.2. Cambios hidrológico s y de vegetación

En la figura 21 se presentan las imágenes en falso color infrarrojo para los años de 1972 (a) y de 2011 (b) con los cuerpos de agua identificados y vectorizados. Las imágenes correspondientes a otros años del periodo analizado se pueden consultar en el anexo 2. Como se observa en la figura 21-a, en 1972 se contaba solamente con el cauce principal del río Colorado (área # 1). En el 2011 se aprecian pequeños cuerpos de agua (Figura 21-b; área # 2) cercanos a las orillas del cauce principal del río. Estas nuevas extensiones de agua se formaron entre los años de 1992 y 1993, por la desviación del cauce principal del río. Esta desviación se hizo solamente con fines recreativos.

En la figura 22 se presentan las imágenes de NDVI para los años 1972 (a) y 2011 (b) con las áreas de la cubierta vegetal de los humedales identificados y vectorizados. Las imágenes correspondientes a otros años del periodo analizado se pueden consultar en el anexo 2. Las imágenes de NDVI, junto con las imágenes en falso color infrarrojo, revelan los cambios de uso de suelo que la zona 1 ha sufrido durante el periodo analizado. En la parte norte de la zona, en el periodo 1992-2002, los humedales fueron reemplazados por campos agrícolas (Figuras A2.14-A2.16). En el periodo 2007-2011 dichos campos ya no estuvieron presentes (Figuras A2.17 y A2.18). Dichos campo, probablemente, han sido abandonados, permitiendo que la vegetación nativa se recuperara. En las imágenes en falso color infrarrojo también se puede observar los cambios de uso de suelo descritos (Figuras A2.5-A2.9). En la parte central de la zona, los campos de cultivo fueron observados por primera vez en la imagen en falso color infrarrojo correspondiente al año 2009 (Figura 12-b). En el año 2011 los campos de cultivo permanecieron en el mismo lugar, lo que se pudo observar tanto en la imagen en falso color infrarrojo (Figuras 21-b y A2.9), como en la imagen de NDVI (Figuras 22-b y A2.18).

La figura 23 presenta las gráficas de las series de tiempo del área de los cuerpos de agua (a), del área de la cubierta vegetal de los humedales (b) y del flujo volumétrico promedio anual (c). Las series de tiempo abarcan un periodo de 40 años, desde 1972 a 2011, con una frecuencia de muestreo entre 4 y 10 años. Las gráficas no presentan tendencias claras, sino variaciones irregulares: ciclos de subidas y bajadas de corta duración y de magnitud muy variable. Para esta zona, el año de 1982 fue excluido del análisis. La imagen de Landsat 3 MSS de julio de 1982 presenta considerable nivel de ruido, por lo que fue excluida del análisis para evitar errores de discriminación entre agua y otras superficies (suelo, vegetación o sombras) e impedir un cálculo erróneo de las áreas.

La gráfica 23-a muestra la serie de tiempo del área de los cuerpos de agua para el periodo de 1972-2011, donde las áreas máximas se estimaron para los años 1997 (127.5 ha) y 2007 (132 ha), y las áreas mínimas se presentaron en los años de 1987 (100.7 ha) y 2002 (96.93 ha). El promedio de las áreas de los cuerpos de agua fue de 114 ha con una desviación estándar de 12.4 ha. Los máximos para los años de 1997 y 2007 y el mínimo para el 2002, coinciden con eventos climáticos: lluvias y deshielos importantes y temporadas de sequía, respectivamente. Sin embargo, en 1987 se observa el mínimo en el área de los cuerpos de agua a pesar de las fuertes lluvias y deshielos que se produjeron en 1983-1989. Esta disminución de área pudiera deberse a que parte de los cuerpos de agua superficiales estén cubiertos por vegetación acuática. Hecho que puede producir errores durante la delimitación de los cuerpos de agua y cálculo de su área.

La gráfica 23-b muestra la serie de tiempo del área de la cubierta vegetal de los humedales para el periodo de 1972-2011, donde las áreas máximas se estimaron para los años de 1987 (453.6 ha) y 2007 (435.5 ha), el área mínima se apreció en el año 2002 (268.3 ha). El promedio del área de la cobertura vegetal fue de 377.8 ha con una desviación estándar de 57.9 ha. Los mínimos y máximos estimados coinciden con eventos climáticos que se presentaron en estos años.

Por último la gráfica 23-c muestra el registro del flujo volumétrico promedio anual para el periodo de 1972-2011, medido por la estación 09-163500. El promedio del flujo volumétrico en los años analizados fue de 159.83 m^3/s con una desviación estándar de

85.56 m^3/s. Los flujos volumétrico máximos se registraron en los años 1997 (289.4 m^3/s) y 2011 (274.4 m^3/s). Los años de 1977 (62.8 m^3/s) y 2002 (64.2 m^3/s) presentaron los mínimos locales, los concuerdan con los periodos de sequía, mientras que el máximo de 1997 coindice con la temporada de lluvias importantes. Sin embargo, en el 2011 se observa un flujo volumétrico alto a pesar de ser un periodo de sequía.

Se realizó el análisis de asociación lineal entre los datos de las tres gráficas de la figura 23. La tabla 9 muestra el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson usando la ecuación 12 (ver subcapítulo 4.3).

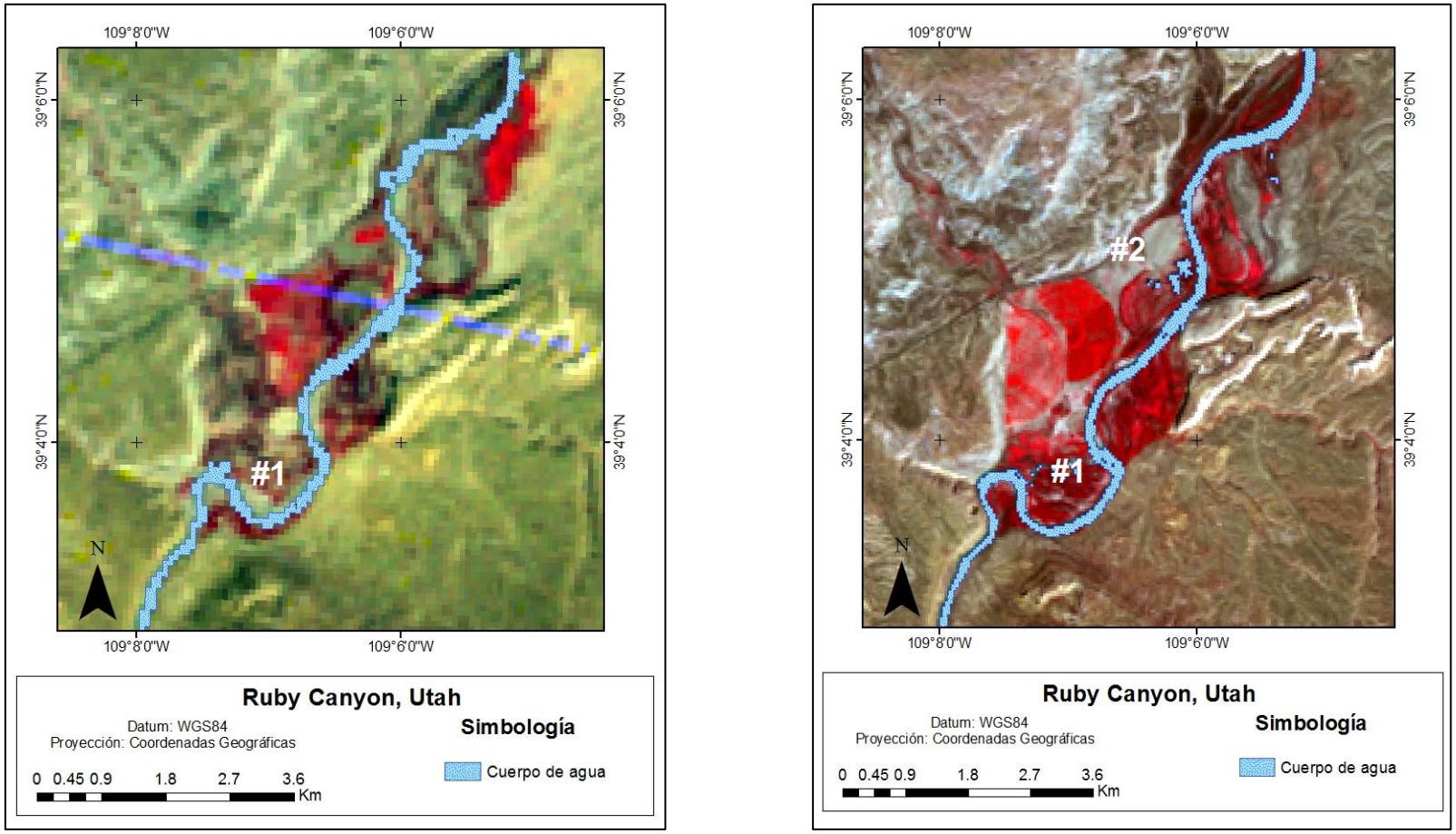
Tabla 9. Coeficiente de Pearson de acuerdo con la asociación line al entre los datos de flujo volumétrico promedio anual, área de cuerpos de agua y área de vegetación de la zona 1.

r_{xy}	Flujo volumétrico promedio anual	Área de cuerpos de agua
Área de cuerpos de agua	0.20	-
Área de vegetación	0.40	0.38

En la tabla 9 se observa que existe una correlación positiva baja y muy baja entre las variables analizadas. Aunque las correlaciones hayan sido bajas y muy bajas entre las variables, esto no indica que éstas no tengan una relación entre sí (asociación no lineal).

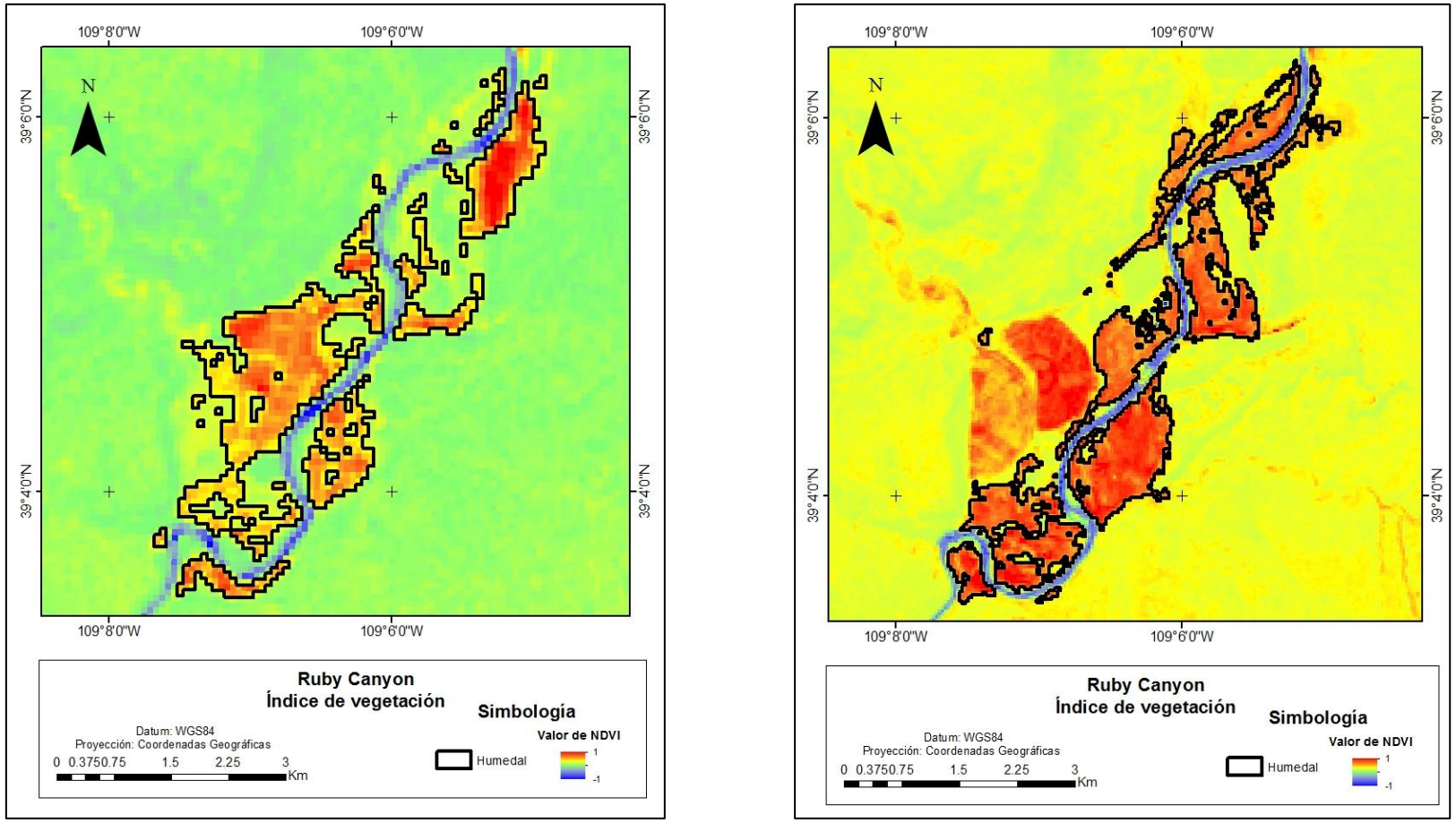
Con el aumento o la disminución del flujo volumétrico, se esperaría el aumento o disminución, respectivamente, de la aportación de agua a la zona, por lo que también se esperaría el incremento o el decremento del área de los cuerpos de agua y de la cubierta vegetal de los humedales. Algunas actividades antropogénicas pueden cambiar esta relación lineal. La transformación de los suelos de los humedales a campos agrícolas, por ejemplo, lleva a una disminución del área de la cubierta vegetal de los humedales y eventualmente también a un decremento del área de los cuerpos de agua debido al agua utilizada para irrigación, aunque el flujo volumétrico aumente. En el caso de la zona 1, el flujo volumétrico máximo se observó en 1997, produciendo un importante máximo local en el área de los cuerpos de agua. Sin embargo, no se observó el aumento importante en el área de la cobertura vegetal, debido a que en el periodo 1992-2007 los humedales en la parte norte fueron reemplazados por campos de cultivo.

Es importante mencionar, que la estación de medición de flujo volumétrico se encuentra ubicada aproximadamente a 17 km aguas arriba de la zona 1. A lo largo de este tramo, el río atraviesa una zona agrícola, donde el agua del río puede ser desviada para el riego de los campos, provocando una disminución en la relación lineal entre las variables.



a) b)

Figura 21. Zona 1: Ruby Canyo n, Utah, EUA. I dentificación de los cuerpos de agua para los años de 1972 (a) y 2011 (b). Las imágenes de fondo son en falso color infrarroj o RGB 6/5/4 de Landsat 1 MSS y RGB 4/3/2 Landsat 5 TM en a y b , respectivamente.



a) b)

Figura 22. Zona 1: Ruby Canyon, Utah, EUA. Imagen de NDVI para el año 1972 (a) y 2011 (b). Las áreas de la cubierta vegetal d e los humedales están vectorizadas.

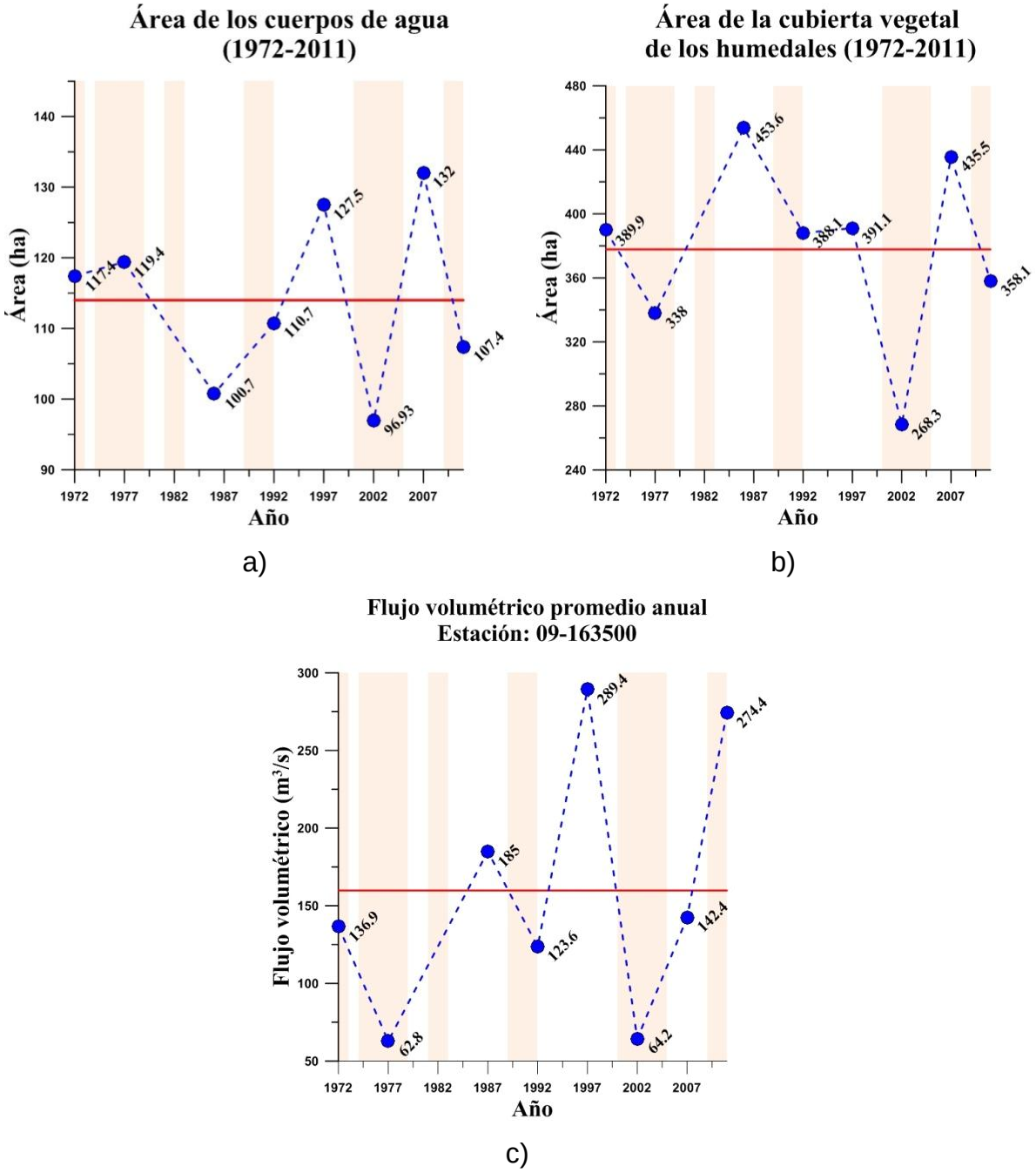


Figura 23. Zona 1: Ruby Canyon , Utah, EUA. Series de tiempo del área de los cuerpos de agua (a), del área de la cubierta vegetal de los humedales (b) y del flujo volumétrico promedio anual (c) . Las líneas rojas representan el promedio para cada una de las variables. Las franjas en tono anaranjado claro simbolizan las temporadas de sequía (de https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/drought/ ; Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (***National Oceanic and Atmospheric Administration***, NOAA, por sus siglas en inglés), Centro Nacional de Información Ambiental (National Centers for Enviromental Information, en inglés)) .

5.3. Zona 2: Cisco, Utah, EUA

5.3.1 Descripción de la zona

La zona 2 se encuentra localizada en el estado de Utah, EUA. En este estudio, la zona 2 recibió el nombre de “Cisco” debido a que se encuentra a 7 kilómetros al noroeste de un pequeño pueblo fantasma llamado por el mismo nombre, ubicado en el condado de Grand, Utah.

De acuerdo con el INH de EUA, la zona 2 cuenta con humedales de tipo palustre, con vegetación perenne (arbustos y árboles jóvenes de crecimiento lento) y vegetación hidrófita. Su régimen hídrico suele ser semipermanentemente inundado.

5.3.2. Cambios hidrológi cos y de vegetación

En la figura 24 se presentan las imágenes en falso color infrarrojo para los años de 1972 (a) y 2011 (b) con los cuerpos de agua identificados y vectorizados. Las imágenes de otros años del periodo analizado se pueden consultar en el anexo 3. En la figura 24-a se observa que la zona cuenta solamente con el cauce principal del río Colorado, no existen cuerpos de agua cercanos al cauce. Durante los años de 1972 y 2011, no se registran modificaciones en el flujo del río pero sí una reducción del ancho del cauce del río y la aparición de islas fluviales.

La figura 25 muestra las imágenes de NDVI para los años de 1972 (a) y 2011 (b) con las áreas de la cubierta vegetal de los humedales identificadas y vectorizadas. Las imágenes correspondientes a otros años del periodo analizado se pueden consultar en el anexo 3. La cobertura vegetal de la zona ha sufrido varias modificaciones. En la parte norte del área a partir del año 2002 se observa el cambio de uso de suelo, donde la vegetación natural del humedal fue reemplazada por campos agrícolas. Estos cultivos aparecieron en el 2002, y estuvieron presentes hasta el final del periodo analizado, sin evidentes cambios del área que dichos cultivos ocupan (Figuras A3.7-A3.9 (falso color infrarrojo); Figuras A3.16-A3.18 (NDVI)). Lo que cabe destacar es la desaparición gradual de la vegetación de los humedales en la parte sur de la zona. No hay evidencia de influencia antropogénica (cambio de uso de suelo) en esta parte, aunque tampoco podemos descartarla.

La figura 26 presenta las gráficas de las series de tiempo del área de los cuerpos de agua (a), del área de la cubierta vegetal de los humedales (b) y del flujo volumétrico promedio anual (c). Las series de tiempo abarcan el periodo de 40 años, desde 1972 a 2011, con una frecuencia de muestreo entre 4 y 10 años. Para esta zona, al igual que la zona 1, el año de 1982 fue excluido del análisis. La imagen de Landsat 3 MSS de julio de 1982 presenta considerable nivel de ruido. Por lo que fue excluida del análisis para evitar errores de discriminación entre agua y otras superficies (suelo, vegetación o sombras) e impedir un cálculo erróneo de las áreas.

La figura 26-a muestra la serie de tiempo del área de los cuerpos de agua para el periodo de 1972-2011. La gráfica no presenta tendencia clara, sino variaciones irregulares: ciclos de subidas y bajadas de corta duración y de magnitud muy variable. El año de 1977 muestra un incremento excesivo que sobresale de los demás datos, tomando un valor de 184 ha. Dicho incremento no coincide con eventos climáticos, ya que en el periodo de 1974-1979 fue temporada de sequía, por lo que se esperaría una disminución en las áreas de los cuerpos de agua. No fue posible explicar este incremento. Debido a que no se puede excluir la posible influencia de errores en la detección de los cuerpos de agua y del cálculo de su área para este año. Se analizaron las estadísticas principales de esta serie de tiempo tomando en cuenta el valor del área de los cuerpos de agua en 1977 (i) y sin tomarlo en cuenta (ii). El promedio de las áreas de cuerpos de agua fue de 116.09 ha (i) y 106.4 ha (ii) con una desviación estándar de 29.06 ha (i) y 10.39 ha (ii). Los años de 1997 (107.6 ha) y 2007 (119 ha) mostraron los máximos locales que concuerdan con años de altas precipitaciones y deshielos. Los mínimos locales se presentaron en los años de 1987 (92.34 ha) y 2002 (96.94 ha). El año 2002 coincide con el periodo de sequía. En 1987 se observa el mínimo del área de los cuerpos de agua a pesar de las fuertes lluvias y deshielos que se produjeron en 1983-1989, esta disminución de área pudiera deberse al incremento de la vegetación, lo que evita que los cuerpos de agua queden descubiertos, y producir errores durante la delimitación de los cuerpos de agua y en el cálculo de su área.

La figura 26-b muestra la serie de tiempo del área de la cubierta vegetal de los humedales para el periodo de 1972-2011. En este periodo, la serie de tiempo presenta una ligera tendencia decreciente indicando la disminución gradual de las áreas

cubiertas por vegetación. Según el ajuste lineal ($R^2 = 0.1$) de la serie, la tendencia decreciente supone una reducción de ~12.7 % (33.54 ha) en 40 años. La tendencia refleja la evolución de la serie de tiempo a largo plazo, indicando la presencia de algunos factores persistentes que afectan la serie. Como ya se mencionó, en las imágenes de NDVI y en falso color infrarrojo; se observa en la parte sur de la zona la desaparición gradual de la vegetación de los humedales, lo que puede causar la tendencia observada. Además de la tendencia, la gráfica muestra variaciones irregulares. Las variaciones irregulares, a diferencia de la tendencia, se debe a factores de corto plazo, provocados por fenómenos meteorológicos (sequía o lluvias, en nuestro caso). La serie de tiempo presenta máximos en los años 1987 (298.1 ha) y 1997 (272.4 ha) y mínimos en los años de 1977 (251.3 ha), 1992 (178.7 ha) y 2002 (206.7 ha). Estos máximos y mínimos coinciden con periodos de lluvias y deshielos importantes y periodos de sequía, respectivamente. La disminución del área de cobertura vegetal en el año 2002, además del factor climático, se presentó un componente antropogénico: la aparición de campos agrícolas en lugar de los humedales. El promedio del área de la cubierta vegetal de los humedales para los 40 años analizados fue de 242.1 ha con una desviación estándar de 40.68 ha.

La figura 26-c muestra el registro del flujo volumétrico promedio anual para el periodo de 1972-2011 medido por la estación 09-163500. Se usó la misma estación de medición de flujo volumétrico que para la zona 1, debido a que no existe ninguna otra estación entre estas dos zonas. La estación se encuentra a 30 km (río arriba) de la zona 2. La descripción de esta gráfica se dio en el apartado anterior (5.2.2).

Se realizó el análisis de asociación lineal entre los datos de las tres gráficas de la figura 26. Se calculó el coeficiente de correlación de Pearson usando la ecuación 12 (ver subcapítulo 4.3), los resultados del cálculo se presentan en la tabla 10.

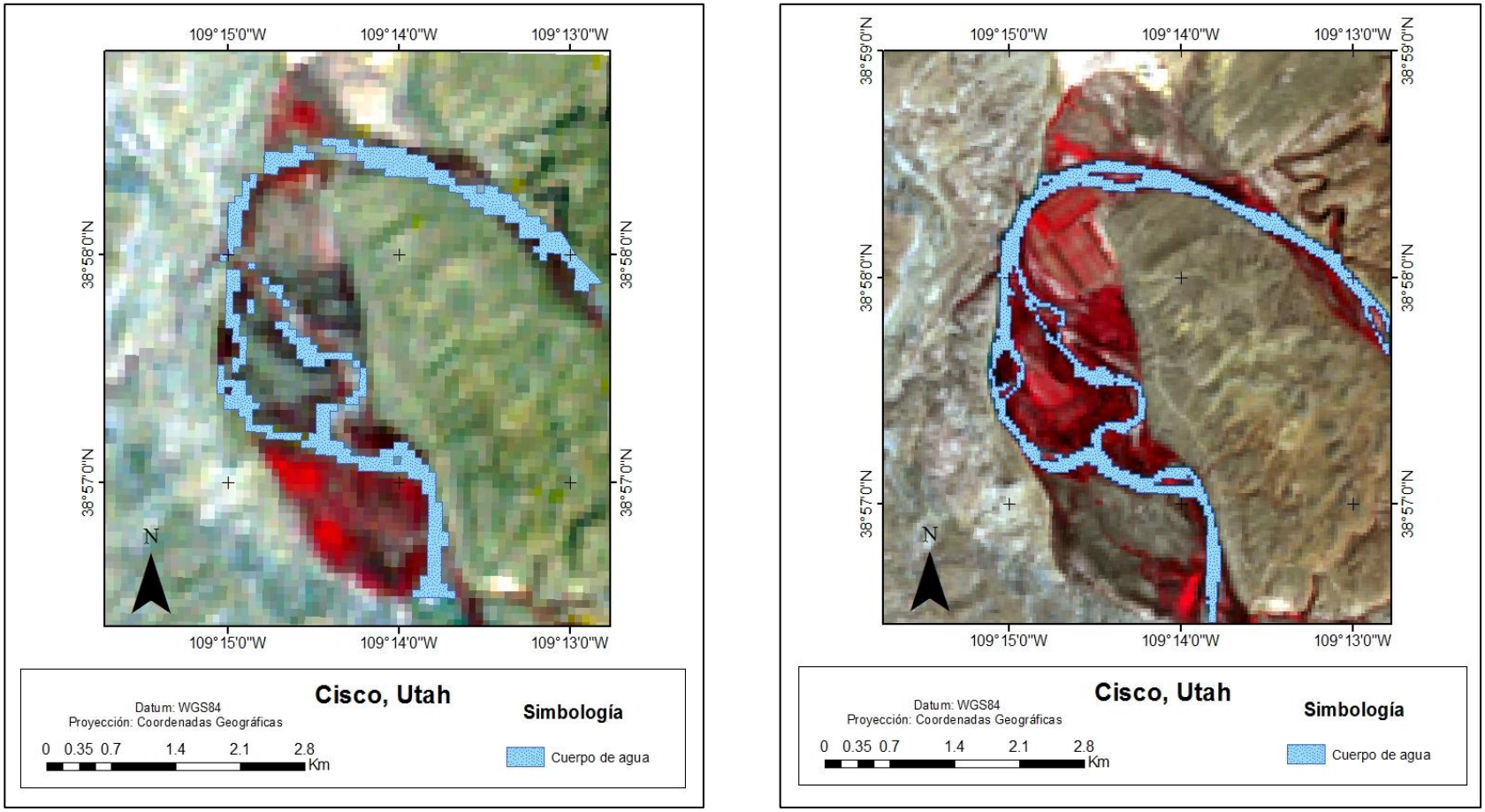
Tabla 10. Coeficiente de Pearson de acuerdo con la asociación lineal entre los datos de flujo volumétrico promedio anual, área de cuerpos de agua y área de vegetación de la zona 2.

r_{xy}	Flujo volumétrico promedio anual	Área de cuerpos de agua
Área de cuerpos de agua	-0.43	-
Área de vegetación	0.48	0.06

En la tabla 10 se observa que existe una correlación lineal negativa baja entre el flujo volumétrico y el área de cuerpos de agua, lo que significa que en los años de alto flujo volumétrico se presentaron áreas mínimas de agua superficial. Es importante mencionar que los años de 1977 y 1987 son los que más influenciaron a este resultado negativo. El área mínima calculada en 1987 podría ser explicada por la posible presencia de vegetación acuática lo que impidió discriminar correctamente el límite entre agua y suelo. Mientras que los factores que causaron áreas más elevadas de lo esperado, como en 1977, no pueden ser explicadas en este trabajo de tesis. Recordemos que la estación de medición de flujo volumétrico que se utilizó para este análisis se encuentra a 30 km de distancia de la zona 2. En este trayecto el río no está canalizado y el agua se infiltra o se destina para el riego de los cultivos ubicados a las orillas del río. Lo que puede influenciar en el resultado de la correlación lineal entre las variables de flujo volumétrico y las áreas de los cuerpos de agua.

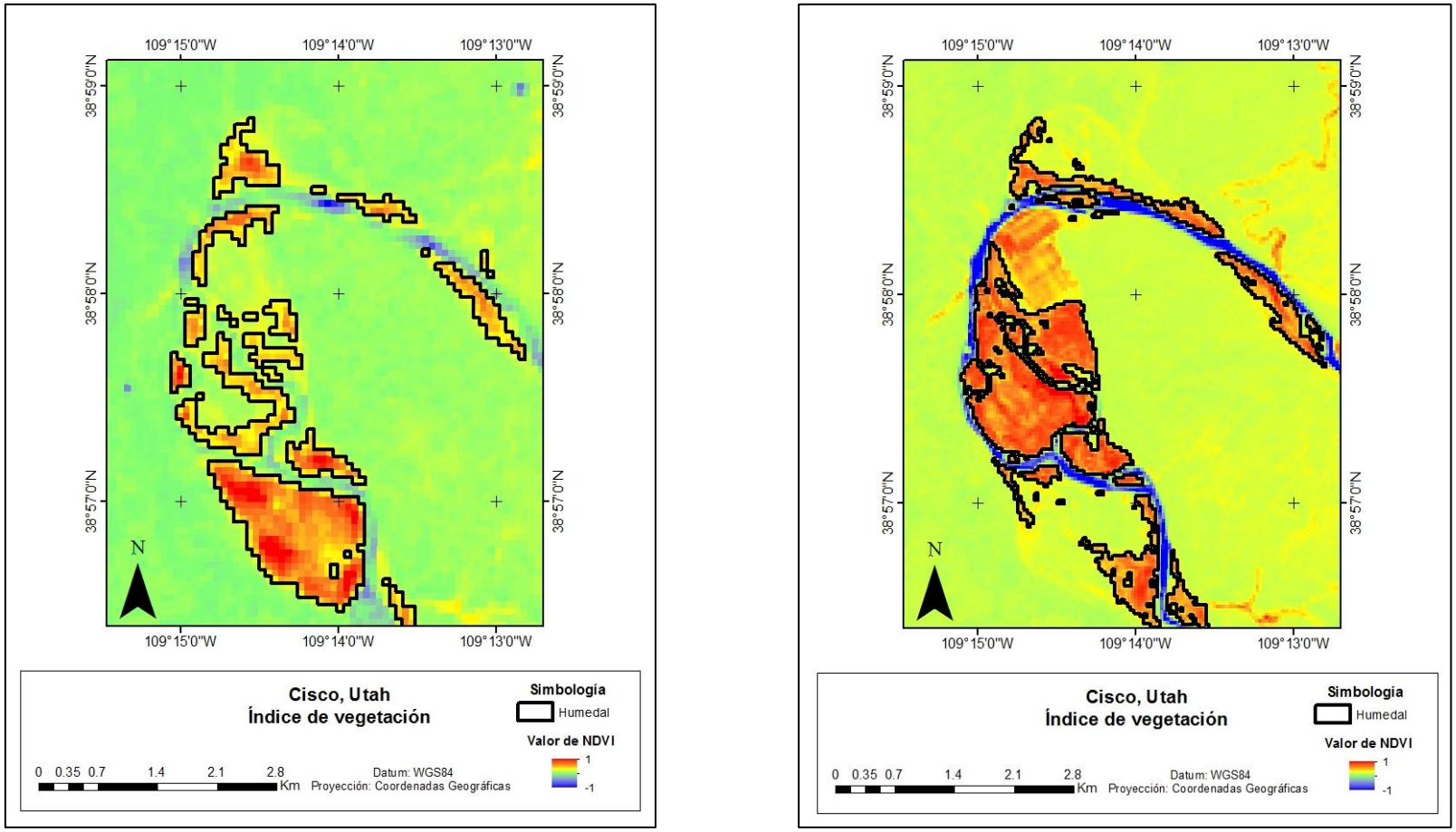
No existe correlación lineal entre las áreas de los cuerpos de agua y de cobertura vegetal de los humedales. Y se observa una correlación positiva baja entre el flujo volumétrico y las áreas de cobertura vegetal. Las variaciones en el flujo volumétrico se ven reflejadas en las variaciones de las áreas de cobertura vegetal, lo que representa una respuesta a la disponibilidad del recurso hídrico.

Es importante resaltar que las áreas de cobertura vegetal presentó una ligera tendencia decreciente (~13 % en 40 años). El factor que causa esta pérdida de área gradual no es del todo claro. En las imágenes en falso color infrarrojo y de NDVI (Anexo 3) se ve la disminución gradual del área de los humedales en la parte sur de la zona. Esta disminución no se relaciona con el cambio de uso de suelo, como en la parte norte. Debido a que las variables del flujo volumétrico y áreas de los cuerpos de agua no presentaron tendencias decrecientes, no se puede atribuir la disminución de la vegetación a los factores hídricos. La presencia de plagas podría ser la explicación a dicha tendencia, sin embargo, se requiere información adicional para comprobar esta hipótesis.



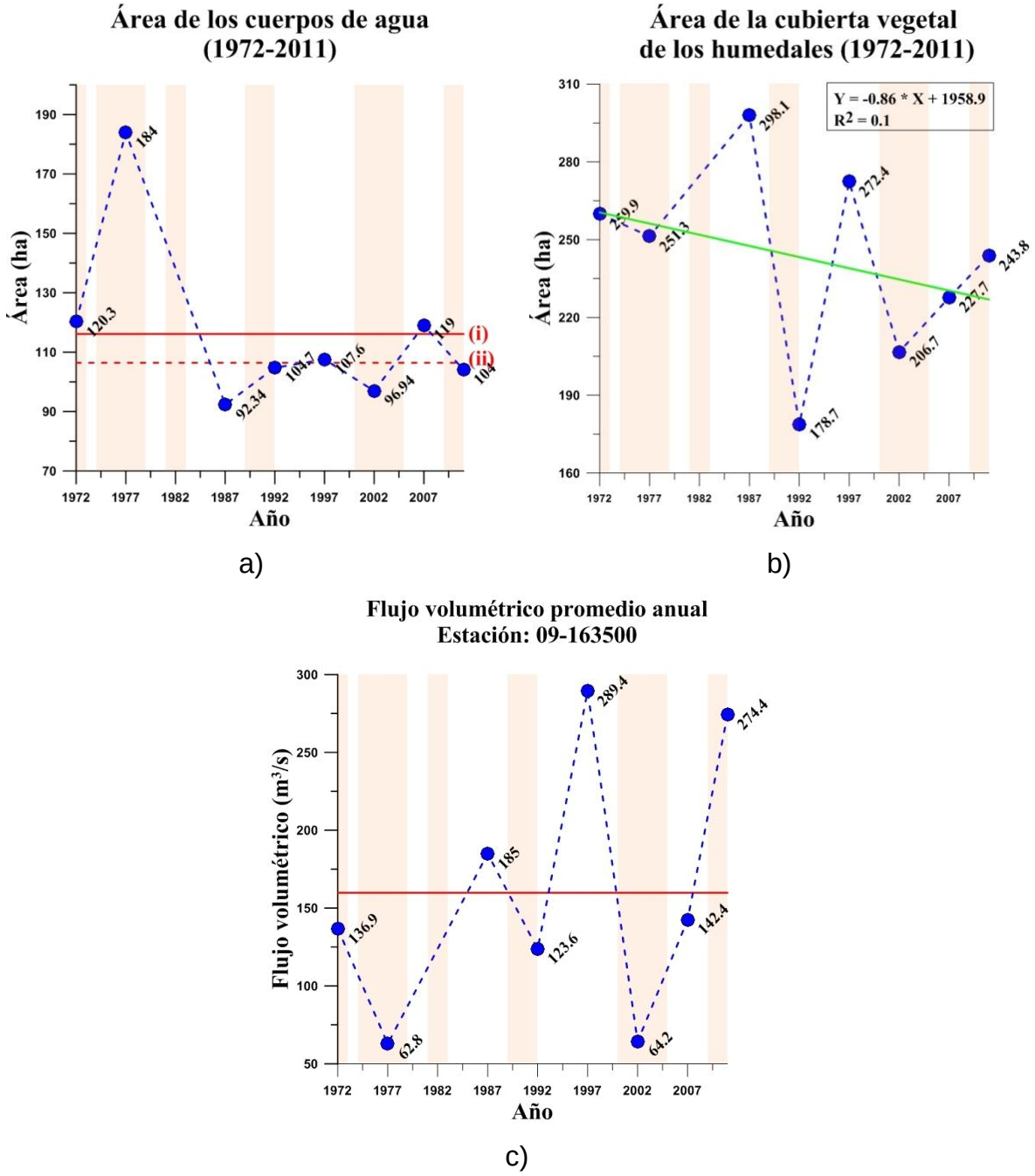
a) b)

Figura 24. Zona 2: Cisco, Utah, EUA. Identificación de lo s cuerpos de agua para los años de 1972 (a) y 2011 (b). Las imágenes de fondo son en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 1 MSS y RGB 4/3/2 Landsat 5 TM en a y b , respectivamente.



a) b)

Figura 25. Zona 2: Cisco, Utah, EUA. Imagen de NDVI para el año 1972 (a) y 2011 (b). Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas .



Figur a 26. Zona 2: Cisco, Utah, EUA. S eries de tiempo del área de los cuerpos de agua (a). Las líneas rojas continua y discontinua muestran el promedio de las áreas tomando en cuenta el año 1977 (i) y sin tomar en cuenta el año de 1977 (ii), respectivamente. Área de la cubierta vegetal de los humedales (b). La recta verde representa el ajuste por regresión lineal de los datos. La ecuación de la recta y el coeficiente de determinación del ajuste, $\boldsymbol{R^2}$, se presentan en la gráfica. Flujo volumétrico promedio anual (c). La línea roja representa el promedio del flujo volumétrico anual en el periodo analizado. Las franjas en tono anaranjado claro que se muestran en cada una de las gráficas significan las temporadas de sequía (de https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/drought/ ; Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (***National Oceanic and Atmospheric Administration***, NOAA, por sus siglas en inglés), Centro Nacional de Información Ambiental (National Centers for Enviromental Information, en inglés)) .

5.4. Zona 3: Moab, Utah, EUA

5.4.1 Descripción de la zona

Moab, es una pequeña ciudad ubicada en el condado de Grand, Utah, EUA, y se encuentra dentro de la zona seleccionada (zona 3). Dentro de esta zona también se encuentra "The Matheson Wetlands Preserve", el humedal más grande e intacto del río Colorado en el estado de Utah. El humedal está en preservación debido a sus valores naturales y biológicos, y se encuentra abierto a todo público (The Nature Conservancy´s Colorado y Green Rivers Area Program Manager, Sin año).

La zona 3, según el INH de los EUA, cuenta con humedales de tipo palustre, con vegetación perenne (arbustos y árboles jóvenes de crecimiento lento) y vegetación hidrófita. El régimen hídrico de los humedales en esta zona suele ser inundable, inundado temporal y semipermanentemente inundado.

En las orillas del río el INH de los EUA reporta tres zonas de clasificación "excavado", que describe zonas excavadas o drenadas por el hombre, a través de medios artificiales.

5.4.2. Cambios hidrológicos y de vegetación

En la figura 27 se presentan las imágenes en falso color infrarrojo para los años 1972 (a) y 2011 (b) con los cuerpos de agua identificados y vectorizados. Las imágenes correspondientes a otros años del periodo analizado se pueden consultar en el anexo 4. Como se observa en la figura 27-a, en 1972 se contaba con el cauce principal del río Colorado y un pequeño cuerpo de agua en el interior del humedal Matheson. El área de la superficie cubierta por agua en esta zona ha presentado variaciones a través de los años, sobre todo la presencia y tamaño de los cuerpos de agua al interior del humedal Matheson. También se observa una reducción en el ancho del cauce principal del río, y en el tamaño y cantidad de las islas fluviales a lo largo de este.

La figura 28 presenta las imágenes de NDVI para los años de 1972 (a) y 2011 (b) con las áreas de cubierta vegetal de los humedales identificadas y vectorizadas. Las imágenes correspondientes a otros años del periodo analizado se pueden consultar en el anexo 4. En las imágenes de NDVI y en falso color infrarrojo, se puede apreciar la

expansión de la ciudad de Moab hacia el humedal Matheson. El máximo crecimiento de la ciudad se observó en el periodo de 1982-1987 (Figuras A4.3 - A4.4 y A4.12 - A4.13). También se observan los daños que causó a la vegetación del humedal el incendio ocurrido en 2002 (Figuras A4.7 y A4.16) cuyos efectos todavía se pueden apreciar en las imágenes de 2007 (Figuras A4.8 y A4.17) y 2009 (Figura 14-b) y que es hasta el 2011 donde la vegetación nativa se ve recuperada (Figuras 27-b y 28-b).

La figura 29 presenta las gráficas de las series de tiempo del área de los cuerpos de agua (a), del área de la cubierta vegetal de los humedales (b) y del flujo volumétrico promedio anual (c). Las series de tiempo abarcan el periodo de 40 años, desde 1972 a 2011, con una frecuencia de muestreo de 5 a 4 años.

La gráfica a) de la figura 29 presenta la serie de tiempo del área de los cuerpos de agua para el periodo de 1972-2011. La gráfica no presenta tendencia definida, sino variaciones irregulares: ciclos de subidas y bajadas de corta duración y de magnitud muy variable. El promedio del área cubierta por agua para los años analizados fue de 136.6 ha con una desviación estándar de 31.4 ha. Los máximos locales se presentaron en los años de 1982 (161.3 ha) y 1997 (189.9 ha), donde el máximo en el año 1997 corresponde al periodo de lluvias y deshielos importantes. Los mínimos locales en áreas cubiertas por agua se mostraron en los años de 1977 (130.1 ha), 1992 (113.8 ha) y 2002 (90.36 ha), y coinciden con los periodos de sequía registrados en los mismos años. En 1982 a pesar de ser un año de sequía, se presentó un máximo local, incluso mayor que para el siguiente año (1987, 157.5 ha), que coindice con el periodo de lluvias y deshielos. Para explicar este hecho, es necesario analizar otras fuentes de información, no disponibles en este trabajo de tesis.

La gráfica b) de la figura 29 muestra la serie de tiempo del área de la cubierta vegetal de los humedales para el periodo de 1972-2011. En el periodo analizado la serie de tiempo presenta una clara tendencia decreciente de acuerdo al ajuste lineal ($R^2 = 0.7$), indicando la disminución del área de cubierta vegetal de ~28 % (132.77 ha) en 40 años. La tendencia refleja el progreso de la serie de tiempo a largo plazo, que indica la presencia de factores que afectan la serie. Basándonos en el análisis de las imágenes de NDVI y de falso color infrarrojo, podemos sugerir que la reducción gradual del área de la cobertura vegetal se debe la expansión de la ciudad de Moab hacia los

humedales. Además de la tendencia, la gráfica presenta variaciones irregulares, estas variaciones a diferencia de la tendencia, se deben a factores de corto plazo provocados por acontecimientos. La serie de tiempo presenta máximos en los años de 1982 (464.1 ha), 1992 (416.5 ha), 1997 (404.6 ha) y 2011 (372.3 ha). Mientras que los mínimos se presentaron en los años de 1977 (438.3 ha), 1987 (399.8 ha), y 2007 (293.4 ha). La disminución del área de la cobertura vegetal en 1977 y su aumento en 1997 coinciden con periodos de sequia y de lluvias, respectivamente. Para el año de 1987 el área de vegetación mostró una disminución del área, esto coindice con el crecimiento de la población hacia el humedal (1982-1987). Además en el 2007 se refleja la pérdida de vegetación de los humedales provocado por el incendio que se presentó en el 2002, y que para el 2011 se observa la recuperación de la zona dañada por el fuego. Los aumentos del área de la cobertura vegetal en los años de 1982 y 1992 no pueden ser explicadas con la información que se dispone en este trabajo, por lo que se requiere de información adicional. El promedio del área de la cobertura vegetal de los humedales para los 40 años estudiados fue de 399.3 ha con una desviación estándar de 54.6 ha.

La gráfica c) de la figura 29 muestra el registro del flujo volumétrico promedio anual para el periodo de 1972-2011 medido por la estación 09-180500. El promedio del flujo volumétrico para esta zona en los años analizados fue de 174.6 m^3/s con una desviación estándar de 86.1 m^3/s. Los flujos máximos locales se registraron en los años de 1987 (223.5 m^3/s), 1997 (311.4 m^3/s) y 2011 (276.3 m^3/s), Estos concuerdan con los años de lluvias y deshielos extraordinarios, excepto el 2011. Mientras que los mínimos locales coindicen con los periodos de sequía registrados, estos mínimos se mostraron en los años de 1977 (64.99 m^3/s), 1992 (133.7 m^3/s) y 2002 (68.13 m^3/s).

Se realizó el análisis de asociación lineal entre los datos de las tres gráficas de la figura 29. Se calculó el coeficiente de correlación de Pearson usando la ecuación 12 del subcapítulo 4.3, los resultados se muestran en la tabla 11.

Tabla 11. Coeficiente de Pearson de acuerdo con la asociación lineal entre los datos de flujo volumétrico promedio anual, área de cuerpos de agua y área de ve getación de la zona 3.

r_{xy}	Flujo volumétrico promedio anual	Área de cuerpos de agua
Área de cuerpos de agua	0.80	-
Área de vegetación	0.03	0.24

En la tabla 11 se observa que existe una correlación lineal positiva alta entre las variables de flujo volumétrico y de área de cuerpos de agua. Con las variaciones del flujo volumétrico del río, se esperaría un aumento o disminución, en la aportación del agua a la zona y por consiguiente, en el área de los cuerpos de agua. Los máximos y mínimos registrados en el flujo volumétrico del río coinciden con el aumento y decremento del área de los cuerpos de agua superficial. Es importante señalar que la estación 09-180500, se encuentra localizada a 50 km río arriba de la zona 3, en este recorrido el agua pasa a través de una serie de cañones, donde las tierras de cultivo son pequeñas extensiones de terreno y el agua no se pierde o no es destinada a otros usos, lo que permite que las variables de área de cuerpos de agua y flujo tengan una correlación lineal alta.

La variable del área de cobertura vegetal presentó una correlación lineal positiva muy baja en relación al flujo volumétrico y con las áreas de los cuerpos de agua. Esto indica, que las variaciones temporales en el área de la cobertura vegetal no dependen, prácticamente, de las condiciones hídricas de la zona. El incendio ocurrido en 2002, así como el crecimiento acelerado de la ciudad (1982-1987) parecen tener mayor influencia sobre las variaciones irregulares en las áreas de vegetación. Es importante resaltar, que las áreas de cobertura vegetal presentaron una clara tendencia de disminución (~28 % en 40 años). El factor principal que causa esta disminución gradual del área de vegetación es la expansión de la ciudad hacia el humedal.

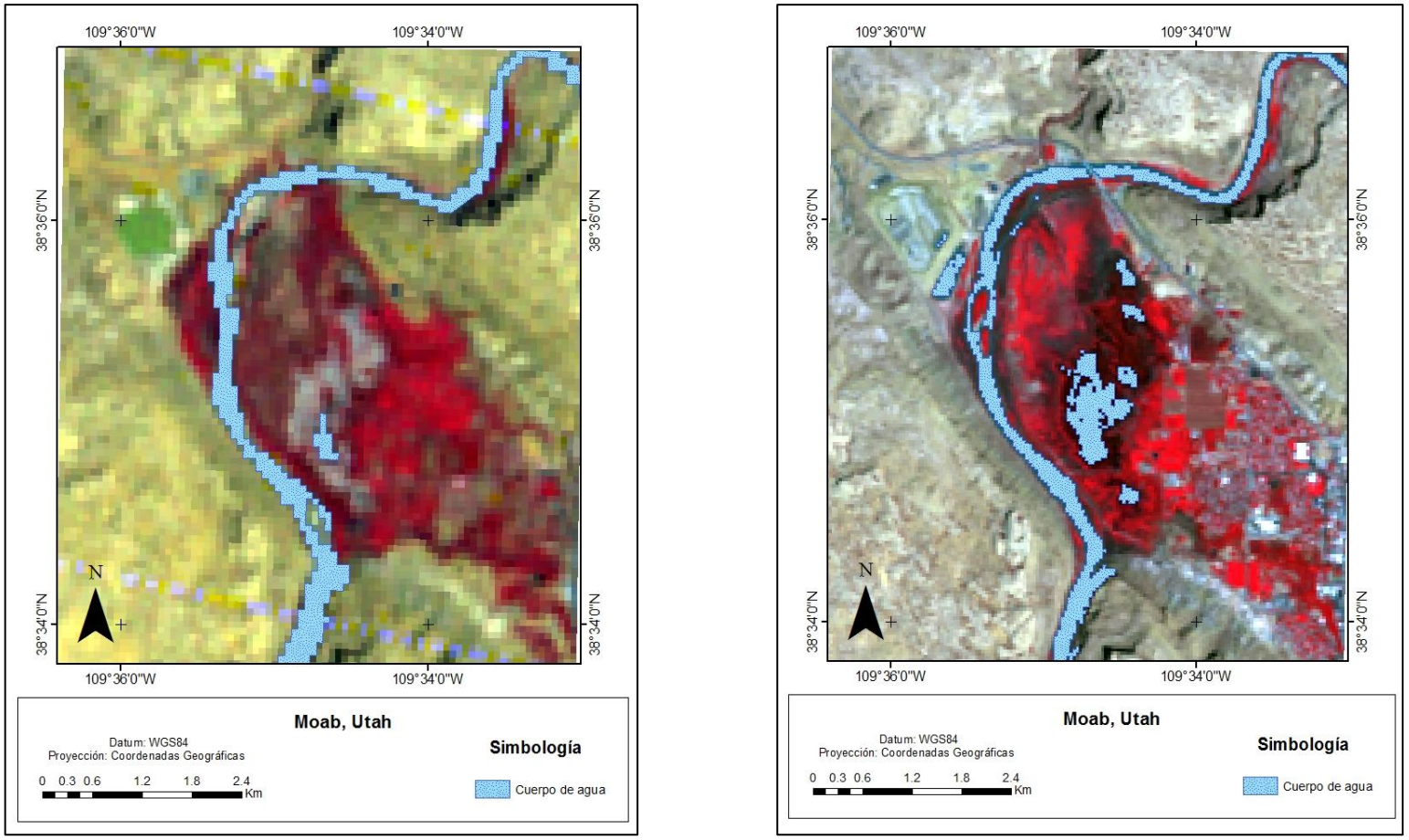
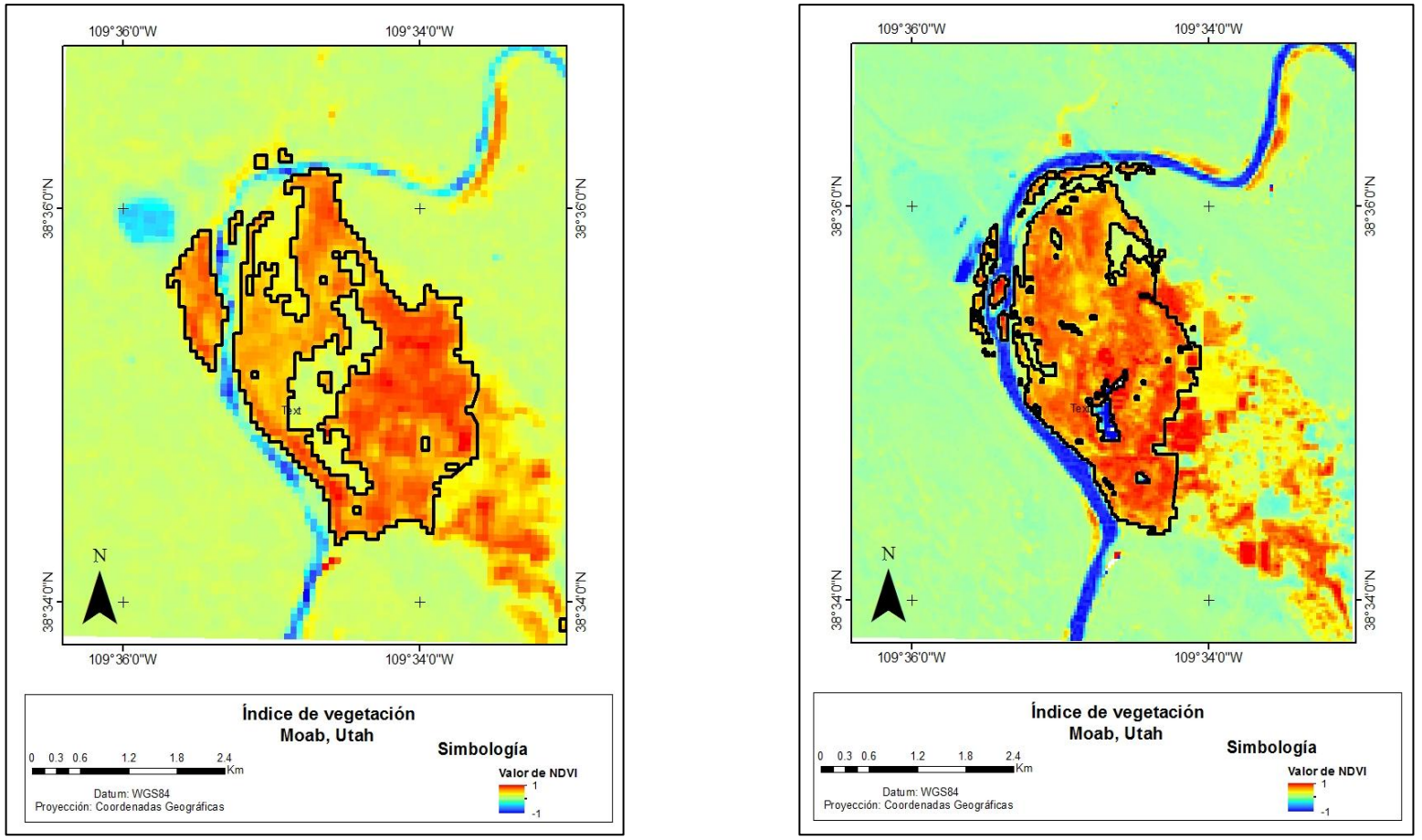


Figura 27. Zona 3: Moab, Utah, EUA . Identificación de los cuerpos de agua para los años de 1972 (a) y 2011 (b). Las imágenes de fondo son en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 1 MSS y RGB 4/3/2 Landsat 5 TM en a y b , respectivamente.



a) b)

Figura 28. Zona 3: Moab, Utah, EU A. Imagen de NDVI para el año 1972 (a) y 2011 (b). Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas.

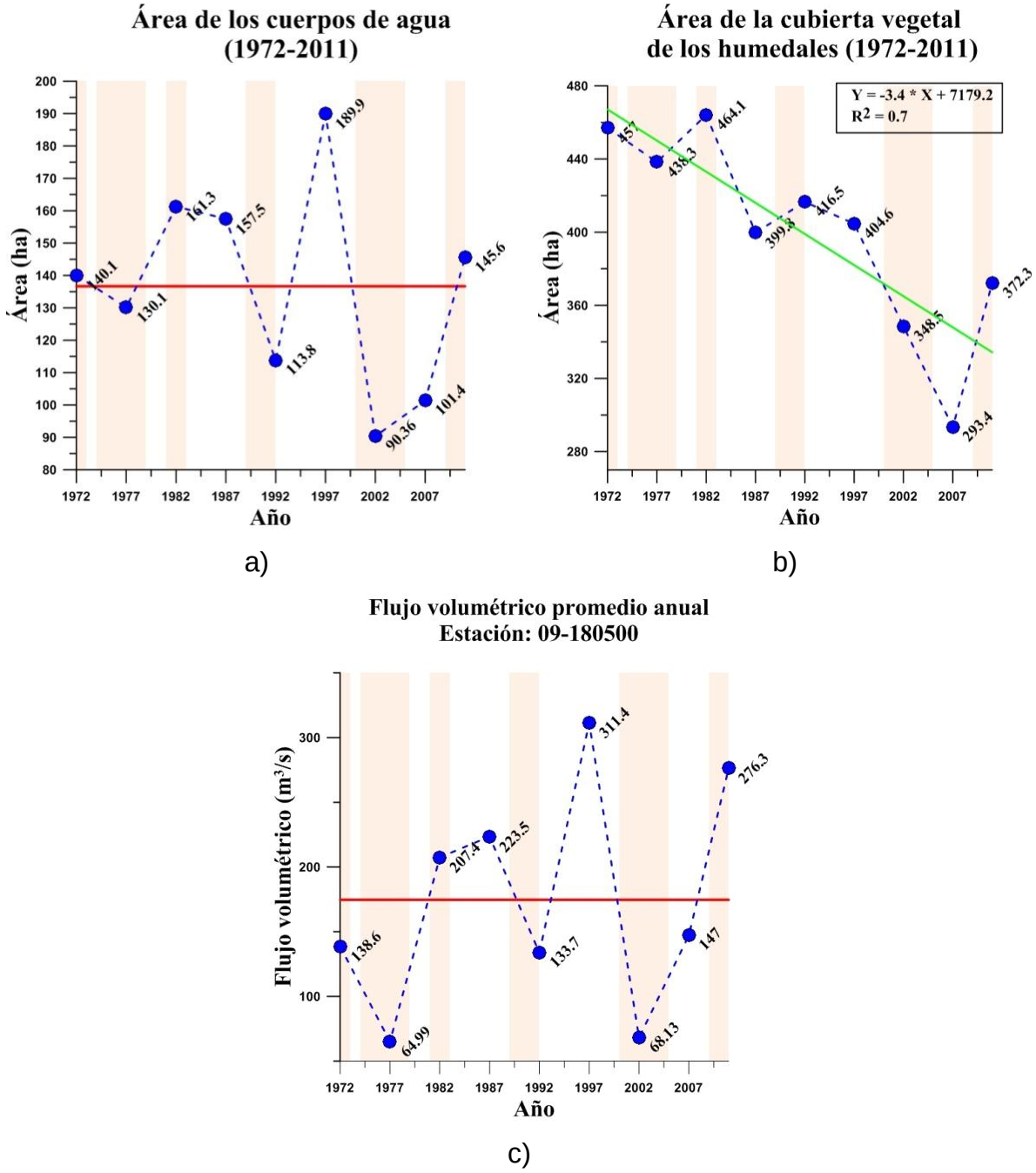


Figura 29. Zona 3 : Moab, Utah, EUA. S eries de tiempo del área de los cuerpos de agua (a), del área de la cubiert a vegetal de los humedales (b) y del flujo volumétrico promedio anual (c) . La línea roja representa el promedio de los datos en el periodo analizado en (a) y (c). La recta verde representa el ajuste por regresión lineal de los datos en (b). La ecuación de la recta y el coeficiente de determinación del ajuste, $\boldsymbol{R^2}$, se presentan en la gráfica. Las franjas en tono anaranjado claro que se muestran en cada una de las gráficas significan las temporadas de sequía (de https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/drought/ ; Admi nistración Nacional Oceánica y Atmosférica (***National Oceanic and Atmospheric Administration***, NOAA, por sus siglas en inglés), Centro Nacional de Información Ambiental (National Centers for Enviromental Information, en inglés)) .

5.5. Zona 4: Topock Mars h, Arizona, EUA

5.5.1 Descripción de la zona

La zona 4, corresponde a “Topock Marsh” que se encuentra en el condado de Mohave, Arizona, EUA. Topock Marsh es un embalse de aguas poco profundas y forma parte del Refugio Nacional de Vida Silvestre Havasu (Havasu NWR, por sus siglas en inglés). Se considera un área de uso múltiple: sirve de hábitat para nidificación de avifauna, es el sitio más grande de Arizona para el avistamiento de aves y es considerado un lugar crítico para el descanso de numerosas especies migratorias. Además se pueden realizar actividades de pesca y caza deportiva (Guay, 2001).

Antes de la construcción de las presas Hoover y Parker, en 1936 y 1938, respectivamente; el área de Topock Marsh se describe como una zona en la llanura de inundación del río Colorado en la Cuenca Baja, que tenía un cauce del río principal bien definido. Con la construcción de las presas mencionadas, el flujo del río disminuyó drásticamente (más de un 60 %). La disminución de la velocidad del río provocó una rápida deposición de sedimentos y el deterioro del cauce principal del río. Adicionalmente, el llenado del Lago Havasu (Lake Havasu, en inglés) río abajo, originó un efecto de remanso (backwater effect, en inglés), lo que hizo que aumentara el nivel del agua en Topock Marsh. En este periodo, Topock Marsh estuvo conectado libremente con el río, por lo que los niveles de agua dependían de las operaciones en las presas y del lago y además de las variaciones en el flujo del río. Para prevenir las inundaciones causadas por el aumento del nivel del agua, el cauce principal del río fue canalizado en 1951. Sin embargo, la canalización provocó la desconexión del río con Topock Marsh, lo que causó que su nivel de agua disminuyera considerablemente. En 1965 inició el proyecto de estabilización del nivel de agua en Topock Marsh, el objetivo de este proyecto era mantener 1,618 ha de Topock Marsh con un nivel de agua de 122 m (455 pies) y controlar la calidad del agua, mediante la construcción de estructuras que permiten la entrada y salida del agua.

Las aguas del río Colorado entran a Topock Marsh a través de dos canales de derivación: Intel Canal y Farm Ditch (Figura 30), construidos en 1966 y 1968, respectivamente. El agua que no se pierde por evaporación o filtración es liberada a

través de la apertura del Dique Sur (Figura 30), cuya construcción se completó en 1965, donde finalmente el agua se reúne con el río.

A partir del inicio de los años 70´s, dentro de de Topock Marsh han aplicado distintos planes de manejo del agua, con el objetivo de establecer un nivel del agua para mantener las condiciones hídricas óptimas para la preservación del humedal. En general, el nivel del agua se eleva en primavera y se mantiene estable hasta otoño. En esta época del año el nivel del agua disminuye para retirar el agua estancada.

Según el INH de los EUA, Topock Marsh cuenta con dos tipos de humedales: los palustres y los lacustres. Los humedales de tipo lacustres son los que están conformados por lagos o lagunas de agua dulce permanentes o estacionales y las orillas sujetas a inundación. Los lagos que existen en esta zona son considerados sistemas lacustres, ya que son hábitats de aguas profundas y se encuentran dentro de un canal del río represado. Estos lagos además son clasificados como lagos artificiales, ya que han sido creados o modificados por una barrera o represa que obstruye la entrada o salida de agua.

La vegetación que existe en esta zona es variada, en algunos sitios la vegetación presente no excede los 6 m de altura, mientras que en otros la cubierta vegetal se clasifica de tipo bosque, la cual sobrepasa los 6 m de altura. Los arbustos o árboles cuentan con hojas caducas (caducifolio), es decir, pierden su follaje durante una parte del año, en la temporada de frío (invierno) principalmente. También la vegetación hidrófita o acuática está presente en esta zona.

El régimen hídrico de los humedales de Topock Marsh suele ser inundado temporal, semipermanentemente inundado e inundable. Y además también se clasifican como:

- Intermitente exp uesto: El agua superficial está presente durante todo el año, excepto en los años de sequía extrema.
- Intermitente inundado: El agua superficial está presente por periodos variables sin periodicidad estacional detectable. Estos hábitats son muy dependientes del clima.

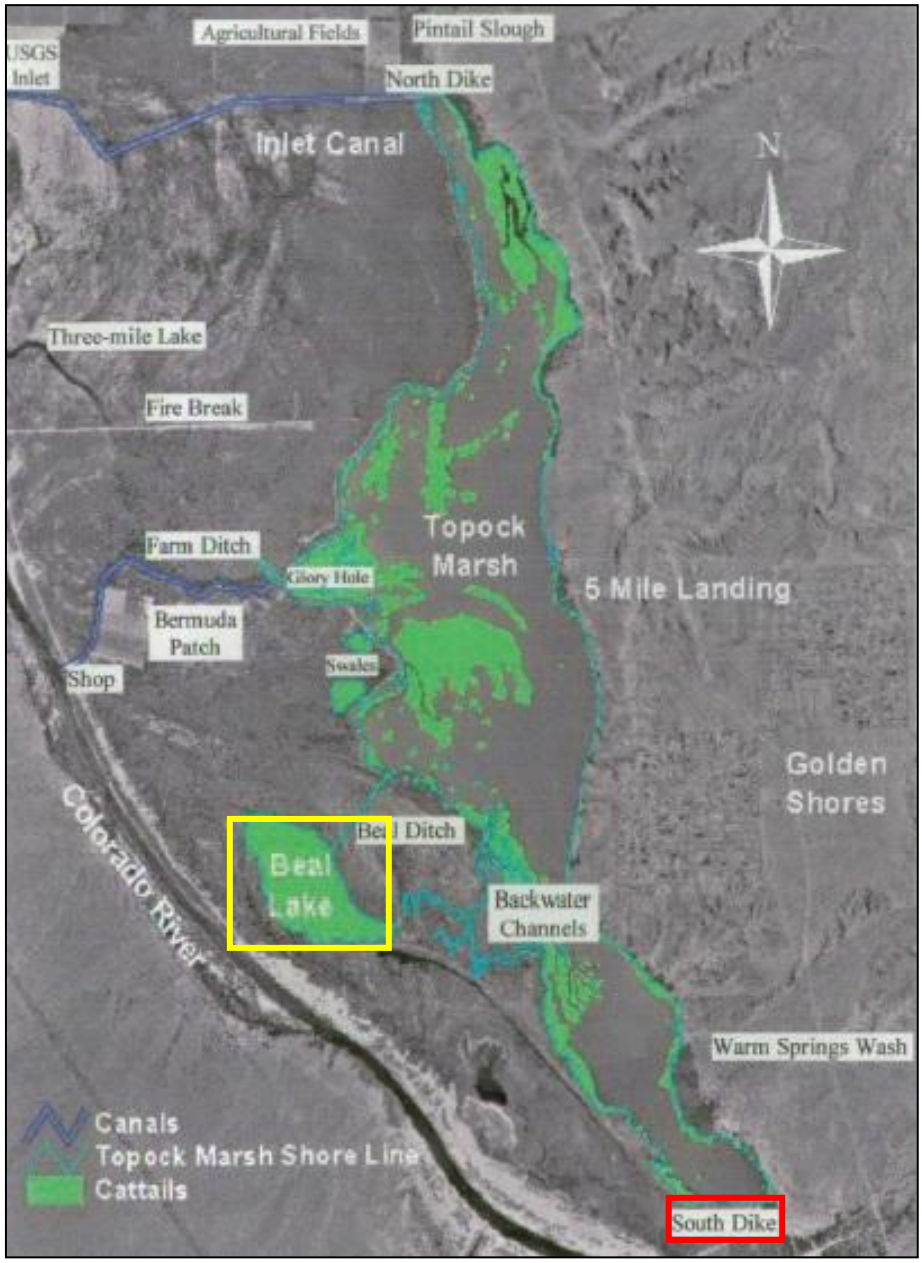


Figura 30. Topock Marsh, Arizona, EUA . En color azul se presentan los canales de derivación que desvían el agua del río Colorado hacia Topock Marsh . En color verde agua , se presenta la línea de costa de Topock Marsh y en color verde se aprecia la vegetación de los humedales. En el recuadro rojo se localiza el Dique Sur que regula los niveles de agua del embalse y en el recuadro amarillo se encuentra el sitio de restauración Beal Lake (imagen de USGS Orthophotoquads, 1992) (Guay, 2001).

5.5.2. Cambios hidrológicos y de vegetación

En la figura 31 se presentan las imágenes en falso color infrarrojo para los años 1972 (a) y 2011 (b) con los cuerpos de agua identificados y vectorizados. Las imágenes correspondientes a otros años del periodo analizado se pueden consultar en el anexo 5. Las áreas de los cuerpos de agua de la zona, que están representados por el cauce principal del río, el embalse Topock Marsh, el lago Beal (Beal Lake, en inglés), diques y canales de derivación de aguas del río, han variado a través de los años.

En la figura 32 se presentan las imágenes de NDVI para los años de 1972 (a) y 2011 (b) con las áreas de la cubierta vegetal de los humedales identificadas y vectorizadas. Las imágenes correspondientes a otros años del periodo analizado se pueden consultar en el anexo 5. Es importante mencionar que no se observan cambios de uso de suelo en Topock Marsh, esto debido, principalmente, a que forma parte de un refugio de vida silvestre.

La figura 33 presenta las gráficas de las series de tiempo del área de los cuerpos de agua (a), del área de la cubierta vegetal de los humedales (b) y del flujo volumétrico promedio anual (c). Las series de tiempo abarcan un periodo de 40 años, desde 1972 a 2011, con una frecuencia de muestreo de 5 a 4 años.

La gráfica a) de la figura 33 muestra la serie de tiempo del área de los cuerpos de agua para el periodo de 1972-2011. En ella se observa un incremento excesivo del área de los cuerpos de agua en el año de 1987. Dicho incremento concuerda con el periodo de lluvias y deshielos extraordinarios. El US Fish and Wildlife Service (2006) reporta la mayor inundación de la zona, después de la canalización del cauce principal del río Colorado, en el año de 1983. Dicha inundación ha dañado una serie de canales del sistema de manejo y control de aguas. Después de la inundación del 1983 el área permaneció saturada de agua hasta 1986. Por ser un evento de magnitud relativamente grande, en comparación con otras variaciones que presenta la serie, se excluyó el año de 1987 del análisis.

Sin tomar en cuenta el año de 1987, se observa que la serie de tiempo del área de los cuerpos de agua muestra una clara tendencia decreciente indicando una disminución gradual. De acuerdo con el ajuste lineal ($R^2 = 0.6$) de la serie de tiempo, la tendencia

supone una reducción del área de los cuerpos de agua de ~8.7 % (140 ha) en 40 años. El promedio del área de los cuerpos de agua para esta zona fue de 1,537.7 ha con una desviación estándar de 67.18 ha. La gráfica también presenta variaciones irregulares: ciclos de subidas y bajadas de magnitudes relativamente bajas (menores de la desviación estándar). Las bajas magnitudes se deben al control que existe sobre el nivel del agua en esta zona.

La gráfica b) de la figura 33 muestra la serie de tiempo del área de la cubierta vegetal de los humedales para el periodo de 1972-2011. En esta gráfica se aprecia que se tiene un aumento casi lineal de la cobertura vegetal de 1972 a 1982. El área de la cobertura vegetal aumentó ~60 % en una década. El US Fish and Wildlife Service (2006) reporta una baja actividad vegetal en la zona en los años 70´s debido a la baja calidad del agua y problemas en su turbidez; los cuales han sido mejorados con el paso del tiempo aplicando diferentes estrategias en el manejo y control del agua. A partir de 1982, la serie de tiempo presenta una clara tendencia descendente indicando la disminución gradual del área de la cobertura vegetal. De acuerdo con el ajuste lineal ($R^2 = 0.9$) de la serie, la tendencia supone una reducción del área de la vegetación de ~31 % (1576.4 ha) en 30 años. La gráfica también presenta variaciones irregulares: ciclos de subidas y bajadas de magnitudes relativamente bajas. Dichas variaciones reflejan eventos climáticos, como periodos de lluvias y deshielos importantes (incremento) y periodos de sequías (disminución). Es importante mencionar que el área de la cobertura vegetal en el 2011 es de tan solo 156 ha (~5 %) mayor que en 1972.

La gráfica c) de la figura 33 muestra el registro del flujo volumétrico promedio anual para el periodo de 1972-2011 medido por la estación 09-423000. El promedio del flujo volumétrico para esta zona en los años analizados fue de 365.5 m^3/s con una desviación estándar de 61.3 m^3/s. Los flujos máximos locales se registraron en 1987 (443.3 m^3/s) y 1997 (451.5 m^3/s), mientras que los flujos mínimos se registraron en los años de 1982 (290 m^3/s) y 1992 (306.2 m^3/s). Las variaciones irregulares coinciden con los fenómenos meteorológicos: periodos de lluvias y deshielos importantes (máximos) y periodos de sequia (mínimos).

Se realizó el análisis de asociación lineal entre los datos de las tres gráficas de la figura 33. Usando la ecuación 12 (ver subcapítulo 4.3), se calculó el coeficiente de correlación de Pearson que se presenta en la tabla 12.

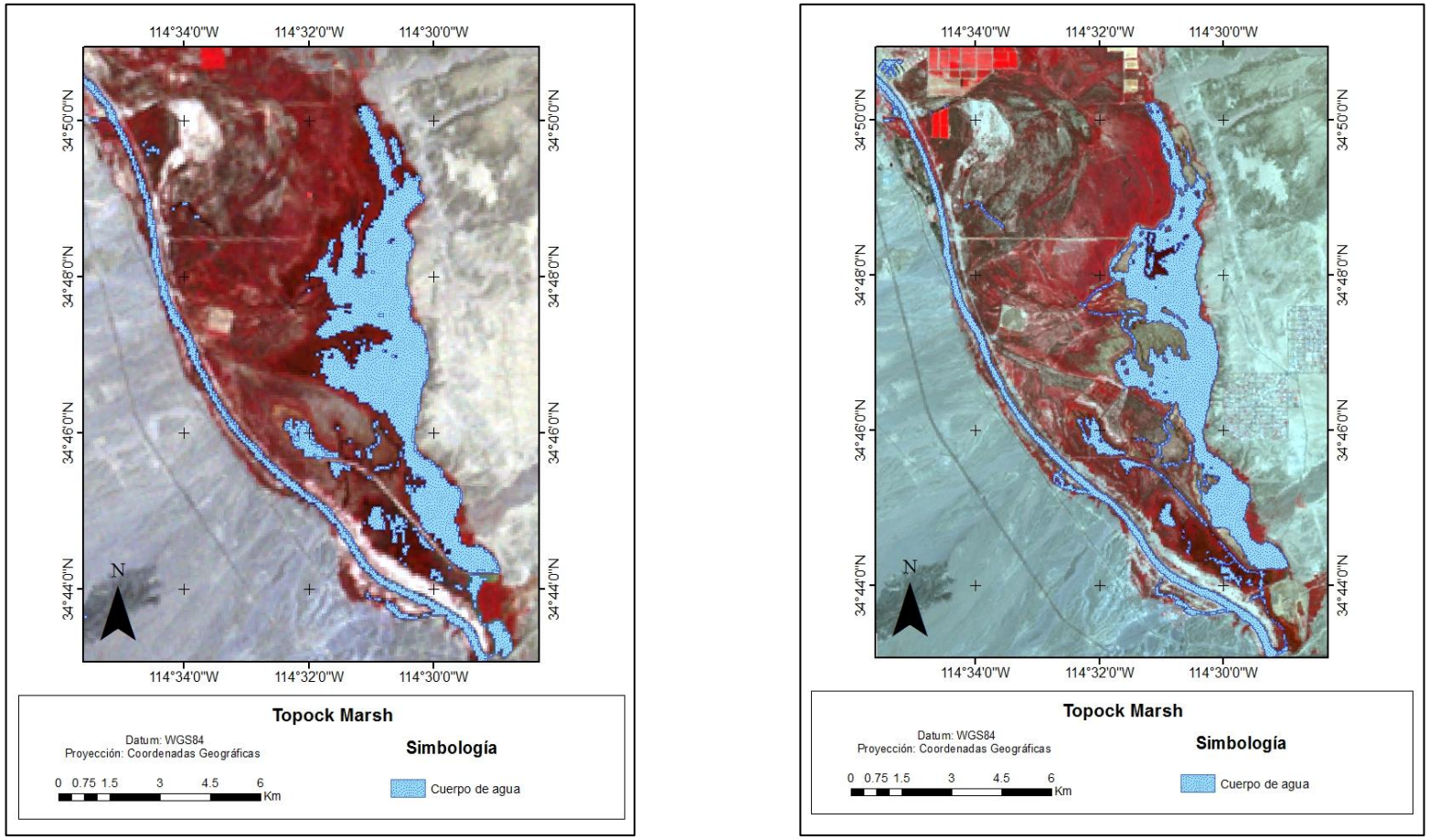
Tabla 12. Coeficiente de Pearson de acuerdo con la asociación lineal entre los datos de flujo volumétrico promedio anual, área de cuerpos de agua y área de vegetación de la zona 4.

r_{xy}	Flujo volumétrico promedio anual	Área de cuerpos de agua
Área de cuerpos de agua	0.21	-
Área de vegetación	0.14	0.57

Como el aporte del agua a la zona de Topock Marsh es controlado y el flujo volumétrico es medido en el cauce principal del río; no se esperaría la correlación lineal positiva entre el flujo volumétrico y las áreas de los cuerpos de agua y de vegetación. Sin embargo, existe una correlación lineal positiva muy baja (Tabla 12), hecho que se debe principalmente al evento de lluvias y deshielos extraordinarios ocurridos en 1983-1989, que está reflejado fuertemente en las gráficas de series de tiempo de estas tres variables.

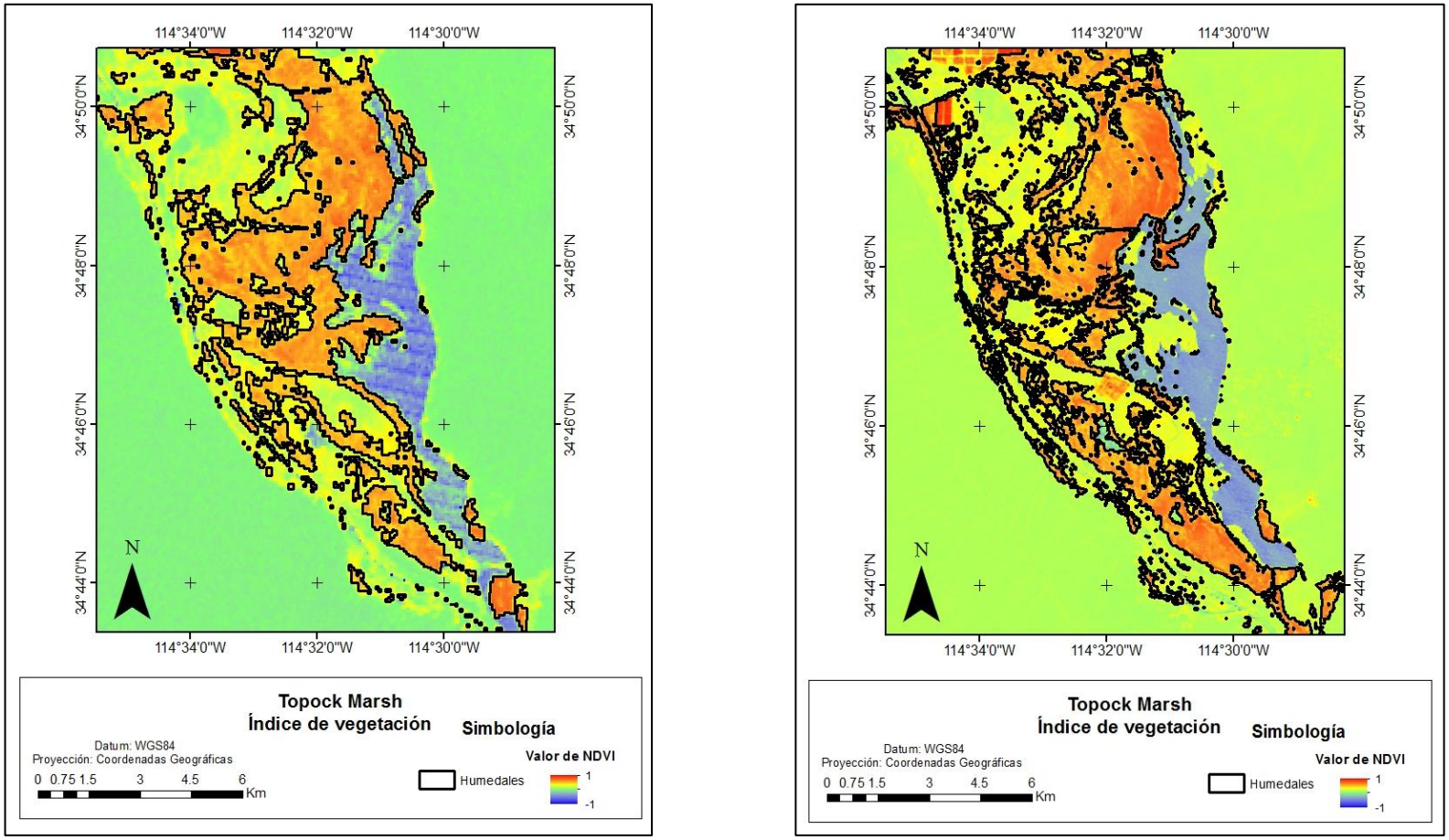
Además en la tabla 12 se observa que existe una correlación positiva moderada entre las áreas de cuerpos de agua y de vegetación.

Es importante resaltar que las series de tiempo de las áreas de los cuerpos de agua y de vegetación presentan tendencias decrecientes.



a) b)

Figura 31. Zona 4: Topock Marsh, Arizona, EUA. I dentificación de los cuerpos de agua para los años de 1972 (a) y 2011 (b). Las imágenes de fondo son en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 1 MSS y RGB 4/3/2 Landsat 5 TM en a y b , respectivamente.



a) b)

Figura 32. Zona 4: Topock Marsh, Arizona, EUA. Imagen de NDVI para el año 1972 (a) y 2011 (b). Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas.

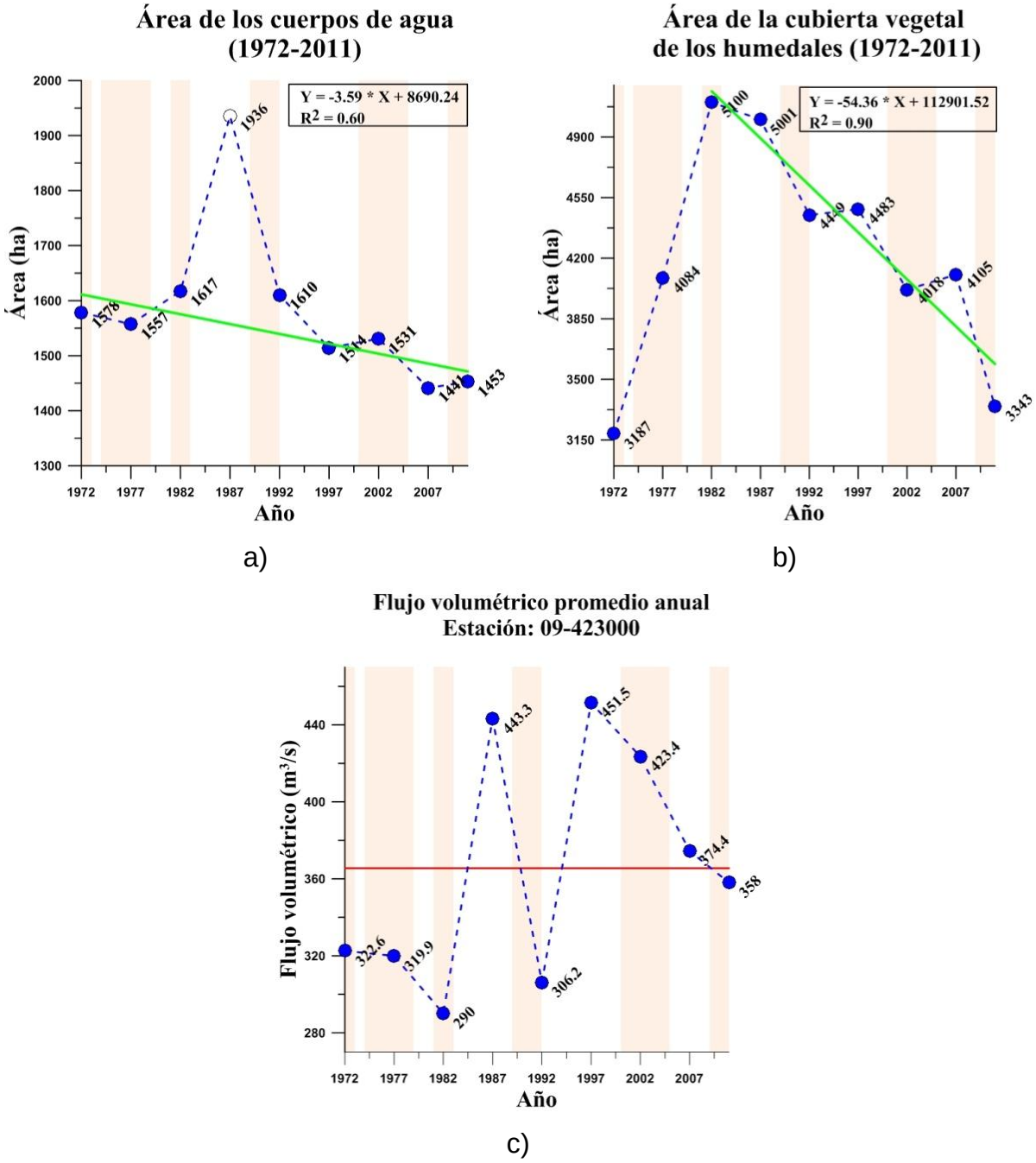


Figura 33. Zona 4: Topock Marsh, Arizona, EUA. Series de tiempo del área de los cuerpos de agua (a), del área de la cubierta vegetal de los humedales (b) y del flujo volumétrico promedio anual (c). La recta verde representa el ajuste por regresión lineal de los datos en (a), excluyendo el año 1987 (símbolo sin relleno), y (b), donde el ajuste se realizó para el periodo 1982-2011. La ecuación de la recta y el coeficiente de determinación del ajuste, R^2, se presentan en las gráficas. La línea roja representa el promedio de los datos en el periodo analizado en (c). Las franjas en tono anaranjado claro que se muestran en cada una de las gráficas significan las temporadas de sequía (de https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/drought/; Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (***National Oceanic and Atmospheric Administration***, NOAA, por sus siglas en inglés), Centro Nacional de Información Ambiental (National Centers for Enviromental Information, en inglés)).

5.6. Zona 5: Lost Lake, California, EUA

5.6.1 Descripción de la zona

Lost Lake, se encuentra ubicado en el condado de Riverside, California, EUA. Forma parte de la reserva indígena "Colorado river indian reservation", establecida en 1865 para los indígenas que habitaban el río Colorado y sus afluentes.

Según el INH de los EUA, la zona 5 cuenta con humedales de tipo palustre, con vegetación perenne (arbustos y árboles jóvenes de crecimiento lento) y vegetación hidrófila. Su régimen hídrico suele ser inundado temporal, semipermanentemente inundado, inundable e intermitente inundado.

5.6.2. Cambios hidrológicos y de vegetación

En la figura 34 se presentan las imágenes en falso color infrarrojo para los años de 1972 (a) y 2011 (b) con los cuerpos de agua identificados y vectorizados. Las imágenes correspondientes a otros años del periodo analizado se pueden consultar en el anexo 6. En las imágenes se observa la pérdida de algunos cuerpos de agua o la reducción de su área, estrechamiento del cauce principal del río y la aparición de islas fluviales.

En la figura 35 se muestran las imágenes de NDVI para los años de 1972 (a) y 2011 (b) con las áreas de la cubierta vegetal de los humedales identificadas y vectorizadas. Las imágenes correspondientes a otros años del periodo analizado se pueden consultar en el anexo 6. En el periodo de tiempo analizado (1972-2011) se observa la reducción del área de cobertura vegetal de los humedales y el vigor de ésta. Dicha reducción es causada, principalmente, por la disminución del agua aportada por el río. También se observa el cambio de uso de suelo, con aparición de nuevos campos de cultivos, en la parte sur de la zona entre los años 1972 y 1977 (Figuras A6.1 - A6.2 (falso color infrarrojo) y A6.10 - A6.11 (NDVI)).

La figura 36 presenta las gráficas de las series de tiempo del área de los cuerpos de agua (a), del área de la cubierta vegetal de los humedales (b) y del flujo volumétrico promedio anual (c). Las series de tiempo abarcan el periodo desde 1972 a 2011, con frecuencia de muestreo de 5 a 4 años.

La figura 36-a muestra la serie de tiempo del área de los cuerpos de agua para el periodo de 1972-2011. La serie de tiempo muestra una clara tendencia de disminución de los cuerpos de agua, indicando la reducción gradual de las superficies cubiertas por agua. De acuerdo con el ajuste lineal ($R^2 = 0.53$) de la serie de tiempo, la tendencia supone una reducción del área de los cuerpos de agua de ~26 % en 40 años (101 ha). El promedio del área de los cuerpos de agua para esta zona fue de 330.7 ha con una desviación estándar de 48.2 ha. La gráfica también muestra variaciones irregulares: ciclos de subidas y bajadas de magnitudes y duración variable. Las magnitudes de las variaciones irregulares en la primera mitad del periodo de análisis son más grandes que las de la segunda mitad. Los mínimos locales del área se mostraron en los años de 1977 (307.1 ha), 1992 (310.7 ha), 2002 (299.4 ha) y 2011 (269 ha), los cuales concuerdan con los periodos de sequía. Los máximos locales se presentaron en los años de 1972 (413.5 ha), 1982 (400 ha), 1997 (349.7 ha) y 2007 (301.3 ha), donde solo los máximos de los años de 1997 y 2007 coinciden con los años de lluvias y deshielos importantes. La explicación de los factores que influenciaron en los máximos locales de las áreas de los cuerpos de agua en otros años no fue posible, por lo que se requiere de información adicional.

La figura 36-b muestra la serie de tiempo del área de la cobertura vegetal de los humedales para el periodo de 1972-2011. El promedio del área de la cubierta vegetal de los humedales para los 40 años analizados fue de 1,550.5 ha con una desviación estándar de 41.3 ha. La gráfica se puede dividir en dos secciones: de cobertura vegetal alta (1972-1992), con un máximo en 1977 (2,332 ha) y una cobertura vegetal baja (1992-2011), con el mínimo en el año 2002 (1,044 ha). Tomando en cuenta los datos e información analizada, no fue posible entender el comportamiento complejo de esta gráfica que obedece a una tendencia polinomial (ecuación de tercer o cuarto grado).

La figura 36-c muestra el flujo volumétrico promedio anual para el periodo de 1972-2011 medido por la estación 09-427520. En esta gráfica se puede observar que el flujo del río no tiene grandes variaciones, con excepción de los años de altas precipitaciones (1987 con 374.6 m^3/s y 1997 con 331.8 m^3/s, máximos locales) y sequía (1992 con 233.5 m^3/s, mínimo local). El promedio del flujo volumétrico para esta zona en los 40 años analizados fue de 281.1 m^3/s con una desviación estándar de 45.3 m^3/s.

Se realizó el análisis de asociación lineal entre los datos de las tres gráficas de la figura 36. Usando la ecuación 12 (ver subcapítulo 4.3), se calculó el coeficiente de correlación de Pearson que se presenta en la tabla 13.

Tabla 13. Coeficiente de P earson de acuerdo con la asociación lineal entre los datos de flujo volumétrico promedio anual, área de cuerpos de agua y área de vegetación de la zona 5.

r_{xy}	Flujo volumétrico promedio anual	Área de cuerpos de agua
Área de cuerpos de agua	-0.006	-
Área de vegetación	-0.36	0.21

En la tabla 13 se observa que existe una correlación lineal negativa baja y muy baja entre el flujo volumétrico y las áreas de cobertura vegetal y cuerpos de agua, respectivamente. El resultado negativo de la correlación lineal se debe probablemente a los datos obtenidos en 1987, donde se registra el flujo volumétrico máximo debido a las altas precipitaciones en la zona, este aumento no se refleja en las áreas de agua superficial y de cobertura vegetal que presentaron los mínimos locales para este año. La magnitud de los coeficientes de la correlación indica la poca influencia que el flujo volumétrico del río ejerce sobre las áreas de los cuerpos de agua y de vegetación. También, deben existir otros factores más influyentes que controlan las fluctuaciones de estas variables, como por ejemplo, las actividades antropogénicas.

La disponibilidad del agua superficial y la vegetación de los humedales de Lost Lake, se han visto afectadas por la necesidad hídrica de los cultivos adyacentes al cauce principal del río Colorado y por el cambio de uso de suelo que ha reemplazado a los humedales por tierras de cultivo. Es importante señalar que la estación de medición de flujo volumétrico se encuentra a 46 km río arriba de la zona 5, por lo que pudiera ser la razón que impide que las variables de flujo volumétrico y de las áreas de cuerpos de agua y vegetación se correlacionen.

La correlación lineal entre las variables de las áreas de cuerpos de agua y cobertura vegetal es positiva muy baja (Tabla 13). Como ya se ha mencionado, las actividades antropogénicas son los factores más probables que influyen en este resultado. Aunque las correlaciones lineales entre las variables analizadas para esta zona son bajas y muy bajas, estas pueden tener una fuerte relación de dependencia o asociación no lineal.

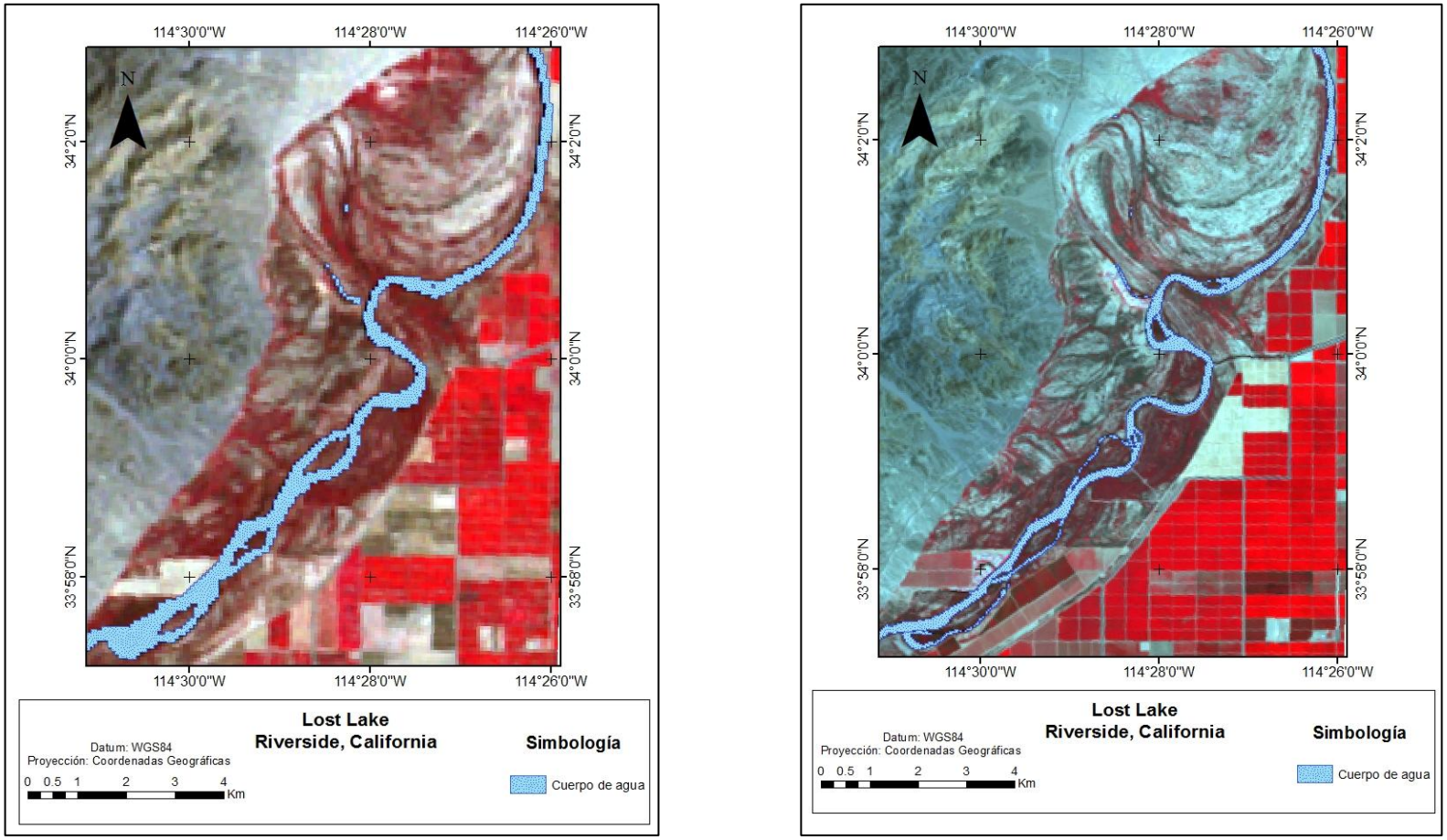
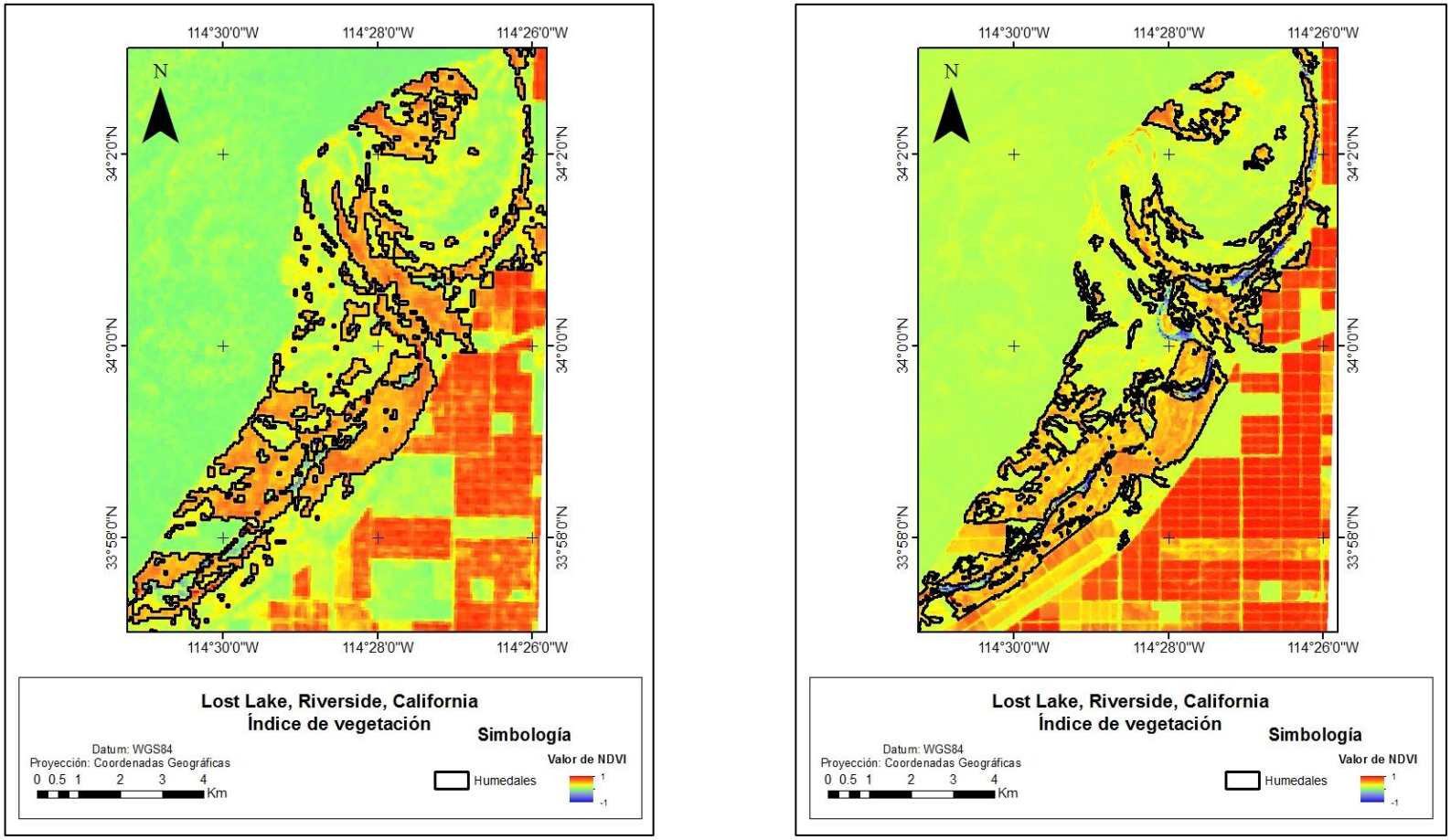


Figura 34. Zona 5: Lost Lake, Cal ifornia, EUA. I dentificación de los cuerpos de agua p ara los años de 1972 (a) y 2011 (b). Las imágenes de fondo son en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 1 MSS y RGB 4/3/2 Landsat 5 TM en a y b , respectivamente.



a) b)

Figura 35. Zona 5: Lost Lake, California, EUA. Imagen de NDVI para el año 1 972 (a) y 2011 (b). Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas.

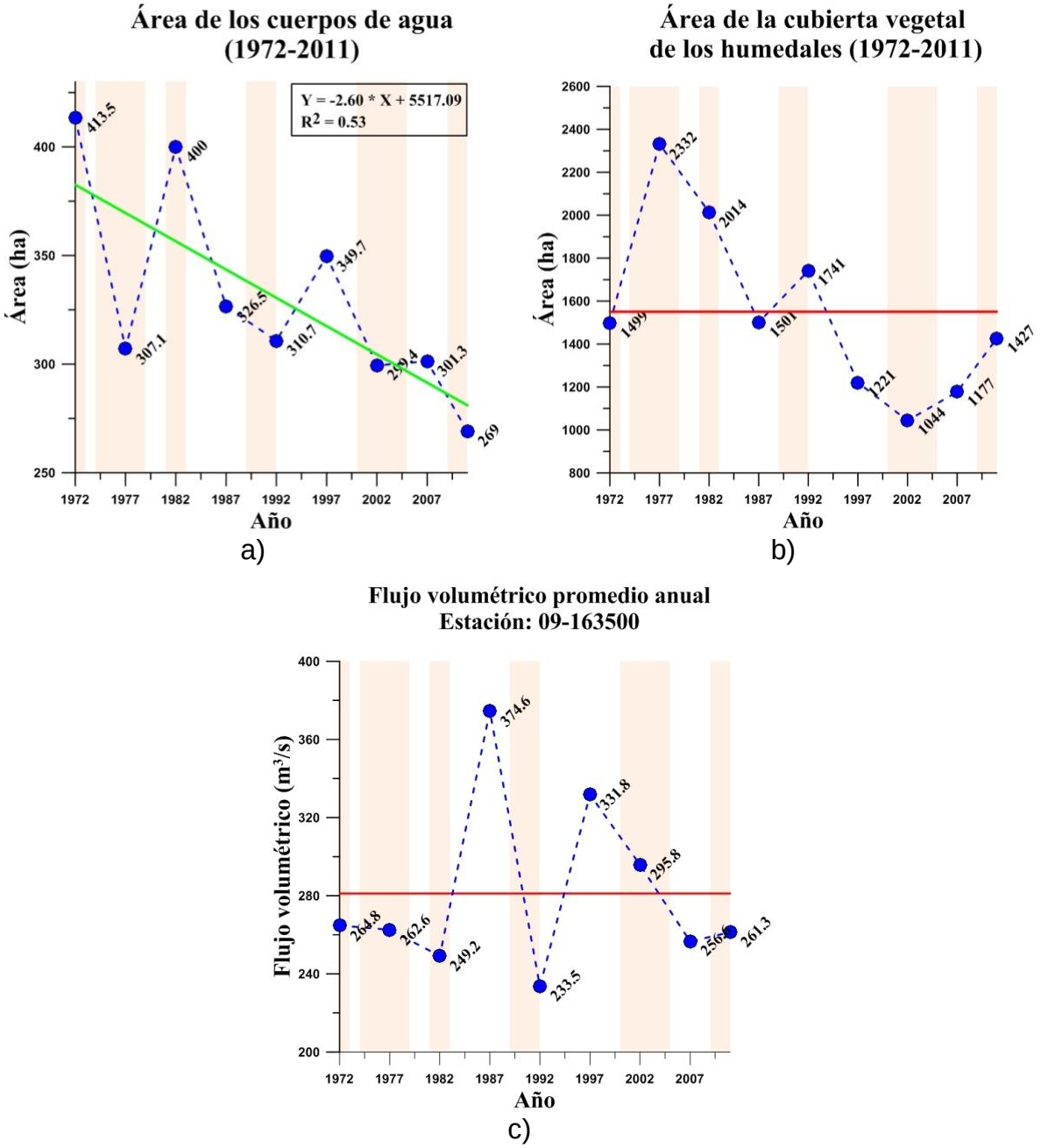


Figura 36. Zona 5: Lost Lake, California, EUA. Series de tiempo del área de los cuerpos de agua (a), del área de la cubierta vegetal de los hume dales (b) y del flujo volumétrico promedio anual (c). La recta verde representa el ajuste por regresión lineal de los datos en (a). La ecuación de la recta y el coeficiente de determinación del ajuste, $\boldsymbol{R^2}$, se presentan en la gráfica. La línea roja representa el promedio de los datos en el periodo analizado en (b) y (c). Las franjas en tono anaranjado claro que se muestran en cada una de las gráficas significan las temporadas de sequía (de https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/drought/ ; Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (***National Oceanic and Atmospheric Administration***, NOAA, por sus siglas en inglés), Centro Nacional de Información Ambiental (National Cen ters for Enviromental Information, en inglés)) .

5.7. Zona 6: Refugio nacional de vida silvestre Cíbola, Arizona y California, EUA

5.7.1 Descripción de la zona

El refugio nacional de vida silvestre Cíbola (Cíbola NWR, por sus siglas en inglés), establecido el 21 de agosto de 1964, se encuentra situado en la llanura de inundación en la parte baja del río Colorado, entre los estados de Arizona y California, EUA y está rodeado por desierto. El refugio incluye el canal histórico del río Colorado que actualmente es la delimitación territorial entre ambos estados; así como una parte del río que fue canalizado en la década de los 60´s (Figura 37). El refugio cuenta con una superficie de más de 7,400 ha e incluye aproximadamente 22.5 km del cauce del río Colorado.

Cíbola NWR ofrece los servicios de caza, pesca, la observación de vida silvestre y con programas de educación ambiental.

De acuerdo con la clasificación del INH de los EUA, todos los humedales de la zona 6 son humedales de tipo palustre, que tienen una profundidad menor a dos metros. Estos humedales están dominados por árboles y arbustos de hoja caduca (caducifolios), musgos emergentes o líquenes, que están presentes durante casi todo el año.

Los humedales ubicados al sureste del refugio además de ser humedales de tipo palustre son clasificados como humedales que han sido creados o modificados por una barrera o dique artificial que obstruye la entrada o salida de agua. Y el cuerpo de agua ubicado cerca de estos humedales es de tipo lacustre y de clasificación creada o modificada (Figura 37).

El régimen hídrico establecido en Cíbola NWR es inundado temporal, semipermanentemente inundado, inundable, intermitente expuesto e intermitente inundado.

La zona 6 cuenta con un sitio de restauración nombrada "Hart Mine Marsh" (Figura 38) en donde las actividades de restauración finalizaron en el 2011. Este sitio inicialmente fue creado naturalmente por altos flujos del río Colorado y sufrió modificaciones debido a las alteraciones en el flujo del río en años anteriores, lo que ocasionó la pérdida de

humedales. Hart Mine Marsh cuenta con 261 ha rehabilitadas desde el 2008. La restauración consistió en la eliminación de la vegetación no nativa y la excavación de canales para inundar la zona.

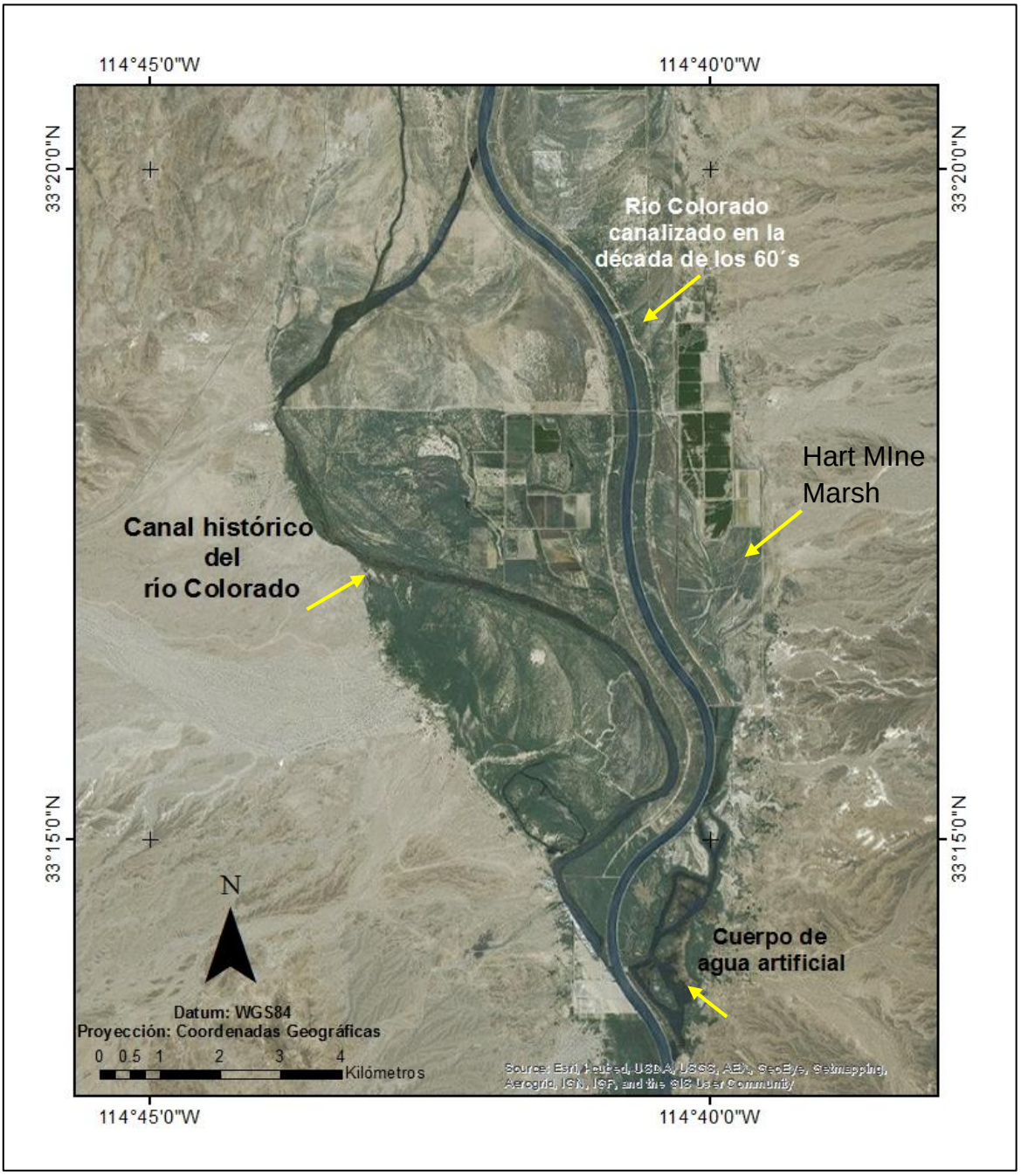


Figura 37. Z ona 6: Refugio nacional de vida silvestre Cíbola, Arizona y California, EUA. Se muestra el canal histórico del río Colorado y la canalización del mismo, la zona de restauración Hart Mine Marsh y un cuerpo de agua artificial.

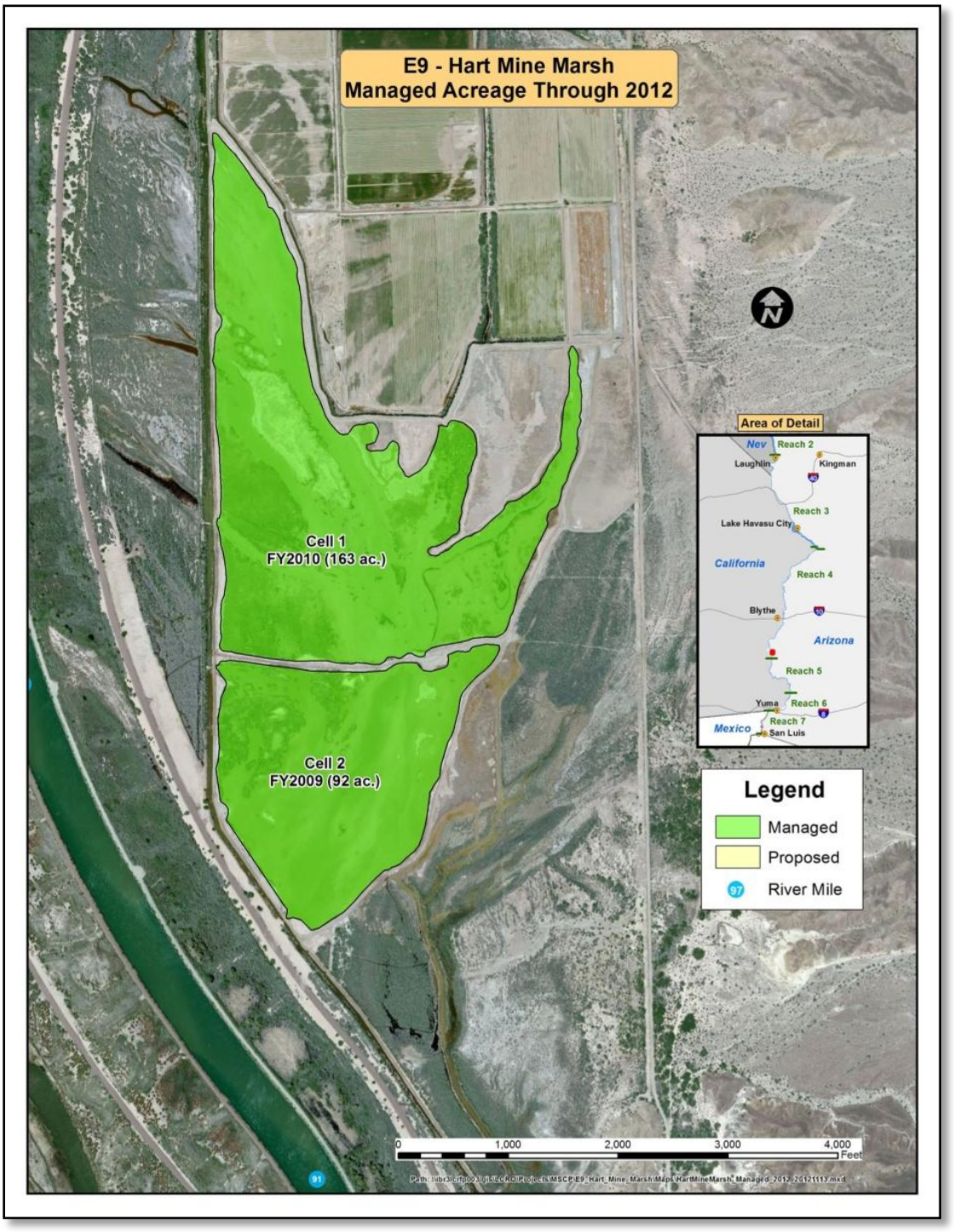


Figura 38. Zona de restaurac ión Hart Mine Marsh en Cíbola NWR. Imagen tomada de: http://www.lcrmscp.gov/images/res_sites/hart_mine_marsh/hart_mine_acreage_map_lg.jpg .

5.7.2. Cambios hidrológicos y de vegetación

La figura 39 muestra las imágenes en falso color infrarrojo para los años 1972 (a) y 2011 (b) con los cuerpos de agua identificados y vectorizados. Las imágenes correspondientes a otros años del periodo analizado se pueden consultar en el anexo 7. Los cuerpos de agua en esta zona están representados por el cauce del río Colorado (histórico y canalizado) y un pequeño cuerpo de agua al sur de la zona. El área cubierta por estos cuerpos de agua presentó variaciones moderadas durante el tiempo analizado. En la imagen del año 2011 (Figura 39-b), se observa la aparición de otros cuerpos de agua, en la parte central de la zona, al este del cauce canalizado. Dichos cuerpos de agua corresponden al sitio de restauración "Hart Mine Marsh".

En la figura 40 se presentan las imágenes de NDVI para los años de 1972 (a) y 2011 (b) con las áreas de la cubierta vegetal de los humedales identificadas y vectorizadas. Las imágenes correspondientes a otros años del periodo analizado se pueden consultar en el anexo 7. El mayor cambio en la superficie cubierta por vegetación se observa en la imagen de NDVI del año 2007 (Figura 41), en la parte norte de la zona se aprecia la enorme pérdida de vegetación, derivado de un incendio ocurrido el 16-22 de julio del 2006; el cual devastó más de 1,800 ha. También es importante notar el aumento del área de la cubierta vegetal ocurrido entre los años 1972 y 1977 (Figuras A7.10 y A7.11). En la imagen de NDVI del año de 1972 (Figura 40-a) se observa que existen considerables áreas con valores de NDVI entre 0.1 y 0.4 dentro del refugio de Cíbola. Dichos valores de NDVI corresponden a la vegetación escasa o con bajo vigor. No se puede descartar la posibilidad de que el umbral de 0.4 es muy elevado para delimitar todas las áreas cubiertas por vegetación en la imagen de 1972. El bajo vigor de la vegetación del humedal puede deberse a posibles enfermedades o plagas en ésta, sin embargo no se encontró ninguna información que pudiera comprobar esta suposición.

La figura 42 presenta las gráficas de las series de tiempo del área de los cuerpos de agua (a), del área de la cubierta vegetal de los humedales (b) y del flujo volumétrico promedio anual (c). Las series de tiempo abarcan el periodo de 40 años, desde 1972 a 2011, con frecuencia de muestreo de 5 a 4 años.

La figura 42-a muestra la serie de tiempo del área de los cuerpos de agua para el periodo de 1972-2011. La gráfica se dividió en dos secciones: 1972-1987 y 1987-2011. La primera sección, la gráfica presenta una tendencia ascendente, con un aumento del 55 % (207 ha). Se observa un mínimo local para el año de 1982 (239.8 ha). En las imágenes en falso color infrarrojo correspondiente a este año (Figura A7.3), se observan tonos rojizos en el cauce histórico del río, que no fue identificado como cuerpo de agua, con base en los criterios considerados (ver subcapítulo 4.2.4). Por lo tanto, se puede suponer que el área de los cuerpos de agua para este año es mínima debido a la presencia de vegetación acuática a lo largo del cauce, lo que impide la identificación de este cuerpo de agua. El año de 1982 fue año de escasas lluvias, por lo tanto; se esperaría un flujo volumétrico bajo, lo que permite el establecimiento de la vegetación acuática. Durante la segunda sección (1987-2011) la gráfica de la serie de tiempo no presenta una tendencia clara, sino variaciones irregulares. El promedio del área de los cuerpos de agua de la segunda sección, fue de 590 ha con una desviación estándar de 53.17. Las variaciones irregulares con máximos locales en los años de 1992 (683.9 ha), 2002 (595.3 ha) y 2011 (593.3 ha); y con los mínimos locales en los años de 1997 (526.5 ha) y 2007 (555.4 ha), de magnitudes menores a la desviación estándar, excepto para el año 1992, no coinciden con eventos climáticos. La presencia o ausencia de vegetación acuática, así como errores en la identificación de los cuerpos de agua debido al tamaño de pixel y al ancho y/o profundidad de algunos cuerpos de agua pueden ser algunos de los factores de las variaciones observadas.

La figura 42-b muestra la serie de tiempo del área de cubierta vegetal de los humedales para el periodo de 1972-2011. En el primer año de análisis (1972), la gráfica presenta un área muy pequeña, comparada con los demás años. Como ya se había mencionado, puede deberse al umbral fijo de NDVI demasiado alto para identificar y cuantificar correctamente las superficies con vegetación para este año en particular. Después de un aumento drástico entre 1972 y 1977 hay una disminución de menor magnitud entre 1977 y 1982. Entre 1982 y 1992, el área de cubierta vegetal no presentó variaciones considerables. Hubo un incremento del área en el año de 1997 que coincide con el periodo de lluvias y deshielos. De 1997 a 2002 el área disminuye, y coincide con el periodo de sequía. Una disminución drástica se muestra entre los años 2002 y 2007, debido al incendio en la parte norte del refugio en el año 2006 (Figura 41, un año

después del incendio). Si no se toman en cuenta los eventos de aumentos máximos (1977 y 1997) se puede decir, que entre 1972 y 1982 el área de la cubierta vegetal creció un 64 % (1,773 ha) y entre 1992 y 2007 el área disminuyó un 37 % (1,721 ha), quedando prácticamente, en valores de área muy similares en el inicio y fin del periodo analizado.

La figura 42-c muestra el registro del flujo volumétrico promedio anual para el periodo de 1972-2011 medido por la estación 09-429010 ubicada a 60 km río arriba de la zona 6. El promedio del flujo volumétrico para esta zona en los 40 años analizados fue de 223.1 m^3/s con una desviación estándar de 43.5 m^3/s. Con base en la gráfica de la serie de tiempo, se puede concluir que el flujo volumétrico anual del río medido por esta estación, se ha mantenido casi constante a excepción de los años de 1987 y 1997, que presentaron un aumento en el flujo del río debido a los fenómenos de lluvia y deshielos.

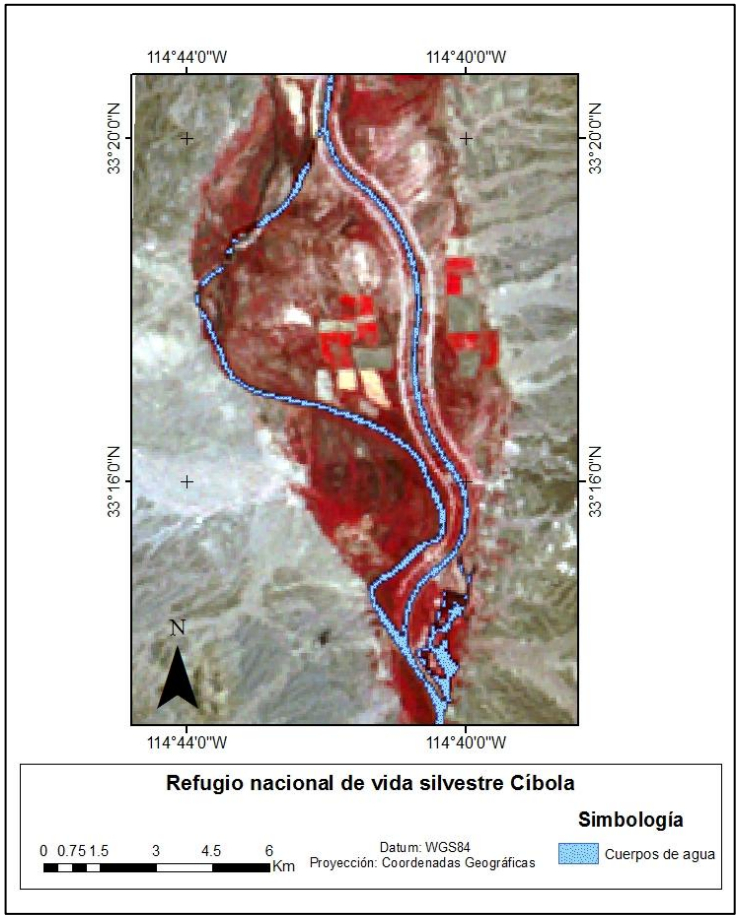
Se realizó el análisis de asociación lineal entre los datos de las tres gráficas de la figura 42. Usando la ecuación 12 del subcapítulo 4.3, el coeficiente de correlación de Pearson se calculó y los resultados están en la tabla 14.

Tabla 14. Coeficiente de Pearson de acuerdo con la asociación lineal entre los datos de flujo volumétrico promedio anual, área de cuerpos de agua y área de vegetación de la zona 6.

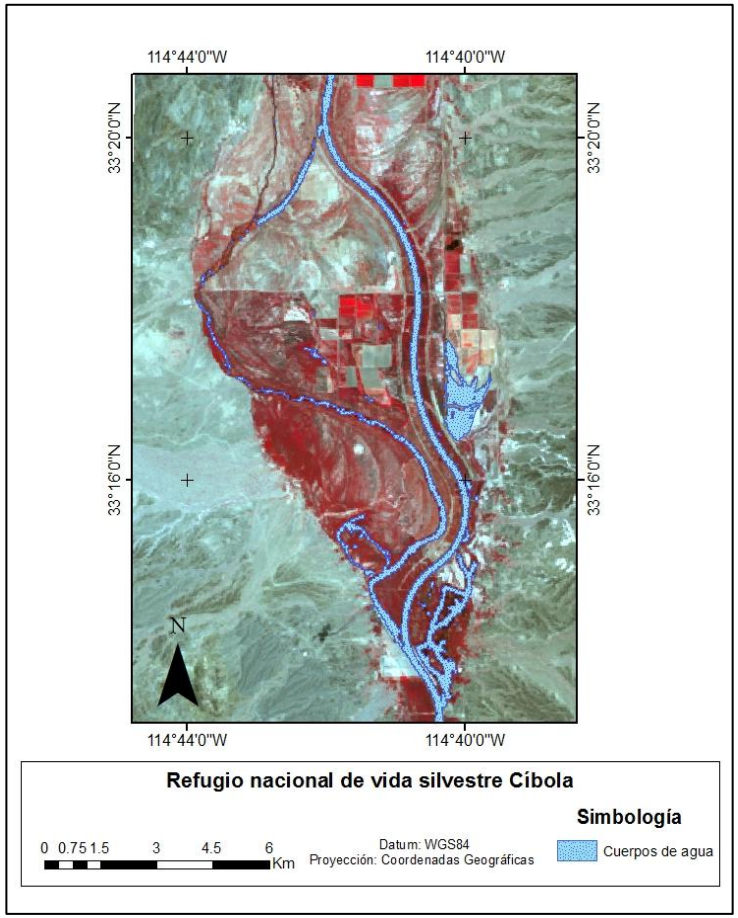
r_{xy}	Flujo volumétrico promedio anual	Área de cuerpos de agua
Área de cuerpos de agua	0.22	-
Área de vegetación	0.30	- 0.04

En la tabla 14 se observa que existe una correlación positiva muy baja entre el flujo volumétrico y las áreas de cuerpos de agua y vegetación. La estación 09-429010 se encuentra a 60 km río arriba y en este trayecto, el río atraviesa una gran extensión de terrenos de cultivo, lo que puede influenciar en los resultados de la correlación lineal.

Y en el caso de las áreas de los cuerpos de agua y de vegetación hay una correlación prácticamente nula que significa que la vegetación no depende de la variación del área de los cuerpos de agua superficial. El gran factor que influenció dicho resultado es sin duda el incendio de 2006, que destruyó más de una tercera parte del humedal. Aunque las correlaciones lineales entre las variables analizadas son muy bajas o nulas, éstas pudieran tener una fuerte relación de dependencia o asociación no lineal.

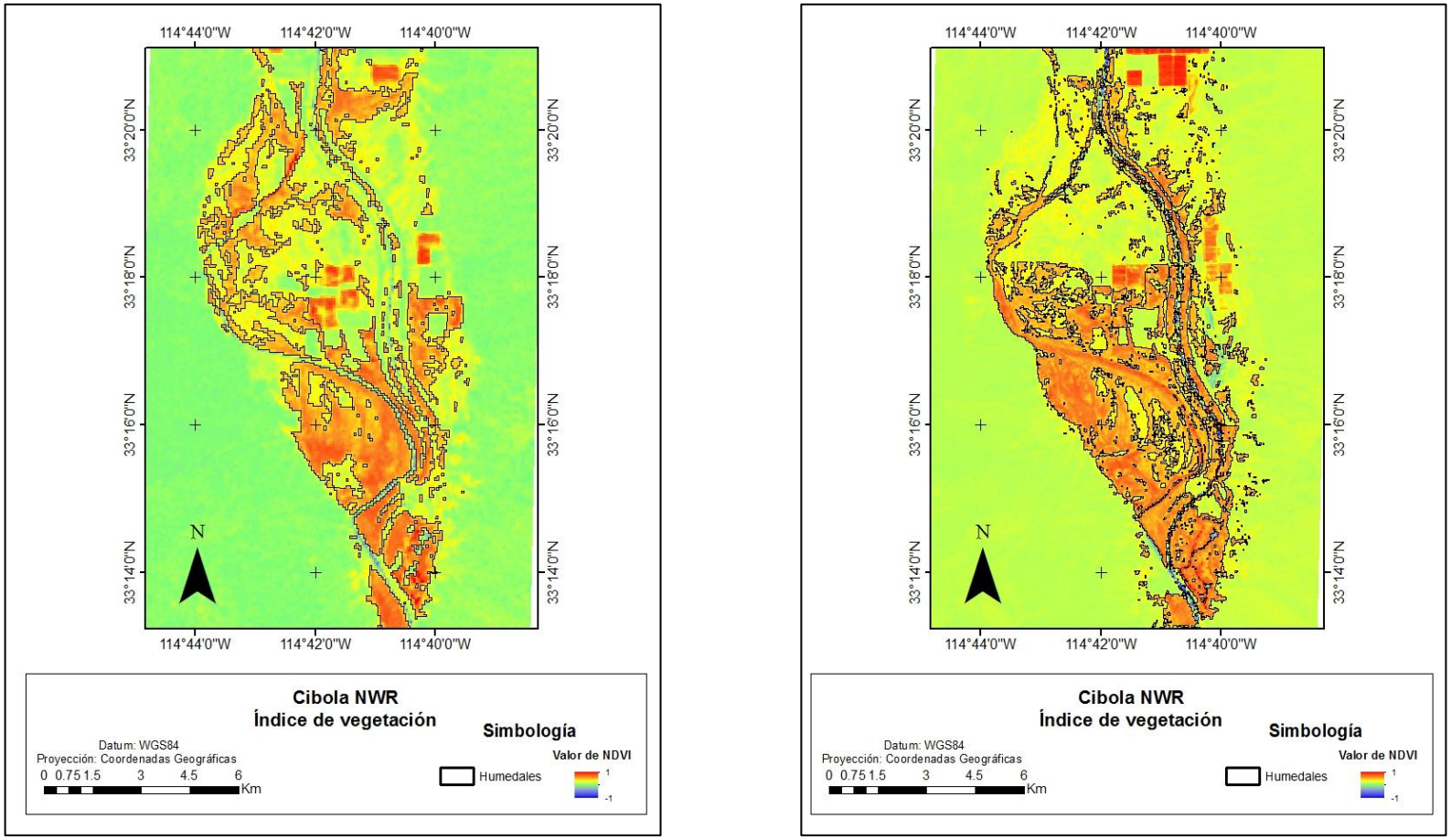


a)



b)

Figura 39. Zona 6: Refugio nacional de vida silvestre Cíbola, Arizona y California, EUA. Identificación de los cuerpos de agua para los años de 1972 (a) y 2011 (b). Las imágenes de fondo son en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 1 MSS y RGB 4/3/2 Landsat 5 TM en a y b, respectivamente.



a) b)

Figura 40. Zona 6: Refugio nacional de vida silvestre Cíbola, Arizona y California, EUA. Imagen de NDVI para el año 1972 (a) y 2011 (b). Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas.

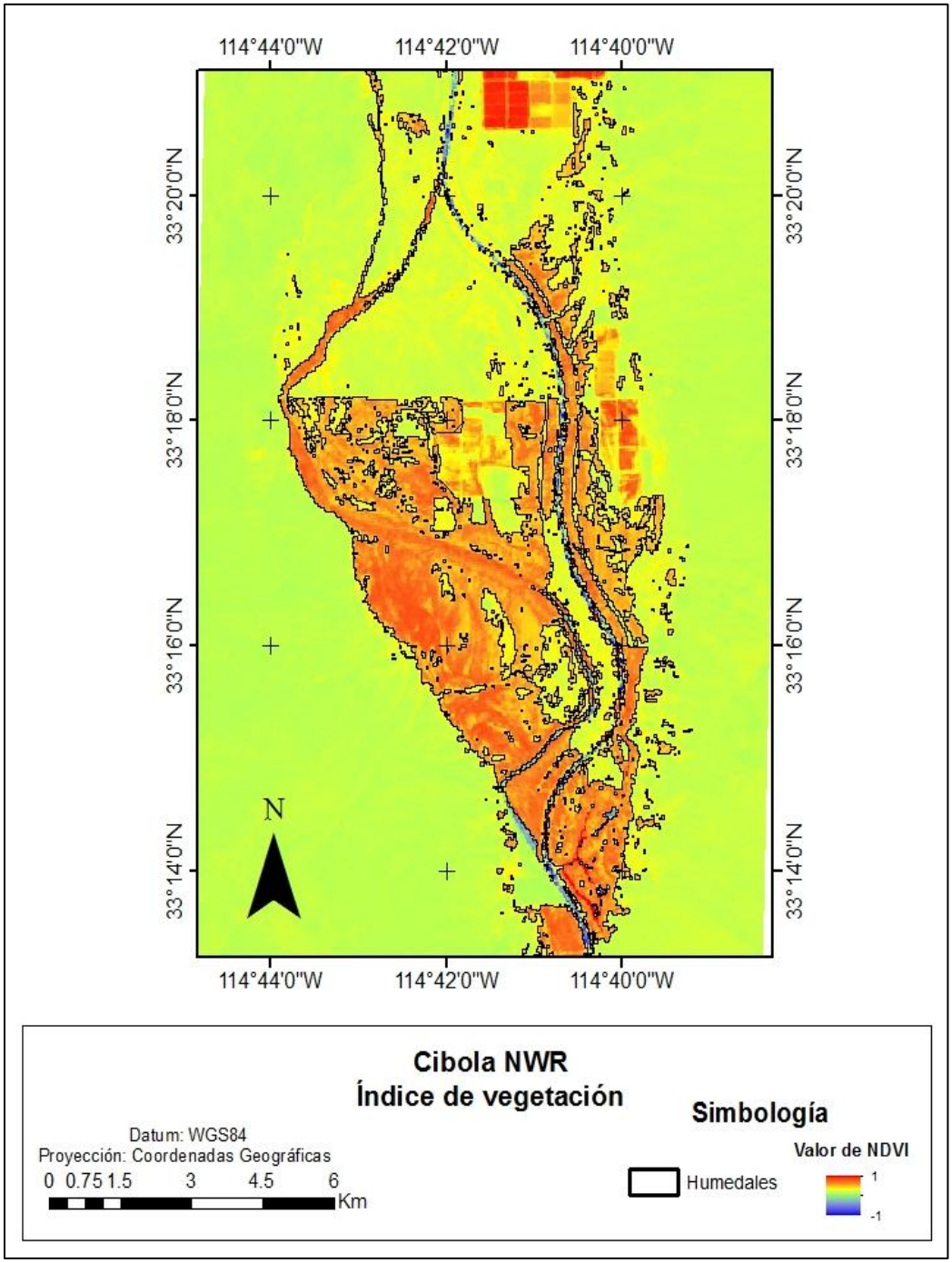


Figura 41. Zona 6: Refugio nacional de vida silvestre Cíbola, Arizona y California, EUA. Imagen de NDVI para el año 2007. Se puede observar la pérdida de vegetación en la zona debido a los incendios registrados.

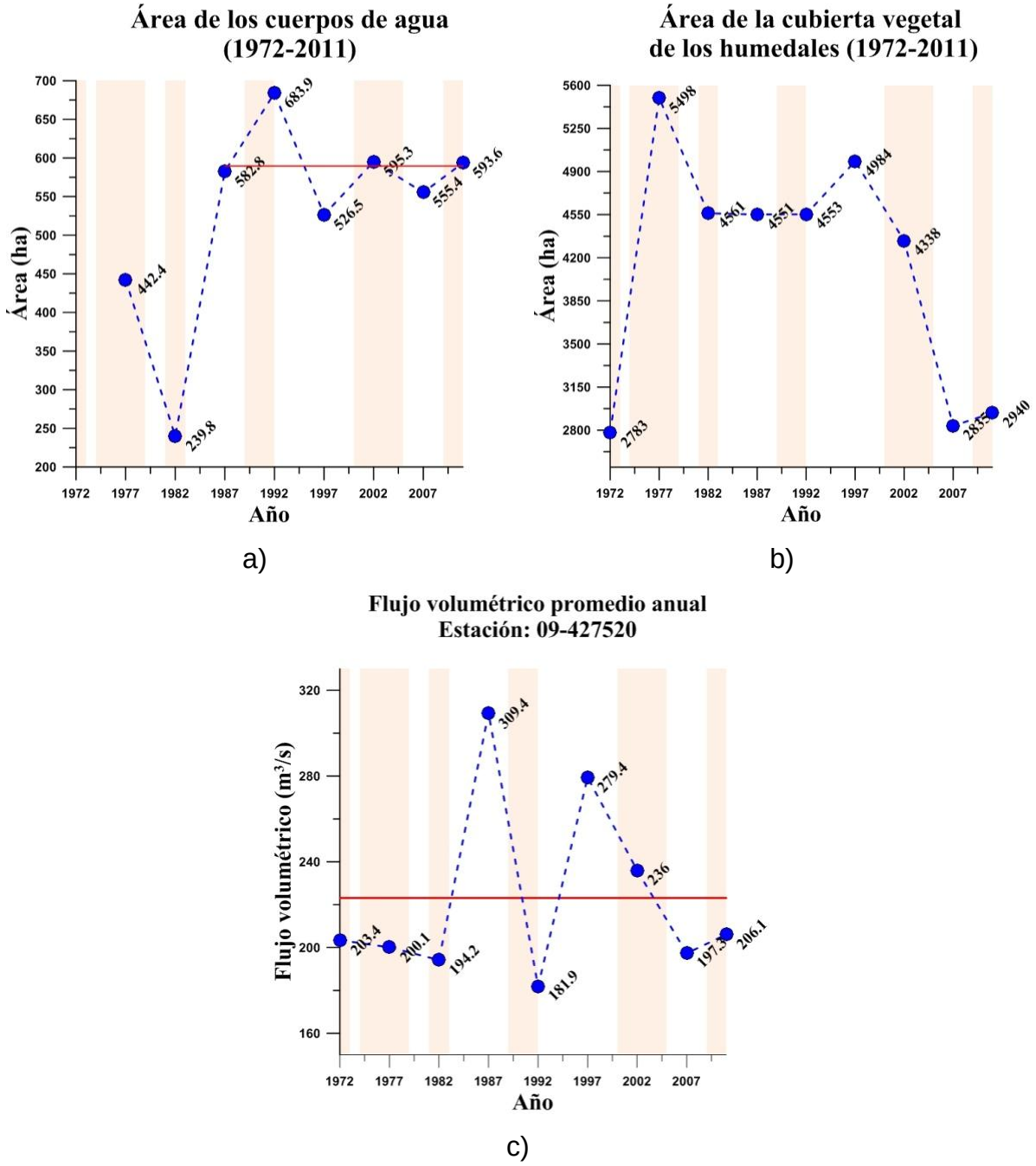


Figura 42. Zona 6: Refugio nacional de v ida silvestre Cíbola, Arizona y California, EUA. Series de tiempo del área de los cuerpos de agua (a), del área de la cubierta vegetal de los humedales (b) y del flujo volumétrico promedio anual (c). La línea roja representa el promedio de los datos en el periodo 1987 -2011 y 1972-2011 en (a) y (c), respectivamente. Las franjas en tono anaranjado claro que se muestran en cada una de las gráficas significan las temporadas de sequía (de https://www.ncdc.noaa .gov/sotc/drought/ ; Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (***National Oceanic and Atmospheric Administration***, NOAA, por sus siglas en inglés), Centro Nacional de Información Ambiental (National Centers for Enviromental Information, en inglés)) .

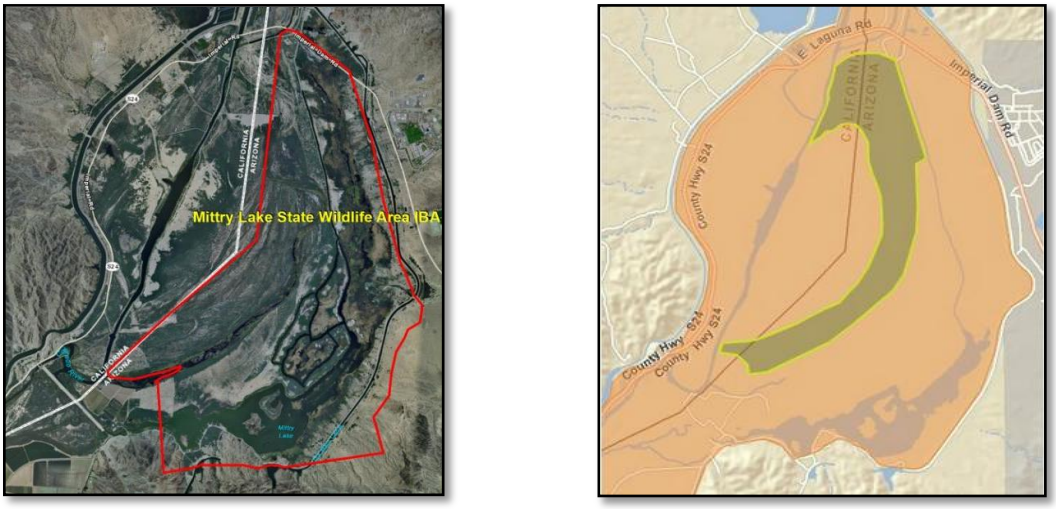
5.8. Zona 7: Mittry Lake, Arizona, EUA

5.8.1 Descripción de la zona

La zona 7 de este trabajo de tesis fue nombrada “Mittry Lake” debido a que en esta zona se encuentra el Área de Vida Silvestre Mittry Lake (Mittry Lake Wildlife Area, en inglés) (Figura 43-a), la cual se compone de humedales, pantanos, aguas abiertas y tierras altas del desierto.

Mittry Lake está ubicada en la frontera de los estados de Arizona y California, EUA. La zona se encuentra entre dos presas: Laguna e Imperial, localizadas al sur y al norte de la zona, respectivamente.

En noviembre de 2011 se inició un plan de reforestación de poco más de 480 ha en esta zona, dicho proyecto fue nombrado "Laguna Division" (Figura 43-b), dicha restauración consiste en reemplazar las especies vegetales invasivas por vegetación nativa, reducir la salinidad del suelo y además de la construcción de unas estructuras de control para vigilar los niveles de agua con la finalidad de proporcionar un hábitat para las especies amenazadas y en peligro de extinción.



a) b)

Figura 43. a) Mittry Lake Wildlife Area (polígono en rojo). Imagen tomada de: http://aziba.org/wordpress/wp-content/uploads/2011/12/Mittry-Lake-State-Wildlife-Area-IBA-GIS-Map_compressed1.jpg y b) el área de restauración Laguna Division (polígono en amarillo). Imagen tomada de: http://www.lcrmscp.gov/conservation/laguna.html.

Según el INH de los EUA, la zona 7 cuenta con humedales de tipo palustre y los cuerpos de agua y la laguna que se formó a partir de la construcción de la presa Imperial, son de tipo lacustre.

En esta zona casi el 40 % de los humedales clasificados son humedales que se han creado o modificado por una barrera o dique artificial que obstruye la entrada o salida de agua.

La vegetación de estos humedales consiste de vegetación boscosa, es decir, vegetación leñosa que excede los 6 m de altura. Además cuenta con árboles y arbustos de hoja caduca (caducifolios), musgos emergentes o líquenes, que están presentes durante la mayor parte del año.

El régimen hídrico de los humedales de la zona 7 suele ser inundado temporal, semipermanentemente inundado, inundable, intermitente expuesto e intermitente inundado.

5.8.2. Cambios hidrológicos y de vegetación

La figura 44 muestra las imágenes en falso color infrarrojo para los años de 1972 (a) y 2011 (b) con los cuerpos de agua identificados y vectorizados. Las imágenes correspondientes a otros años del periodo analizado se pueden consultar en el anexo 8. La zona 7 cuenta con el cauce principal del río, además de algunos cuerpos de agua, incluyendo Mittry Lake (Lago Mittry) y el canal de derivación de la presa Imperial. El área de los cuerpos de agua en esta zona ha variado a través de los años, sobre todo la presencia y tamaño de los cuerpos de agua al interior del Área de Vida Silvestre Mittry Lake y el ancho del cauce principal del río.

La figura 45 muestra las imágenes de NDVI para los años de 1972 (a) y 2011 (b) con las áreas de la cubierta vegetal de los humedales identificadas y vectorizadas. Las imágenes correspondientes a otros años del periodo analizado se pueden consultar en el anexo 8. En el periodo de tiempo analizado (1972-2011) la vegetación de los humedales presentó una notable pérdida. En las imágenes de NDVI se observa tanto la pérdida áreas cubiertas con vegetación como la disminución del vigor de la misma (diminución notable de valores de NDVI).

La figura 46 presenta las gráficas de las series de tiempo del área de los cuerpos de agua (a), del área de la cubierta vegetal de los humedales (b) y del flujo volumétrico promedio anual (c). Las series de tiempo abarcan el periodo de 40 años, desde 1972 a 2011, con frecuencia de muestreo de 5 a 4 años.

La figura 46-a muestra la serie de tiempo del área de los cuerpos de agua para el periodo de 1972-2011. Al inicio del periodo analizado (1972-1982) presenta áreas de cuerpos de agua relativamente bajas, menores que el promedio, con el mínimo local correspondiente al año de 1982 (324.5 ha), y con una tendencia descendente lineal. Los años de muestreo: 1972, 1977 y 1982, coindicen con los años de sequías, lo que puede explicar los valores bajos estimados del área de los cuerpos de agua. Sin embargo, la disminución lineal puede indicar la presencia de algunos factores permanentes durante este periodo que provocaron la disminución gradual del área de los cuerpos de agua. La gráfica presenta un incremento de ~85 % (274.9 ha), entre los años de 1982 y 1987, que coincide con el periodo de lluvias y deshielos extraordinarios. En el periodo de 1987-2011, la gráfica presenta variaciones irregulares de magnitudes relativamente altas, con máximos locales en los años de 1987 (599.4 ha), 1997 (509.8 ha) y 2011 (458.9 ha), donde los incrementos del área en los años de 1987 y 1997 concuerdan con periodos de lluvias y deshielos importantes. Los mínimos locales se presentaron en los años de 1992 (427.7 ha) y 2007 (388.5 ha), ambos reflejan los periodos de sequía presentes o previos a estos años analizados. A pesar de las variaciones irregulares importantes durante 1987-2011, también es posible observar una tendencia lineal decreciente para este periodo. De acuerdo al ajuste lineal ($R^2 = 0.4$), el área de los cuerpos de agua disminuyó ~25 % (134.88 ha) en 24 años. Ambas tendencias lineales decrecientes que presenta la gráfica indican, que existen unos factores que causan la disminución gradual de las áreas de los cuerpos de agua durante todo el periodo analizado (1972-2011) con pendientes casi similares (Figura 46-a). Sin embargo, los eventos extraordinarios del periodo de 1983-1989, causan que la gráfica no muestre una disminución continua. Otros eventos climáticos extraordinarios influyen en las variaciones irregulares que presenta la gráfica.

La figura 46-b muestra el área de la cubierta vegetal de los humedales para el periodo de 1972-2011. La gráfica presenta dos tendencias definidas: ascendente durante el

periodo de 1972-2002 y descendente durante el periodo de 2002-2011. En el primer periodo, el ajuste lineal ($R^2 = 0.75$) indica un aumento de las áreas de la cobertura vegetal de ~19.5 % (335.7 ha) en 30 años. En el periodo 2002-2011 hay una disminución lineal del área de la cubierta vegetal; ~35.5 % (706 ha).

Finalmente la figura 46-c muestra el registro del flujo volumétrico promedio anual para el periodo de 1972-2011 medido por la estación 09-523000, ubicada dentro de la zona 7. El promedio del flujo volumétrico para esta zona en los 40 años analizados fue de 187.4 m^3/s con una desviación estándar de 33.1 m^3/s. Al inicio del periodo analizado (1972-1982) presenta valores bajos de flujo volumétrico, menores que el promedio, con el mínimo local correspondiente al año de 1982 (168.7 m^3/s) y con una tendencia descendente lineal. Los años de muestreo: 1972, 1977 y 1982, coindicen con los años de sequías, lo que puede explicar los valores bajos registrados del promedio anual del flujo volumétrico. Sin embargo, la tendencia descendente lineal puede indicar la presencia de algunos factores permanentes durante este periodo que causaron la disminución gradual del flujo volumétrico. Para el periodo, 1982-2002, la gráfica del registro del flujo volumétrico no presenta tendencia clara, sino variaciones irregulares de magnitudes relativamente altas. Los máximos locales se observan en los años de 1987 (242.1 m^3/s) y 1997 (242.8 m^3/s) y coinciden con los periodos de lluvias y deshielos extraordinarios. De la misma manera concuerdan con periodos de sequía, el mínimo local en 1992 (157.9 m^3/s) y una bajada durante el periodo de 1997-2002, con el mínimo local en 2002 (190.2 m^3/s). En el periodo 2002-2011, la gráfica presenta una tendencia lineal descendente, a pesar del corto periodo de las altas precipitaciones y deshielos en 2005-2009. Es importante notar, que si no se toma en cuenta el periodo de perturbaciones importantes 1982-2002 (lluvias y deshielos extraordinarios y sequias), se puede observar que la gráfica presenta una clara tendencia lineal descendente. Lo que indica, que existen factores que causan la disminución gradual del promedio anual de flujo volumétrico durante todo el periodo analizado (1972-2011), sin embargo, los eventos extraordinarios del periodo 1982-2002 disimularon sus efectos en dicho periodo. Entre los años de 1972 y 2011 hay una disminución del flujo volumétrico de ~17 % (30.7 m^3/s).

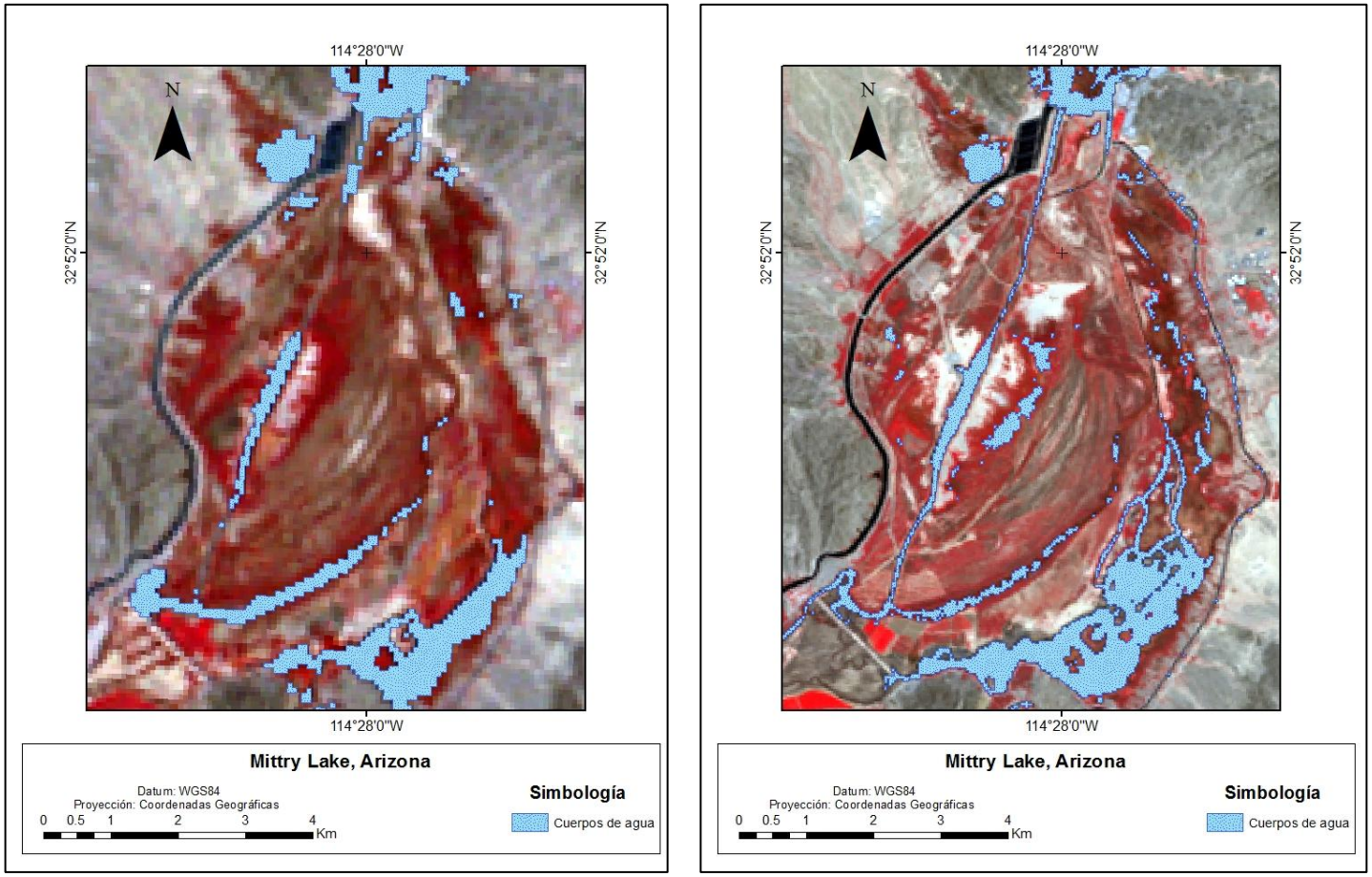
Se realizó el análisis de asociación lineal entre los datos de las tres gráficas de la figura 46. Usando la ecuación 12 (ver subcapítulo 4.3), se calculó el coeficiente de correlación de Pearson que se presenta en la tabla 15.

Tabla 15. Coeficiente de Pearson de acuerdo con la asociación lineal entre los datos de flujo volumétrico promedio anual, área de cuerpos de agua y área de vege tación de la zona 7.

r_{xy}	Flujo volumétrico promedio anual	Área de cuerpos de agua
Área de cuerpos de agua	0.71	-
Área de vegetación	0.50	0.06

En la tabla 15 se observa que el promedio anual del flujo volumétrico tiene una correlación lineal positiva alta y moderada con las áreas de los cuerpos de agua y las áreas de vegetación, respectivamente. La estación de medición de flujo volumétrico se encuentra dentro de la zona 9 (exactamente al este de la presa Imperial), por lo que registra los flujos de agua que llegan directamente al área. Por lo tanto, con el aumento o la disminución del flujo volumétrico, se observa el incremento o decremento, respectivo, del área de los cuerpos de agua y de vegetación de los humedales. En Mittry Lake existe una disminución gradual del flujo volumétrico y del área del agua superficial en todo el periodo analizado, interrumpido por los eventos climáticos extraordinarios. De acuerdo con Fred Phillips Consulting, Inc. (2008), la construcción de la presa Imperial en 1938, que desvía grandes cantidades de agua provenientes del río Colorado hacia el Valle Imperial, provocó la alteración de la vegetación, de la hidrología y de los suelos en Mittry Lake; factor que probablemente, sigue alterando las condiciones ecológicas de la zona.

En el caso de las áreas de los cuerpos de agua y de vegetación no hay correlación lineal, aunque no se puede descartar la existencia de alguna otra correlación (no lineal) entre estas variables. Como ya se ha mencionado, el área de la cubierta vegetal presentó un incremento gradual en el periodo de 1972-2002, seguido por un decremento lineal, con pendiente más abrupta. El posible factor, que provocó el incremento de las áreas de vegetación es el establecimiento de la vegetación acuática debido a la disminución del flujo volumétrico del río. Sin embargo, la reducción continua del flujo volumétrico y del área de los cuerpos de agua también tiene un efecto sobre la vegetación, lo que se reflejó en la depreciación de su área a partir del 2002.



a) b)

Figura 44. Zona 7: Mi ttry Lake, Arizona, EUA. I dentificación de los cuerpos de agua para los años de 1972 (a) y 2011 (b). Las imágenes de fondo son en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 1 MSS y RGB 4/3/2 Landsat 5 TM en a y b , respectivamente.

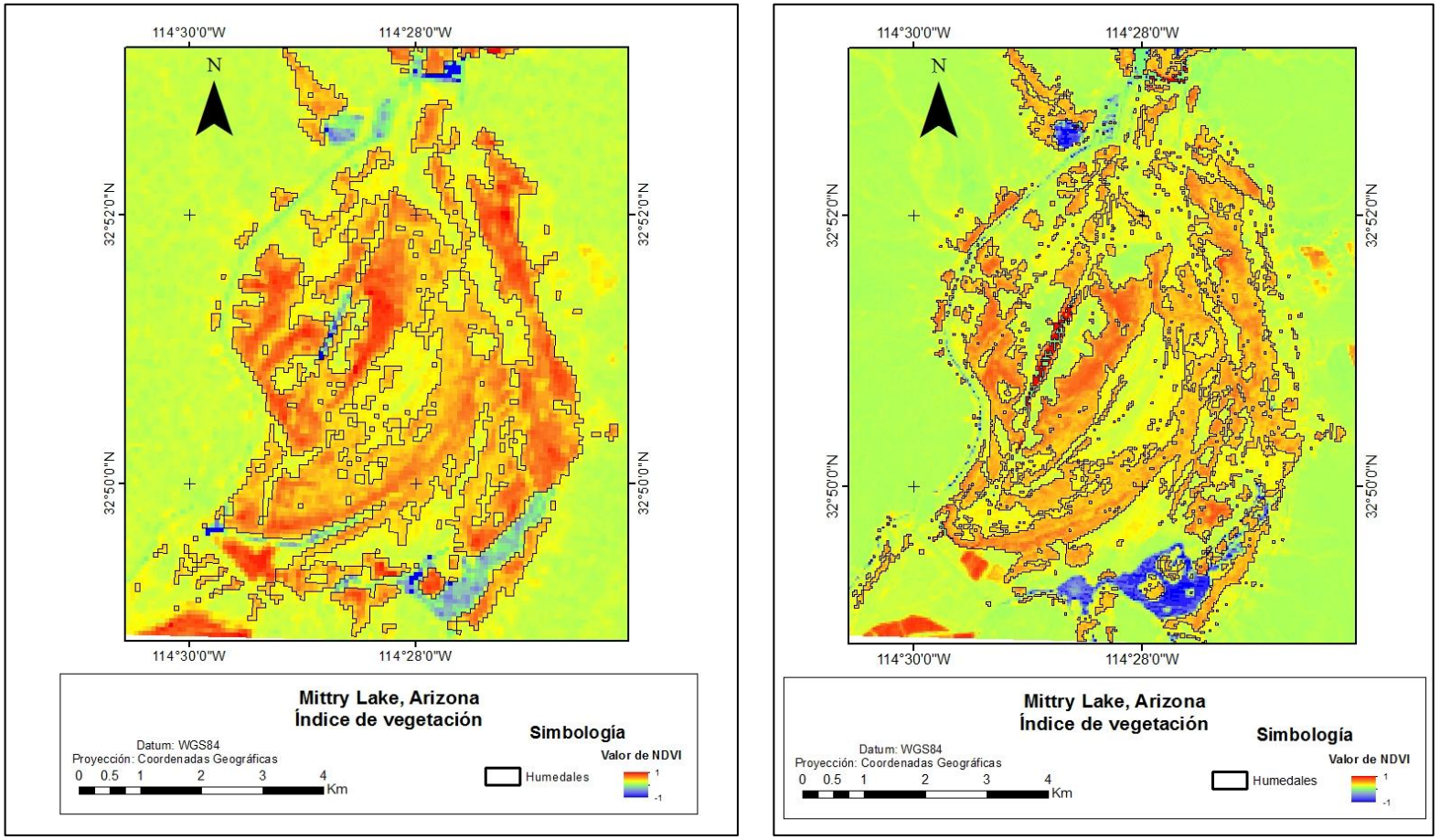
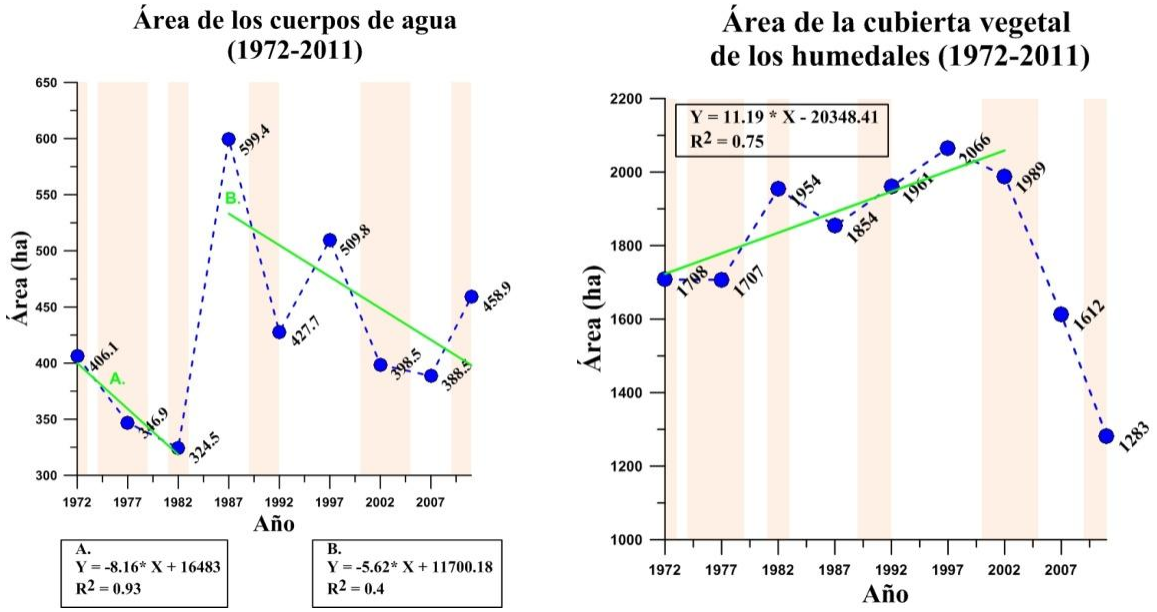
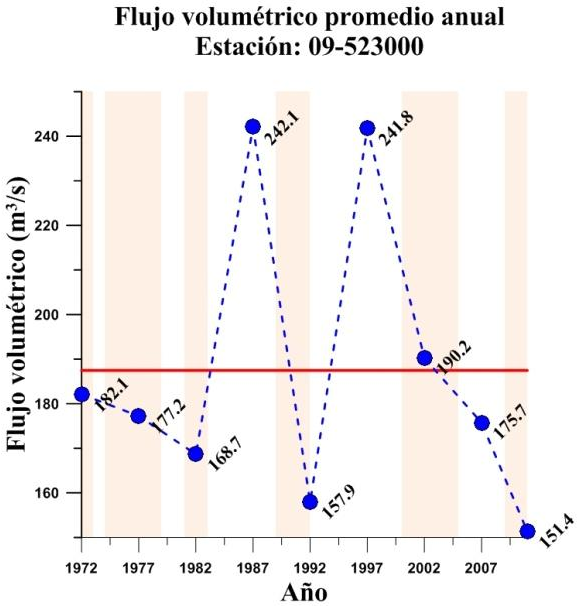


Figura 45. Zona 7: Mittry Lake, Arizona, EUA. Imagen de NDVI para el año 1972 (a) y 2011 (b). Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas.



a) b)



c)

Figura 46. Zona 7: Mittry Lake, Arizona, EUA. Series de tiempo del área de los c uerpos de agua (a), del área de la cubierta vegetal de los humedales (b) y del flujo volumétrico promedio anual (c). La recta verde representa el ajuste por regresión lineal de los datos en (a) y (b). En (a) se realizó el ajuste por regresión lineal de dos periodos: 1972 -1982 (A.) y 1987-2011 (B.). En (b) se realizó el ajuste por regresión lineal del periodo 1972 -2002. La ecuación de la recta y el coeficiente de determinación del ajuste, $\boldsymbol{R^2}$, se presentan en las gráficas. La línea roja representa el pro medio de los datos en el periodo analizado en (c). Las franjas en tono anaranjado claro que se muestran en cada una de las gráficas significan las temporadas de sequía (de https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/ drought/ ; Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (***National Oceanic and Atmospheric Administration***, NOAA, por sus siglas en inglés), Centro Nacional de Información Ambiental (National Centers for Enviromental Information, en inglés)) .

5.9. Zona 8: Tramo limítrofe del río Colorado, EUA -México

5.9.1 Descripción de la zona

La frontera entre México y Estados Unidos, según la Comisión Internacional de Límites y Agua (CILA), tiene una longitud de 3,185 km. Comprende cuatro desiertos principales, numerosas formaciones montañosas, ríos, acuíferos, humedales y estuarios compartidos (SEMARNAT-EPA, 2002).

En el 2006 se da a conocer en EUA la "Ley del muro seguro" (Secure Fence Act of 2006), una ley que haría las fronteras más seguras con la construcción de una doble malla en varios tramos de la frontera con México (Figura 48). Dentro de las propuestas está el caso de la sección limítrofe o tramo internacional, donde el río Colorado funge como frontera internacional, aproximadamente 37 km de longitud, pasando la presa Morelos y bajando hasta la frontera internacional en San Luis río Colorado, Son., México.

La presa Morelos (Figura 47), se encuentra ubicada en Mexicali, Baja California, México, ésta es la última presa del río Colorado. De la presa se deriva una red de canales de concreto hidráulico que se encargan de distribuir el agua en el Valle de Mexicali.

Según el INH de los EUA, la zona 8 (en EUA) cuenta con humedales de tipo palustre. La vegetación dominante es la vegetación leñosa, menor a 6 m de altura, de hoja caduca y perenne. Además es posible encontrar vegetación emergente, que está presente durante la mayor parte del año. Los regímenes hídricos que existen en los humedales de la zona son intermitentemente inundado, temporal inundado, semipermanentemente inundado, inundable e intermitente expuesto.

El INH de CONAGUA clasifica los humedales de la zona 8 (en México) como palustres, mientras que INEGI no presenta una clasificación de humedales para esta área.

La vegetación en esta zona, según INEGI, es de tipo VG (Vegetación de Galería), es decir, es vegetación que se desarrolla en los márgenes de los ríos y arroyos, siempre bajo condiciones de humedad. La altura de esta vegetación es distinguible de otra que la rodea, está formada por diversas especies de arbustos y abundantes de mezquites.

INEGI clasifica el suelo de la zona 8 como fluvisol, que son suelos formados de materiales acarreados por agua, poco desarrollados, medianamente profundos y presentan generalmente estructura débil o suelta.

El tipo de drenaje, según INEGI, es de tipo moderado, el agua se escurre con lentitud y a veces se acumula por periodos cortos en la superficie del suelo.

En esta zona existe un sitio de restauración de humedal nombrado "Hunters Hole" (Figura 49), se encuentra en Arizona, EUA. Esta zona ha sido degradada y la mayor parte del hábitat se ha perdido debido a la disminución de los niveles de agua, el establecimiento de especies de plantas invasoras y los incendios forestales.

Figura 47. Presa Morelos, la última presa en el río Colorado. Imagen tomada de: FaceBook: Save the Colorado River Delta (https://www.facebook.com/saveth ecoloradoriverdelta?fref=ts).

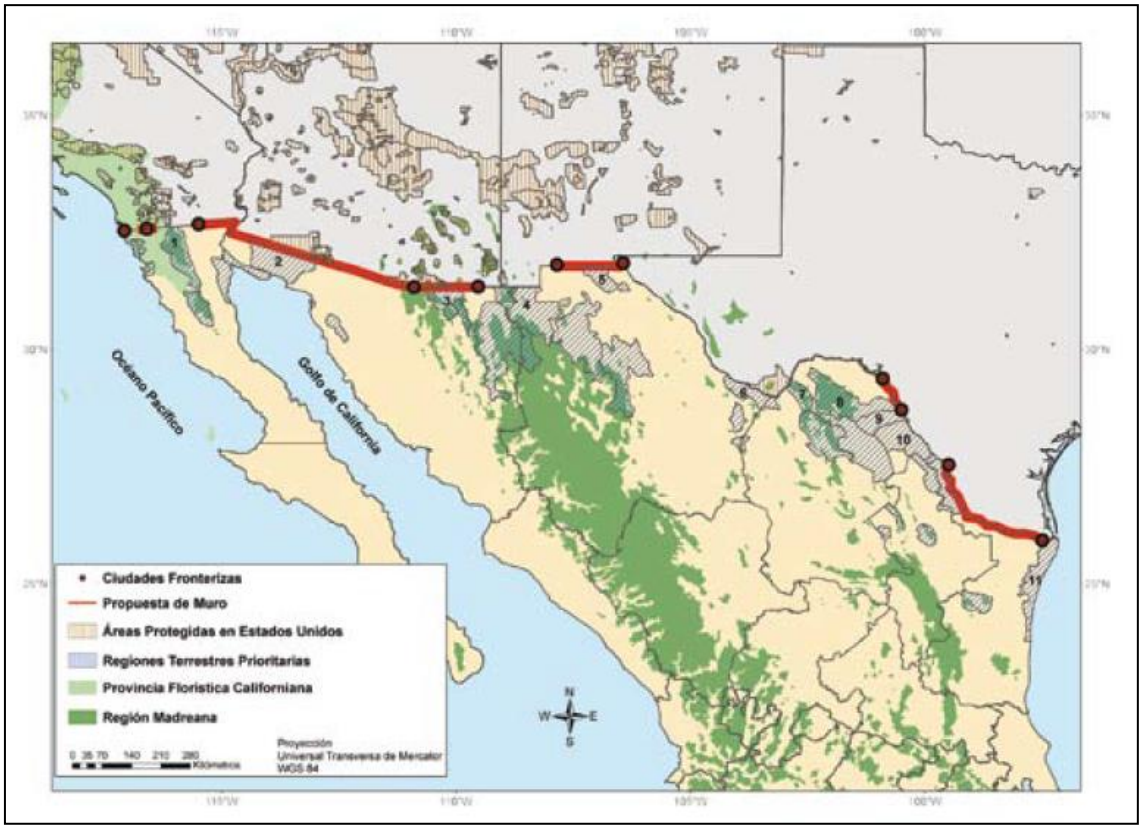


Figura 48. "Secure Fence Act", 2006. En color rojo se muestran los lugares para la colocación de un muro en la frontera de México y Estados Unidos. Imagen tomada de Kelly, 2007.

Figura 49. Ubicación de la zona de restauración Hunters Hole. Imagen tomada de: http://www.lcrmscp.gov/conservation/hunters_hole.html.

5.9.2. Cambios hidrológicos y de vegetación

La figura 50 muestra las imágenes en falso color infrarrojo para los años 1972 (a) y 2011 (b) con los cuerpos de agua identificados y vectorizados. Las imágenes correspondientes a otros años del periodo analizado se pueden consultar en el anexo 9. Los cuerpos de agua de la zona están representados por el cauce principal del río Colorado, además de canales de desviación de agua que no se tomaron en cuenta para este estudio. El cauce del río en esta zona es muy angosto; en algunas partes el ancho del cauce es menor que el ancho del pixel de las imágenes analizadas. Por lo que la identificación y vectorización de los cuerpos de agua (cauce principal del río, en este caso) pueden tener errores. Es importante mencionar que para la mayoría de los años (1982, 1992, 1997, 2007, 2009 y 2011), el cauce principal del río se ve prácticamente seco desde la parte central de la zona hasta el sur (Figuras A9.3, A9.5, A9.6, A9.8, A9.9 y 19-b, respectivamente).

La figura 51 muestra las imágenes de NDVI para los años de 1972 (a) y 2011 (b) con las áreas de cubierta vegetal de los humedales identificadas y vectorizadas. Las imágenes correspondientes a otros años del periodo analizado se pueden consultar en el anexo 9. En las imágenes se puede observar que la zona no posee humedales de extensiones grandes, la vegetación de esta zona se desarrolla en los márgenes del cauce principal, lo que concuerda con la clasificación de INEGI, la cual se clasifica como vegetación de galería. Analizando las imágenes en falso color infrarrojo junto con las imágenes de NDVI, se puede notar, que el umbral que fue escogido para identificar y vectorizar la vegetación natural de los humedales en esta zona es demasiado alto, ya que la vegetación natural del lugar es escasa y poco vigorosa. Por lo que es importante resaltar, que en este trabajo de tesis, para la zona 8, se contabilizó la vegetación natural vigorosa de los humedales, por lo que las áreas pueden ser más grandes que las que se contabilizaron.

La figura 52 presenta las gráficas de las series de tiempo del área de los cuerpos de agua (a), del área de la cubierta vegetal de los humedales (b) y del flujo volumétrico promedio anual (c). Las series de tiempo abarcan el periodo de 40 años, desde 1972 a 2011, con frecuencia de muestreo de 5 a 4 años.

La figura 52-a muestra la serie de tiempo del área de los cuerpos de agua para el periodo de 1972-2011. En esta gráfica se observa que al inicio del periodo analizado (1972-1982) hay un incremento importante (~240 %, 243.5 ha) del área de los cuerpos de agua. Dicho incremento es continuo más no lineal (diferente velocidad de incremento). No se pudo explicar dicho incremento en las áreas con la información que se tuvo disponible para este trabajo. No pueden ser descartados los errores en la identificación y vectorzación de los cuerpos de agua, debido a las razones mencionadas anteriormente. Para el año de 1987 el área de la superficie cubierta por agua se mantuvo alto (342.4 ha) gracias al periodo de lluvias y deshielos extraordinarios que se mostraron en la década de los 80´s. Para el siguiente año de muestreo (1992) el área de cuerpos de agua se redujo un ~78 % (267.16 ha). Dicha disminución concuerda con el periodo de sequía. A partir de este año, el área de los cuerpos de agua se mantuvo casi constante, sin importantes variaciones. El promedio del área de los cuerpos de agua para el periodo de 1992-2011 fue de 76.2 ha con una desviación estándar de 19.11 ha. Es importante notar que en el periodo analizado (1972 y 2011), el valor estimado del área de cuerpos de agua es prácticamente igual (~103 ha).

La figura 52-b muestra la serie de tiempo del área de la cubierta vegetal de los humedales para el periodo de 1972-2011. La gráfica no presenta una tendencia definida, sino variaciones irregulares, ciclos de subidas y bajadas de magnitud y duración variable. El promedio del área de la cubierta vegetal de los humedales para los 40 años analizados fue de 729.23 ha con una desviación estándar de 309.4 ha. Los máximos locales se muestran en los años de 1987 (997.4 ha), 1997 (922.2 ha) y 2002 (1,100 ha). Mientras que los mínimos locales se observan en 1972 (434.4 ha), 1982 (221.7 ha), 1992 (653.1 ha) y 2007 (560.8 ha). El aumento del área de la cubierta vegetal en 1987 y 1997, coinciden con el periodo de lluvias y deshielos. Las áreas mínimas en cobertura vegetal, en general, reflejan los periodos de sequía, excepto el año 2007.

La figura 52-c muestra el registro del flujo volumétrico promedio anual para el periodo de 1972-2011 medido por la estación 09-521100, que se encuentra ubicada aproximadamente a 10 km río arriba de la zona. El registro del flujo volumétrico anual no presenta variaciones importantes, excepto para el año de 1987 (80.17 m^3/s),

cuando hubo un aumento de ~220 % en el flujo del río, alcanzando el valor máximo para el periodo analizado. Dicho aumento concuerda con el periodo de precipitaciones altas. Sin tomar en cuenta el valor del flujo volumétrico en los años de 1987 y 1992 (ya que estos, todavía presentan los efectos de los fenómenos climáticos ocurridos en el periodo de 1983-1989), se observa que la serie de tiempo presenta una tendencia lineal ascendente. El ajuste lineal ($R^2 = 0.57$) de la serie, supone un aumento en el flujo volumétrico del río de ~33 % (7.8 m^3/s) en 40 años. A pesar del incremento, los valores del flujo volumétrico registrados son muy bajos, comparados con las estaciones de medición río arriba.

Se realizó el análisis de asociación lineal entre los datos de las tres gráficas de la figura 52. Usando la ecuación 12 (ver subcapítulo 4.3), se calculó el coeficiente de correlación de Pearson que se presenta en la tabla 16.

Tabla 16. Coeficiente de Pearson de acuerdo con la asociación lineal entre los datos de flujo volumétrico promedio anual, área de cuerpos de agua y área de vegetación de la zona 8.

r_{xy}	Flujo volumétrico promedio anual	Área de cuerpos de agua
Área de cuerpos de agua	0.42	-
Área de vegetación	0.39	- 0.014

En la tabla 16 se observa que existe una correlación lineal positiva baja entre el flujo volumétrico y el área de los cuerpos de agua y de vegetación. En el caso de las áreas de los cuerpos de agua y áreas de vegetación no existe una correlación lineal entre estas variables, pero no se descarta la existencia de una correlación no lineal.

Como ha sido mencionado durante la descripción de las series de tiempo, presentadas en la figura 52, no se observan cambios importantes (sin tomar en cuenta las variaciones irregulares) en las tres variables analizadas durante el periodo analizado.

A pesar de que la presa Morelos disminuye los aportes de agua, el río en esta zona ha mantenido un caudal y vegetación a lo largo de sus márgenes, que probablemente pueda deberse a las filtraciones de agua provenientes de la presa o inundaciones extraordinarias, cada vez menos frecuentes. Además esta parte del río no está canalizada ni redirigida, sigue siendo un río natural y con poca vegetación nativa (álamo y sauce).

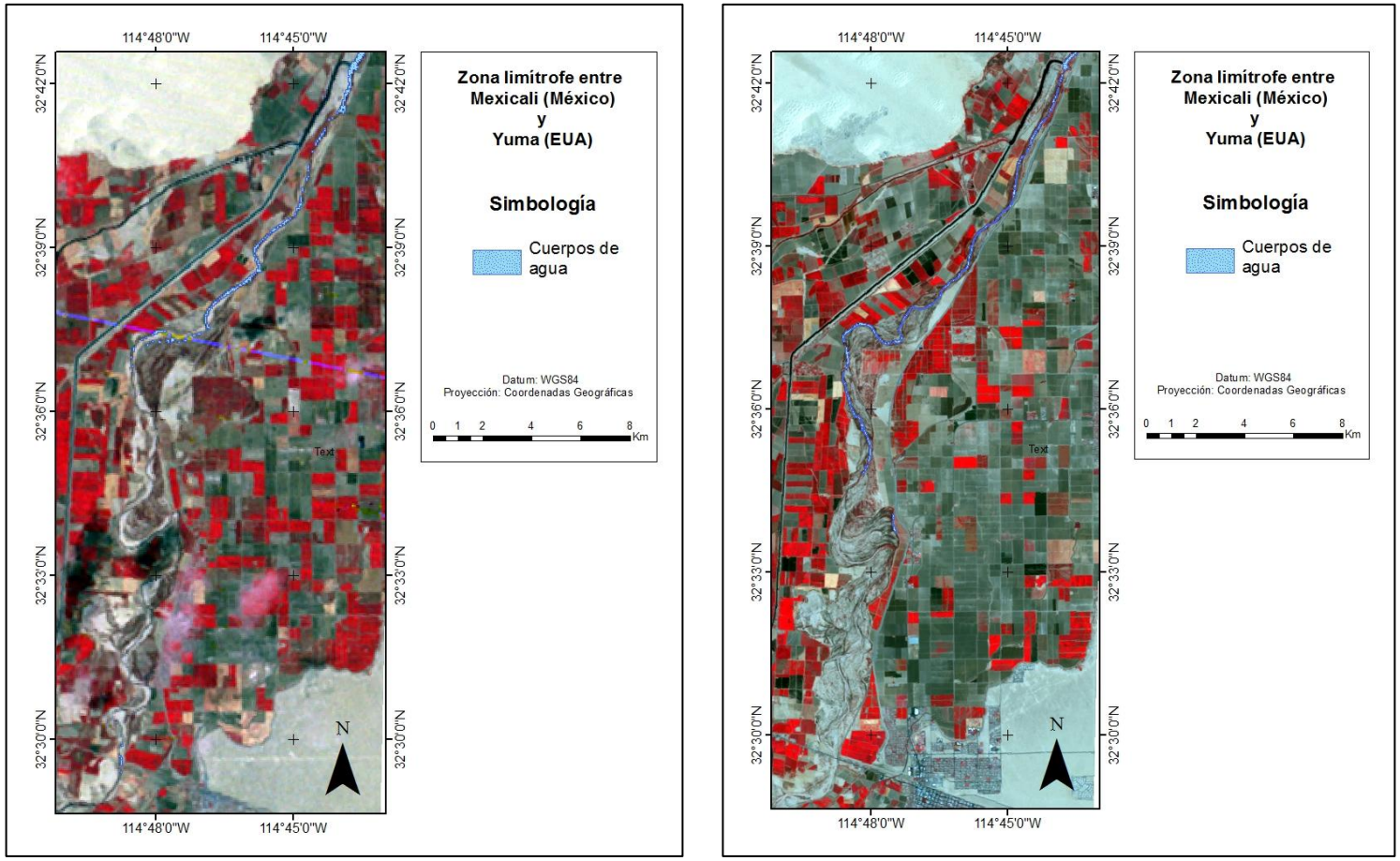


Figura 50. Zona 8: Tramo limítrofe del río Colorado , EUA-México. Identificación de los cuerpos de agua para los años de 1972 (a) y 2011 (b). Las imágenes de fondo son en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 1 MSS y RGB 4/3/2 Landsat 5 TM en a y b, respectivamente.

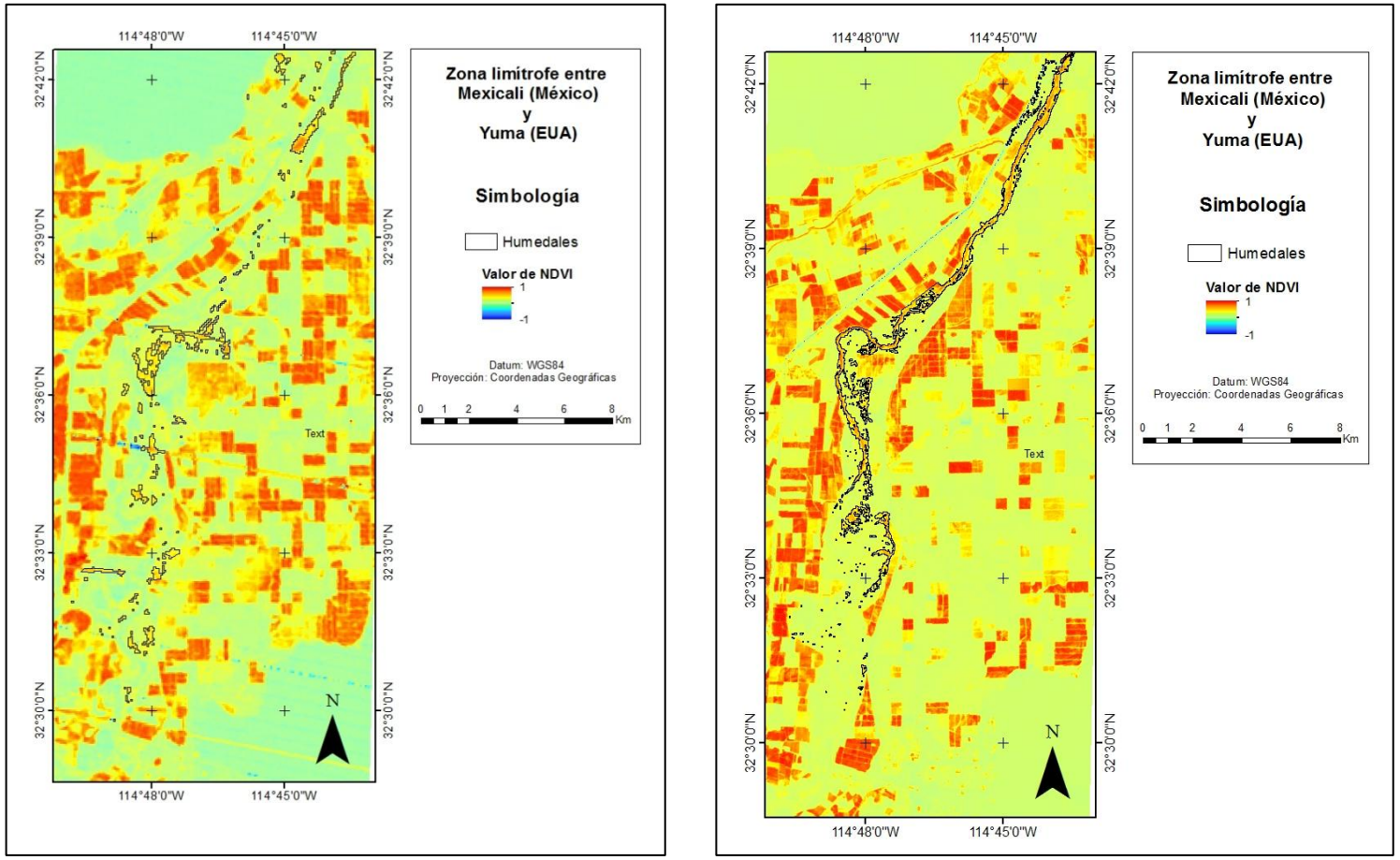
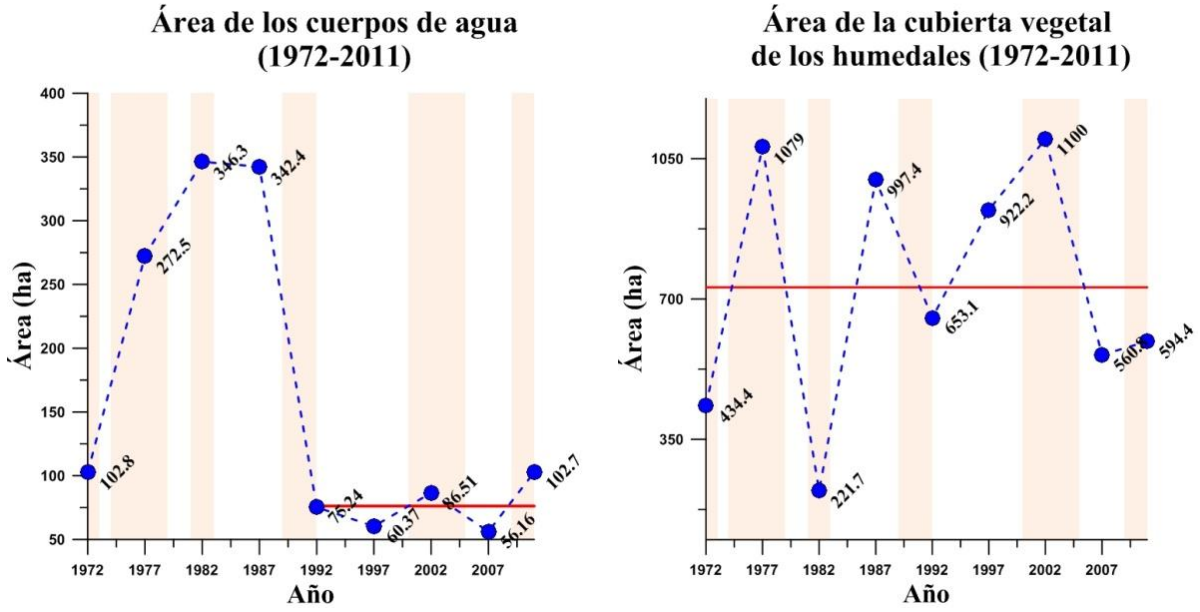


Figura 51. Zona 8: Tramo limítrofe del río Colorado, EUA -México. Imagen de NDVI para el año 1972 (a) y 2011 (b). Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas.



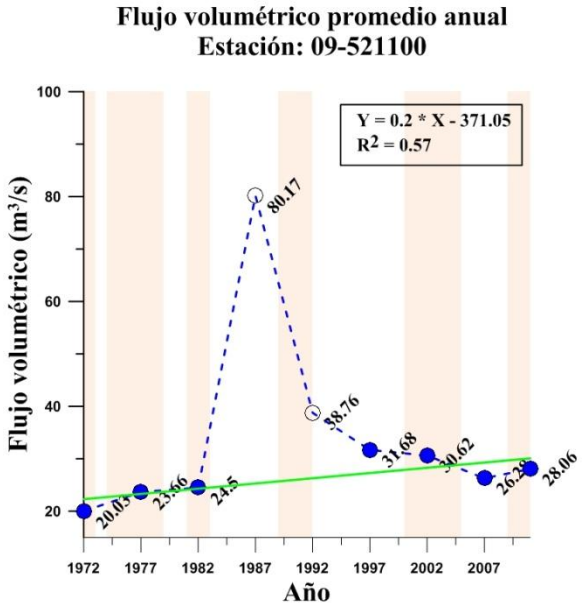


Figura 52. Zona 8: Tramo limítrofe del río Colorado, EUA -México. Series de tiempo del área de los cuerpos de agua (a), del área de la cubierta ve getal de los humedales (b) y del flujo volumétrico promedio anual (c). La línea roja representa el promedio de los datos en el periodo 1992 -2011 y 1972-2011 en (a) y (b), respectivamente. La recta verde representa el ajuste por regresión lineal de los dato s en (c), excluyendo los años 1987 y 1992 (símbolos sin relleno). La ecuación de la recta y el coeficiente de determinación del ajuste, $\boldsymbol{R^2}$, se presentan en la gráfica. Las franjas en tono anaranjado claro que se muestran en cada una de las gráficas significan las temporadas de sequía (de https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/drought/; Admi nistración Nacional Oceánica y Atmosférica (***National Oceanic and Atmospheric Administration***, NOAA, por sus siglas en inglés), Centro Nacional de Información Ambiental (National Centers for Enviromental Information, en inglés)) .

5.10. Zona 9: Río Colora do en México

5.10.1 Descripción de la zona

De acuerdo con McDougal (1904), Sykes (1937) y Leopold (1949), el río Colorado en México fue uno de los grandes estuarios desérticos del mundo y ha sido alterado en gran medida por la actividad humana.

Sykes (1937), menciona que el Delta del río Colorado ocupaba 780 mil hectáreas y que incluía la "Laguna Salada", en México y el "Mar de Saltón" en EUA. En la actualidad gran parte del Delta superior se ha convertido en tierras de cultivo; y la parte inferior es lodo estéril o suelo salino, lo que ha ocasionado una disminución en la fauna en todo el Delta (Payne, Reid y Carrera, 1992). Los pueblos indígenas que habitan la zona tienen dificultad para mantener su modo de vida tradicional como la pesca, que depende del flujo del río (Richardson y Carrier, 1992).

Las presas, los reservorios y las desviaciones construidas desde 1905, a lo largo del río Colorado, han provocado una reducción drástica en el flujo normal del agua y consigo la degradación de diversos ambientes naturales desde la presa Morelos hasta el Alto Golfo de California. A raíz de esto, diversas organizaciones, tanto mexicanas como internacionales, sobre todo organizaciones no gubernamentales (ONG), se interesaron profundamente en la recuperación de los ecosistemas del río Colorado (INE-SEMARNAT, 2006).

Entre los años 2002 y 2003, los usuarios de la Asociación Ecológica de Usuarios del Río Hardy-Colorado A.C. (AEURHYC) construyeron una estructura conocida como "El Tapón", ubicada al sur del área denominada "El Riñón" (Figura 53), esta estructura es un dique a base de costales de arena y reforzado con rocas cuyo propósito es elevar los niveles de agua para restaurar algunos sitios y favorecer el crecimiento de la flora y fauna nativa (Zamora-Arroyo et al., 2005). Esta estructura ha ayudado a incrementar el nivel del agua. Se crearon las condiciones para inundar 405 ha secas y se beneficiaron las actividades de ecoturismo, acuacultura y otras actividades recreativas.

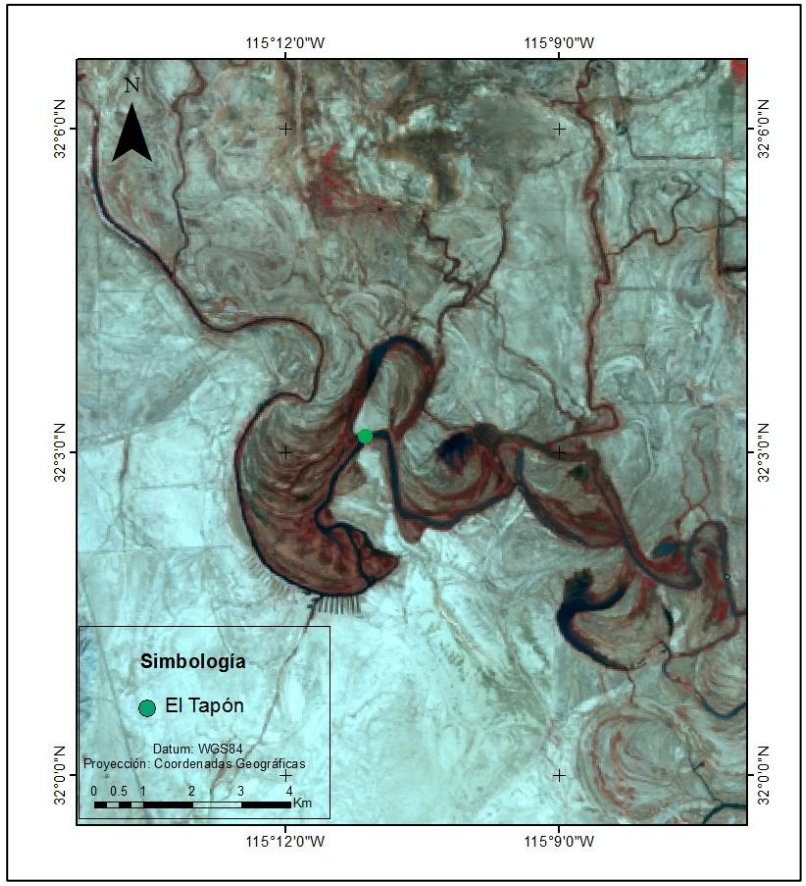
El corredor ripario del río Colorado cuenta con una longitud de 112 km. Desde el año 2008 Sonoran Institute y Pronatura Noroeste llevan a cabo la restauración de una parte de este corredor conocida como "Laguna Grande" (Figura 54), la cual tiene un área de

485 ha de hábitat ripario remanente que sobrevive del agua subterránea y de los reducidos flujos del río Colorado. Esta restauración tiene la finalidad de recuperar la flora y fauna nativa.

Según el INH de INEGI, esta zona cuenta con vegetación de galería, que es aquella vegetación arbustiva o herbácea que se desarrolla sobre suelos con alto contenido de sales, vegetación de desiertos arenosos, dicha vegetación consiste de los arbustos que se agrupan por manchones sobre dunas de arenas en los desiertos áridos y vegetación halófila, que es característica de los suelos salinos. Y de acuerdo al INH de CONAGUA, los humedales presentes en esta zona son de tipo palustre y estuarino.

Los humedales estuarinos consisten en hábitats de aguas profundas que son influenciados por las mareas y se encuentran semi-rodeados por tierra, pero que tienen un acceso con el mar, ya sea permanentemente abierto, esporádico o parcialmente obstruido.

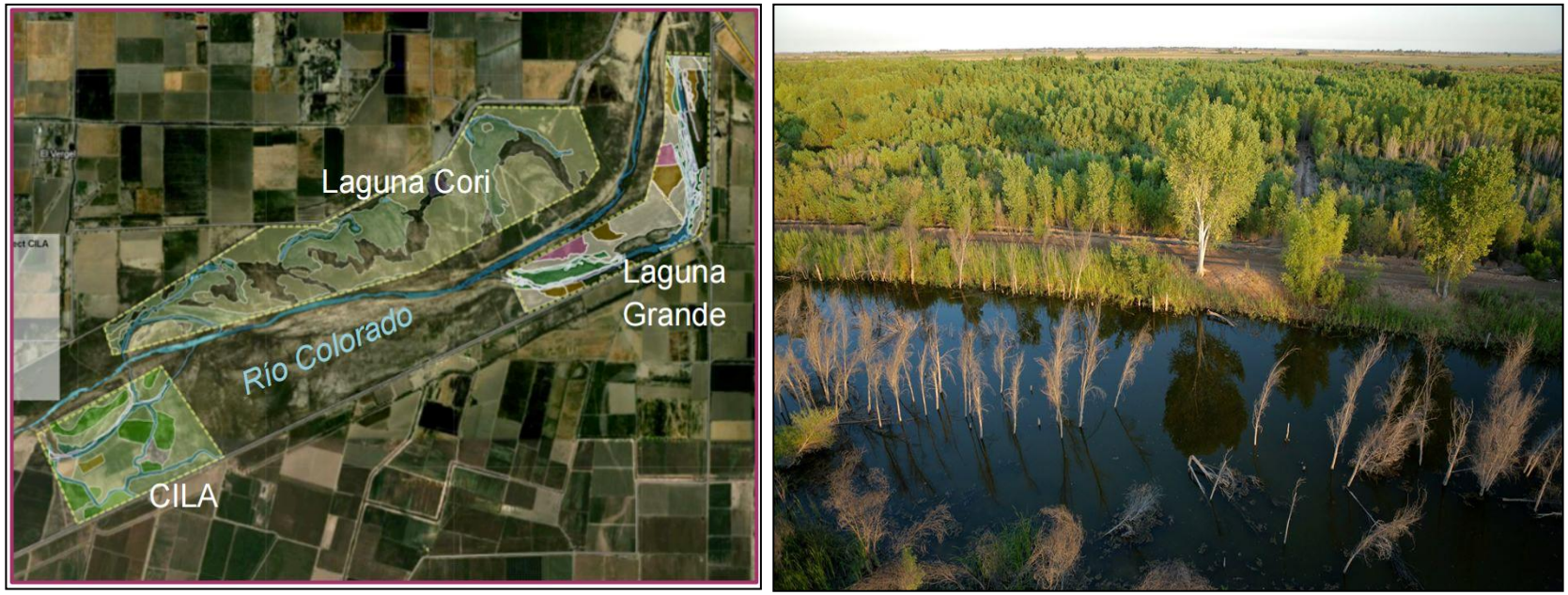
INEGI reporta dos tipos de suelo en la zona: fluvisol y solonchak. Los suelos solonchak son aquellos con un alto contenido de sales solubles.



a)

b)

Figura 53. a) Ubicación geográfica del dique conocido como "El Tapón" y b) Imagen de "El Tapón", tomada de Google Earth el 1 de abril de 2015.



a) b)

Figura 54. a) Zona de restauración "Laguna Grande" está formada por 3 polígonos de terrenos concesionados: CILA (109 ha), Laguna Grande (275 ha) y Laguna Cori (101 ha). Imagen tomada de: http://www.sonoraninstitute.org/component/docman/doc_vie w/1558-.html . b) Sitio CILA en el área de restauración "Laguna Grande". Foto: Francisco Zamora (2015).

5.10.2. Cambios hidrológicos y de vegetación

La figura 55 muestra las imágenes en falso color infrarrojo para los años 1972 (a) y 2011 (b) con los cuerpos de agua identificados y vectorizados. Las imágenes correspondientes a otros años del periodo analizado se pueden consultar en el anexo 10. De igual manera que para la zona 8, en esta zona el cauce principal del río Colorado lleva poca agua y es muy angosto, por lo que la identificación y vectorización de los cuerpos de agua de esta zona puede tener errores. Es importante mencionar que para el año 2011 se observa un importante incremento de la superficie cubierta por agua en la parte sur de la zona (desembocadura del río Colorado en el Golfo de California) (Figura 55-b). Dicho incremento se debe a la entrada de agua de mar, provenientes del Golfo de California, hacia la zona del Delta y que probablemente se relaciona con el sismo ocurrido el 4 de abril de 2010 de $Mw = 7.2$, que causó el hundimiento en esta zona (Nelson, Fielding, Zamora-Arroyo y Flessa, 2013a; 2013b).

En la figura 56 se presentan las imágenes de NDVI para los años de 1972 (a) y 2011 (b) con las áreas de la cubierta vegetal de los humedales identificadas y vectorizadas. Las imágenes correspondientes a otros años del periodo analizado se pueden consultar en el anexo 10. Analizando las imágenes en falso color infrarrojo junto con las imágenes de NDVI, se puede notar, que el umbral que fue escogido para identificar y vectorizar la vegetación natural de los humedales en esta zona es demasiado alto; debido a que la vegetación natural de la zona es escasa y de poco vigor. Por lo que es importante resaltar, que en este trabajo de tesis, para la zona 9, se contabilizaron solo las zonas con vegetación natural de humedal vigorosa; las zonas de humedal pueden ser más grandes que las que se contabilizaron.

La figura 57 presenta las gráficas de las series de tiempo del área de los cuerpos de agua (a), del área de la cubierta vegetal de los humedales (b) y del flujo volumétrico promedio anual (c). Las series de tiempo abarcan el periodo de 40 años, desde 1972 a 2011, con frecuencia de muestreo de 5 a 4 años.

La figura 57-a muestra la serie de tiempo de las áreas de los cuerpos de agua para el periodo de 1972-2011. La serie de tiempo no presenta una tendencia clara bien definida, sino variaciones irregulares. El promedio del área cubierta por agua para los

años analizados fue de 2,307.2 ha con una desviación estándar de 1,029.1 ha. Los mínimos locales se mostraron en los años de 1972 (861.5 ha), 1982 (2,495 ha), 1992 (1,156 ha) y 2002 (1,480 ha), los cuales coinciden con los periodos de sequía. Los máximos locales se presentaron en los años de 1977 (3,087 ha), 1987 (4,137 ha), 1997 (2,912 ha) y 2007 (2,409 ha). Los máximos locales, en la mayoría, coindicen con los periodos de lluvias y deshielos importantes, excepto el año de 1977. De las imágenes en falso color infrarrojo se puede observar que el incremento del área del agua superficial se debe a la aparición de nuevos cuerpos de agua e incremento del área de los cuerpos de agua ya existentes al sur de la zona de estudio entre los años de 1972-77 (Figuras 55-a (A10.1) y A10.2). Para el siguiente año de muestreo, 1982 (Figura A10.3), a pesar de una disminución del área, el valor se mantiene alto (mayor que el promedio) y se debe probablemente, a que los cuerpos de agua en el sur de la zona se mantuvieron presentes. Debido a que los años de estudio de 1972, 1977 y 1982 coinciden con años de sequía, no se espera el aumento de la aportación de agua por el río Colorado, comprobado por el registro del flujo volumétrico (Figura 57-c) e imágenes en falso color infrarrojo correspondientes a los años en cuestión, donde no se observa el aumento en el cauce del río. Esto se puede atribuir a la aparición de cuerpos de agua en el sur de la zona por la acción de las mareas del Golfo de California, hacia el Delta. En el año 2007, como ya se mencionó, se observó el máximo local, que coincide con el periodo corto de lluvias. Sin embargo, la imagen en falso color infrarrojo del 2007 (Figura A10.8) revela que el aumento del área de los cuerpos de agua se debe a la construcción de la estructura conocida como "El Tapón" entre los años 2002 y 2003. En dicha imagen se ve como aumentó el área del agua superficial en la zona denominada "El Riñón".

La figura 57-b muestra la serie de tiempo del área de la cubierta vegetal de los humedales para el periodo de 1972-2011. Al inicio del periodo analizado, se observa la disminución del área de la cobertura vegetal entre los años de 1972 y 1977, que se mantuvo baja para el siguiente año analizado (1982). Dichos años concuerdan con los años de incremento del área de los cuerpos de agua, que han sido interpretados como formaciones nuevas y aumento en las áreas de los cuerpos de agua existentes al sur de la zona; por la acción de las mareas del Golfo de California. Dichos cuerpos de agua ocuparon las zonas previamente (1972) cubiertas por vegetación. Se observa un

incremento repentino (~11,000 ha) en el área de la cubierta vegetal entre los años de 1982 y 1987, causado por el evento de lluvias y deshielos extraordinarios. A partir de 1987 la gráfica presenta una tendencia lineal descendente. Según el ajuste lineal ($R^2 = 0.61$), el área de la cubierta vegetal se redujo en un ~ 58 % (6,278 ha) entre los años de 1987 y 2011. Es importante resaltar que, el área de la superficie cubierta por vegetación en el año 2011 es ~2,773 ha (~45 %) menos que en el año de 1972.

Por último la figura 57-c muestra el registro del flujo volumétrico promedio anual para el periodo de 1972-2011 medido por la estación 09-522200. Esta estación se encarga de medir el flujo del río en territorio mexicano y se encuentra ubicada a la altura del puente de San Luis Río Colorado, Son., México, unos kilómetros río arriba. Es importante señalar que los datos de los años 2007 y 2011 son provisionales y están sujetos a revisión, de acuerdo con CILA. El promedio anual del flujo volumétrico del río para esta zona muestra una tendencia descendente, sin importantes variaciones irregulares, excepto los años de 1987 (99.4 m^3/s) y 1997 (24.78 m^3/s),que presentaron incrementos en el flujo y estos coinciden con las altas precipitaciones y deshielos durante o posterior a estos años.

Se realizó el análisis de asociación lineal entre los datos de las tres gráficas de la figura 57. Usando la ecuación 12 presentada en el subcapítulo 4.3, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson y los resultados se presentan en la tabla 17.

Tabla 17. Coeficiente de Pearson de acuerdo con la asociación lineal entre los datos de flujo volumétrico promedio anual, área de cuerpos de agua y área de vege tación de la zona 9.

r_{xy}	Flujo volumétrico promedio anual	Área de cuerpos de agua
Área de cuerpos de agua	0.21	-
Área de vegetación	0.71	- 0.08

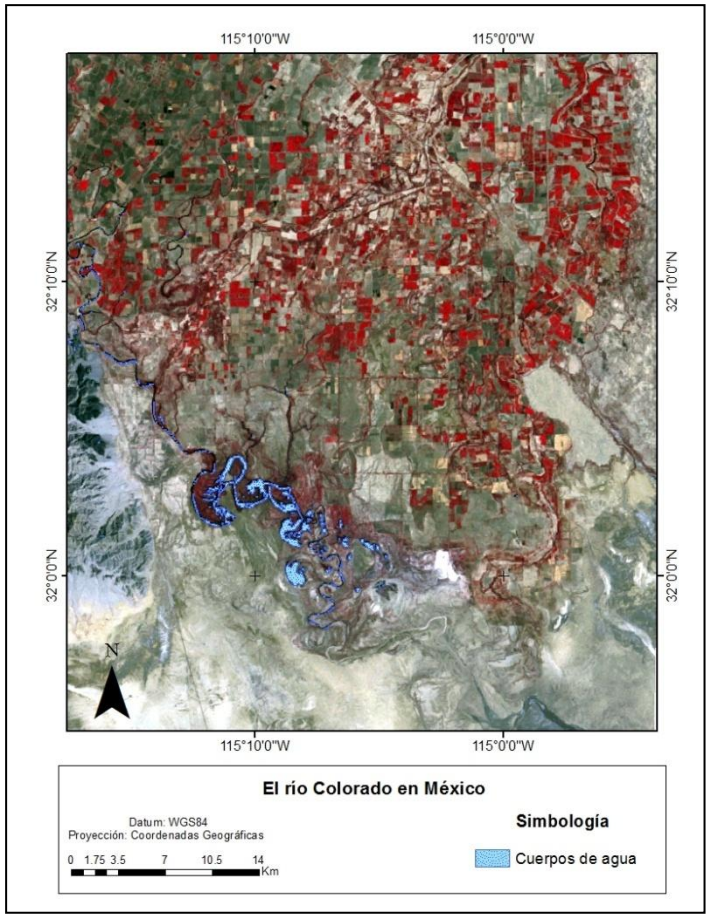
En la tabla 17, se observa que existe una correlación lineal positiva muy baja entre el flujo volumétrico y el área de los cuerpos de agua, este tipo de correlación pudiera deberse a que en esta zona el agua ya no llega hasta el Golfo, lo que muestra un cauce seco, provocando que el agua que llega a esta parte se infiltre rápidamente.

Por otro lado, la relación entre el flujo volumétrico y las áreas de vegetación presentó una correlación lineal positiva alta. La cubierta vegetal de los humedales dependerá del

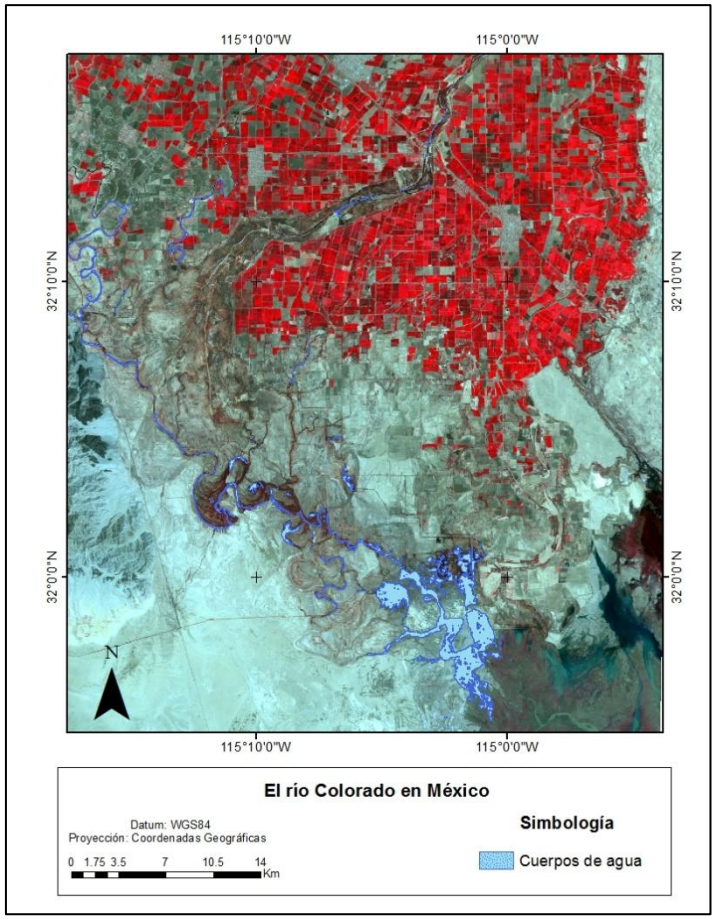
flujo volumétrico, a mayor flujo mayor cubierta vegetal. Los flujos excedentes del río Colorado en los años 80´s, provocados por las altas precipitaciones, además de la acción de las mareas del Golfo de California mejoraron las condiciones ecológicas de la zona riparia, intermareal y marina en el Golfo de California. Estas inundaciones repercutieron en el crecimiento de la vegetación de los humedales.

En el caso de las áreas de los cuerpos de agua y de vegetación hay una correlación casi nula. Pero no se descarta la existencia de otro tipo de correlación (no lineal).

La correlación lineal entre las áreas de los cuerpos de agua y las demás variables se debe a que ésta no solo depende del flujo del río Colorado, sino también a la entrada de agua salada proveniente del Golfo de California, sobre todo en el sur de la zona y a las aportaciones del río Hardy. Lo que influye en las estimaciones que se hicieron en este trabajo de investigación.

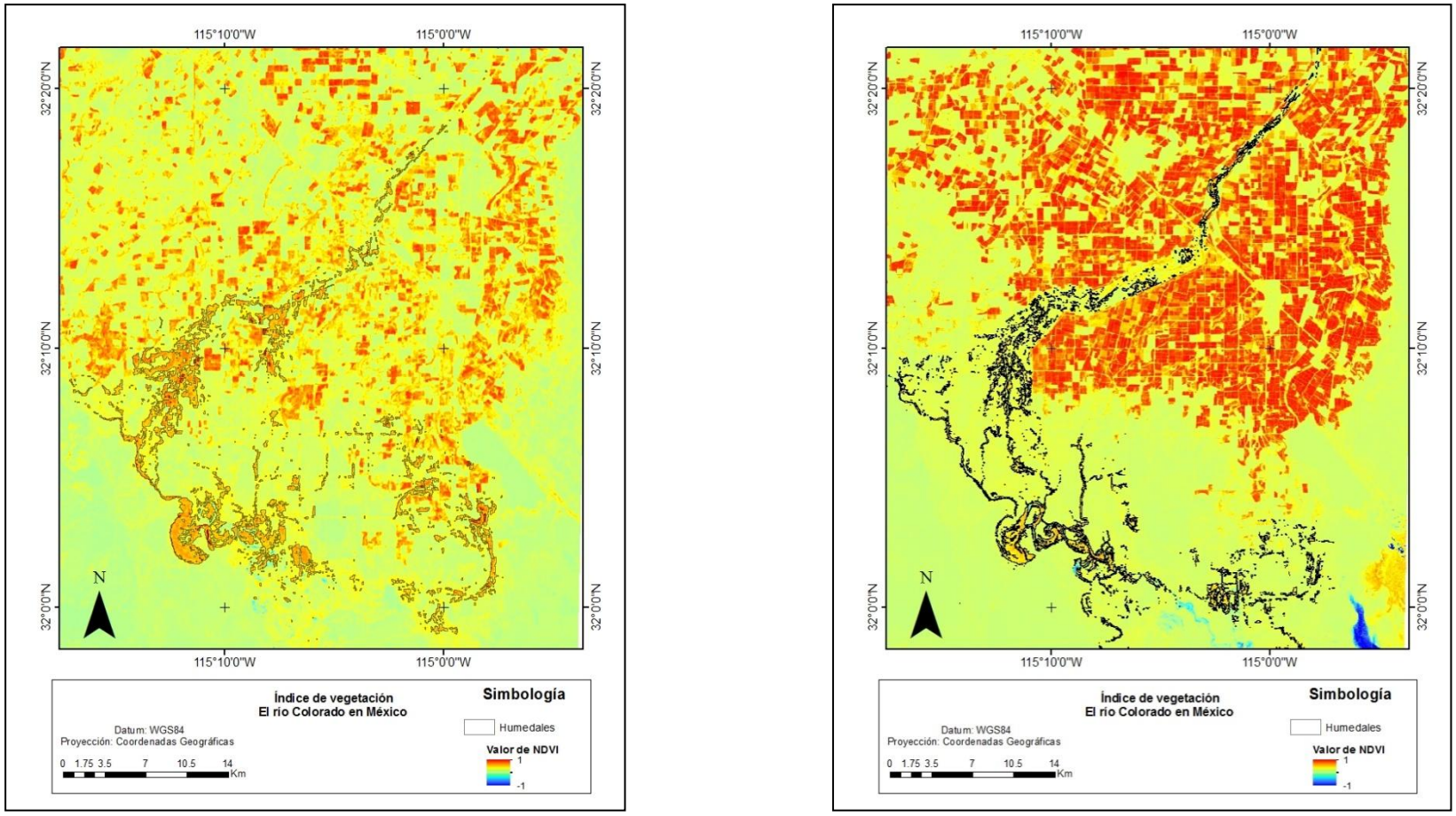


a)



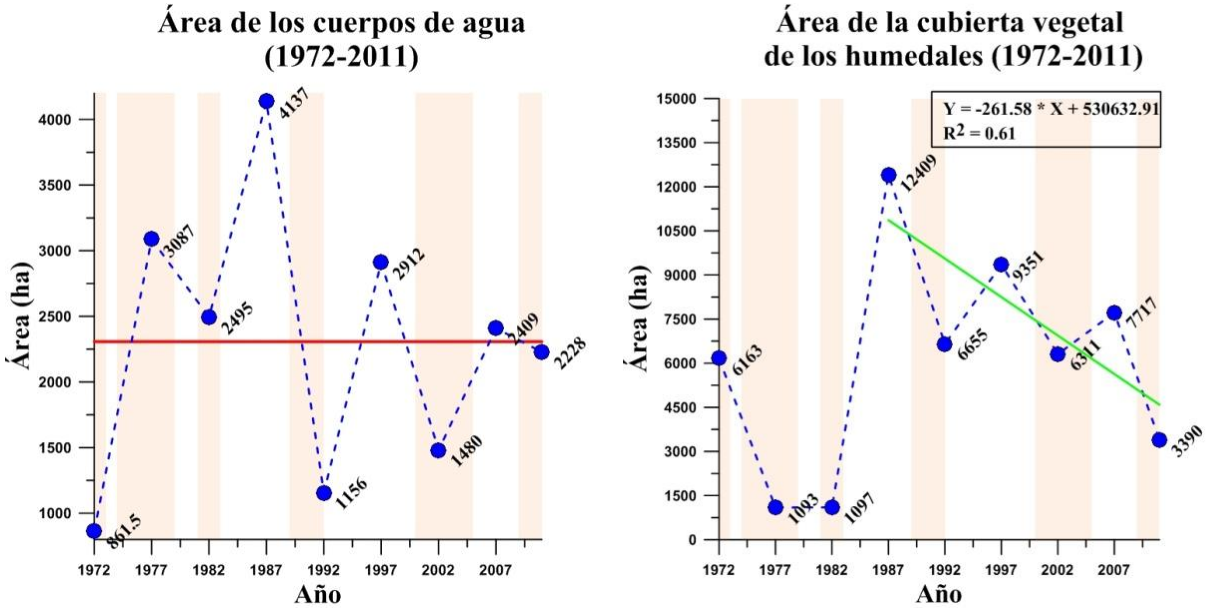
b)

Figura 55. Zona 9: Río Colora do en México. I dentificación de los cuerpos de agua para los años de 1972 (a) y 2011 (b). Las imágenes de fondo son en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 1 MSS y RGB 4/3/2 Landsat 5 TM en a y b , respectivamente .

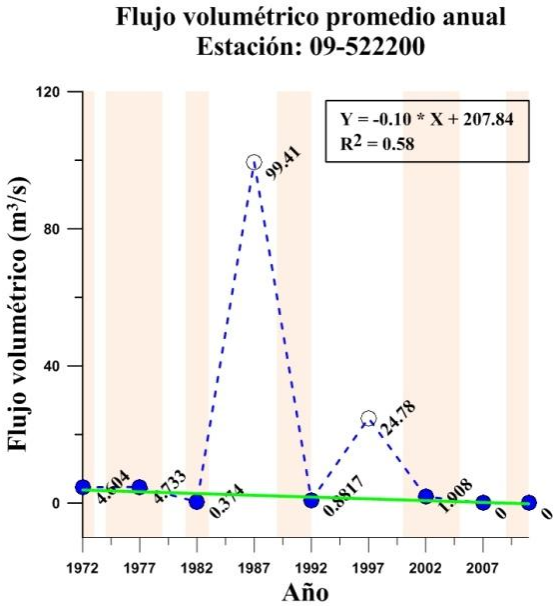


a) b)

Figura 56. Zona 9: Río Colorado en México. Imagen de NDVI para el año 1972 (a) y 2011 (b). Las áreas de la cubierta vegetal d e los humedales están vecto rizadas.



a) b)



c)

Figura 57. Zona 9: Río Colorado en México. Series de tiempo del área de los cuerpos de agua (a), del área de la cubierta vegetal de los humedales (b) y del flujo volumétrico promedio anual (c). La línea roja representa el prom edio de los datos en el periodo analizado en (a).). La recta verde representa el ajuste por regresión lineal de los datos en (b), donde el ajuste se realizó para el periodo 1987 -2011, y (c), donde se excluyeron los datos de los años 1987 y 1997 (símbolos sin relleno). La ecuación de la recta y el coeficiente de determinación del ajuste, R^2, se presentan en las gráficas. Las franjas en tono anaranjado claro que se muestran en cada una de las gráficas significan las temporadas de sequía (de https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/drought/ ; Adm inistración Nacional Oceánica y Atmosférica (***National Oceanic and Atmospheric Administration***, NOAA, por sus siglas en inglés), Centro Nacional de Información Ambiental (National Centers for Enviromental Information, en inglés)) .

6. Discusión general

Métodos

Los métodos propuestos en este trabajo se centraron en el pre-procesamiento e interpretación de las imágenes de diferentes fechas y de diferentes sensores (Landsat MSS y TM). De acuerdo con Chuvieco et al., (2002) y Brizuela et al., (2007) para realizar comparaciones entre imágenes de distintas fechas, de las mismas áreas, es necesario realizar las correcciones de los datos para convertir los valores de DN (números digitales) a variables físicas, de manera que las imágenes sean comparables. Esto se debe a la naturaleza en la toma de datos de ambos sensores, el distinto número de bandas, el rango espectral, entre otros factores. En este trabajo se realizaron las correcciones descritas en el apartado 4.2.2, lo que permitió que las imágenes de distintas fechas fueran comparables.

En el proceso de selección de las zonas de estudio para este trabajo de tesis, se realizó la comparación visual de las imágenes Landsat 5 TM, previamente pre-procesadas, de dos décadas diferentes, con la finalidad de detectar las zonas de humedales con mayores cambios en la vegetación y en la hidrología superficial. La comparación visual se realizó a partir de composiciones o combinaciones en color (RGB). Se probaron distintas combinaciones de bandas; la combinación que dio mejores resultados fue la combinación utilizada por Pérez-Ortega (2011) y Saleh (2012). Ésta combinación en falso color infrarrojo (RGB 4/3/2) permitió identificar los diferentes tipos de cobertura como cuerpos de agua y presencia de vegetación saludable en las imágenes Landsat TM. El cauce principal del río Colorado presentó diversos cambios en su hidrología y en las áreas cubiertas de vegetación en un periodo de tiempo de 23 años (1986-2009), y solamente se seleccionaron aquellas zonas que presentaron mayores modificaciones, dando como resultado 9 zonas seleccionadas.

La respuesta espectral del agua depende de la presencia de partículas en suspensión y su grado de turbidez. Entre mayor número de partículas suspendidas es menor la respuesta espectral y viceversa. Además el agua pura posee una transmisión de la radiación electromagnética en el espectro visible y de absorción en el infrarrojo. De acuerdo con Domínguez (2002), Martínez et al., (2003) y Lee et al. (2001), esta falta de

reflectividad en el infrarrojo (cercano o medio) es clave para distinguir entre áreas de tierra y agua. En este caso las características de las bandas infrarrojas del satélite Landsat se aprovecharon para delinear los cuerpos de agua.

Las bandas del infrarrojo difieren en el rango espectral de acuerdo al tipo de sensor utilizado, es por eso que las imágenes adquiridas por el sensor MSS se utilizó la banda 7 (0.80-1.10 μm) y las adquiridas por el sensor TM se utilizó la banda 5 (1.55-1.75 μm). Las zonas # 1, 3, 4 y 8 presentaron dificultades al mostrar las zonas inundadas, en estos casos la banda infrarroja no solo mostraba los cuerpos de agua, sino también aquella vegetación que se encontraba muy húmeda. Para resolver este problema se optó por utilizar las bandas 6 (sensor MSS) ó 4 (sensor TM) para diferenciar estas coberturas (ver anexo 1).

De acuerdo con los diversos autores citados en el apartado 2.4.9, las imágenes satelitales han sido eficazmente utilizadas en el estudio de diversos ecosistemas, aplicando los diferentes métodos de análisis que la percepción remota ofrece. En este caso la aplicación del índice de vegetación (NDVI) a las imágenes satelitales fue de gran utilidad para poder discriminar en función de los valores que adopta, entre las áreas vegetadas de las no vegetadas de cada una de las zonas de analizadas.

La selección de un umbral fijo para los valores de NDVI que representan una cobertura vegetal sana, se fundamenta en evitar realizar ajustes en los umbrales respectivos para cada una de las imágenes, que acomodarían la capacidad discriminatoria entre áreas vegetadas y desnudas de los sensores entre sí (Navarro et al., 2006). Las imágenes adquiridas fueron posteriores a las temporadas de lluvias, deshielos y en el mismo mes o meses cercanos, por lo que se consideró la utilización de un umbral fijo para poder evaluar los cambios sin ajustar la capacidad discriminatoria de las imágenes. Con esto fue posible comparar los cambios en las áreas cubiertas por vegetación a través de los años. Sin embargo, como se mencionó en el capítulo 5, al escoger un umbral fijo para todas las zonas de estudio, ocasionó que para las zonas 8 y 9; por ser zonas más áridas, y de menor flujo volumétrico, este valor de NDVI no abarcó toda la vegetación presente en los humedales, que es la vegetación rala y de bajo vigor. Por lo que las áreas de la vegetación de los humedales de las dos últimas zonas pueden ser más grandes que las que se contabilizaron.

Cambios hidrológicos y de vegetación en la Cuenca Alta y Baja

Cuenca Alta

Las zonas 1, 2 y 3 pertenecen a la Cuenca Alta del río Colorado. Estas tres zonas se encuentran en el estado de Utah. La zona 1 y 2, por su cercanía comparten el mismo Path/Row (39/33 MSS y 36/33 TM). En ambas zonas se excluyó del análisis la imagen correspondiente al año de 1982, debido al considerable nivel de ruido que contenía la imagen. Además se utilizó el mismo registro de la estación de flujo 09-163500 para el análisis del flujo volumétrico anual en la zona 1 y 2, debido a que entre estas zonas no se encuentra otra estación medidora de flujo.

Los resultados del análisis multitemporal del área de cuerpos de agua, del área de cubierta vegetal y del flujo volumétrico promedio anual en la zona 1, indican que las alteraciones de estas variables durante el periodo analizado se deben a los factores de corto plazo, principalmente, a los fenómenos meteorológicos (periodos de sequía o lluvias), ya que ninguna de las variables presentó una tendencia clara, sino variaciones irregulares.

En la zona 2 y 3 las variables del área de cuerpos de agua y del flujo volumétrico promedio anual, tampoco presentaron tendencia clara, sino variaciones irregulares en respuesta a los fenómenos meteorológicos. Sin embargo, en ambas zonas, el análisis multitemporal del área de la cubierta vegetal indicó la presencia de una clara tendencia lineal descendente en el periodo analizado, sin que las otras variables analizadas las presentaran. El área de la cubierta vegetal de los humedales se redujo en un 13 % para la zona 2, mientras que la zona 3 presentó una reducción del 28 %. Las tendencias observadas se deben a la pérdida gradual de la vegetación causada por diversos factores. En el caso de la zona 2, el factor que causa la pérdida gradual de la cubierta vegetal no es del todo claro. Mientras en la zona 3 se debe al crecimiento de la población hacia el humedal. Es importante mencionar, que la variable del área de cubierta vegetal en las zonas 2 y 3 también presentó variaciones irregulares en respuesta a factores de corto plazo, como fenómenos meteorológicos, incendio (zona 3) y el crecimiento acelerado de la población (zona 3).

Es importante mencionar, que en las tres zonas se ha observado los cambios de uso de suelo, donde la vegetación nativa ha sido reemplazada por campos agrícolas (zonas 1 y 2) y por edificaciones o zonas recreativas (zona 3). Los campos agrícolas ubicados en las zonas 1 y 2, no han persistido durante todo el periodo analizado, sino unas temporadas muy cortas, e incluso en el caso de los campos agrícolas en la parte central de la zona 1, estos sólo aparecieron en el último año del análisis (2011; los campos también fueron observados en la imagen en falso color infrarrojo del año 2009, sin embargo este año no está incluido en el análisis multitemporal). Por lo tanto, la influencia de este cambio de uso suelo, no es tan evidente.

Con el aumento o la disminución del flujo volumétrico, se esperaría el incremento o decremento, respectivamente, de la aportación de agua a la zona, por lo que también se esperaría la ampliación o la declinación del área de los cuerpos de agua y de la cubierta vegetal de los humedales. Eventualmente debería existir una correlación lineal positiva alta entre las tres variables analizadas: flujo volumétrico promedio anual, área de la cubierta vegetal y área de los cuerpos de agua. Sin embargo, algunas actividades antropogénicas pueden cambiar esta relación lineal. La transformación de los suelos de los humedales a campos agrícolas, por ejemplo, lleva a una disminución del área de la cubierta vegetal de los humedales y eventualmente también a un decremento del área de los cuerpos de agua debido al agua utilizada para otros usos, aunque el flujo volumétrico del río aumente. En este trabajo de tesis, se observó que las condiciones del cauce principal del río (canalizado y no canalizado), así como los usos de suelo entre la zona de estudio y la localización de la estación de medición de flujo, tienen influencia importante en los resultados de la correlación lineal entre las variables.

En el caso de las zonas analizadas pertenecientes a la Cuenca Alta, la correlación lineal positiva alta (0.8) solo se observó entre las variables del flujo volumétrico promedio anual y el área de los cuerpos de agua (Tabla 18). Para otros casos analizados la correlación lineal resultó ser baja y/o nula, con valores positivos y negativos, por causa de diversos factores naturales, antropogénicos y errores de estimación de áreas (Tabla 18).

Es importante mencionar, que la zona 3 cuenta con un humedal en conservación ("The Matheson Wetlands Preserve"), sin embargo, a pesar de sus valores naturales y biológicos, el área del humedal sigue una tendencia decreciente.

Tabla 18. Correlación lin eal entre el área de cuerpos de agua, el área de cubierta vegetal vegetación y el flujo volumétrico promedio anual de las zonas 1, 2 y 3 en los 40 años (1972 –2011) analizados.

Zonas	1		2		3	
r_{xy}	Flujo volumétrico promedio anual	Área de cuerpos de agua	Flujo volumétrico promedio anual	Área de cuerpos de agua	Flujo volumétrico promedio anual	Área de cuerpos de agua
Área de cuerpos de agua	0.20	-	-0.43	-	0.80	-
Área de vegetación	0.40	0.38	0.48	0.06	0.03	0.24
Distancia estación - zona (km)	17		30		50	

Cuenca Baja

Las zonas 4 - 9 pertenecen a la Cuenca Baja del río Colorado, se encuentran ubicadas en los estados de Arizona y California, EUA y Baja California y Sonora, México. De las 6 zonas, 3 de ellas (zonas 4, 6 y 7) forman parte de refugios o áreas de vida silvestre, y por lo tanto son áreas protegidas, creadas para mantener las condiciones ambientales óptimas para la conservación de su estado natural. La zona 5 forma parte de una reserva indígena. Y la zona 9 es un sitio Ramsar, el cual está protegido debido a su gran importancia ecológica y biológica. De las 6 zonas analizadas de la Cuenca Baja del río Colorado, 5 de ellas (zonas 4, 6-9), cuentan con un sitio de restauración de humedales, de diferentes áreas y estrategias de restauración.

La conservación de las condiciones ambientales óptimas para la existencia de un área humedal depende, en gran medida, de la contribución de agua que llega a esta zona. La aportación de agua del río Colorado a cada una de las zonas estudiadas depende de las modificaciones y redistribuciones de sus aguas para diferentes usos, que ocurren río arriba.

En general, el flujo volumétrico promedio anual medido a lo largo del cauce principal del río Colorado, cercanas a las zonas de estudio en la Cuenca Baja, y durante el periodo analizado, tienen respuestas importantes a los eventos meteorológicos. Sin embargo, cabe destacar, que existen variaciones importantes en la Cuenca Alta debido a los periodos de lluvias y deshielos extraordinarios así como a las sequias prolongadas. Mientras que en las zonas pertenecientes a la Cuenca Baja las respuestas más importantes se deben a los periodos de lluvias y deshielos extraordinarios, en contraste con los periodos de sequías prolongadas, las cuales son muy bajas o, incluso, nulas. Lo que indica el estado de escasez de agua que está teniendo el río en su Cuenca Baja.

En las zonas 7 y 9 el flujo volumétrico promedio anual presentó una tendencia descendente durante el periodo analizado, aunque en la zona 7 esta tendencia no estuvo tan clara, debido a los efectos de los eventos meteorológicos extraordinarios que la disimularon. En la zona 7, entre los años de 1972 y 2011, el flujo volumétrico promedio anual disminuyó cerca de un 17 % (30.7 m^3/s), mientras que en la zona 9; para los años 2007 y 2011 el registro del flujo volumétrico se encuentra bajo revisión por lo que se muestran valores nulos para estos años. En la zona 8, el flujo volumétrico promedio anual presentó una tendencia ascendente, con un aumento de ~33 % en 40 años (7.8 m^3/s). A pesar del porcentaje de incremento, es importante resaltar que los valores del flujo volumétrico registrados son muy bajos, comparados con las estaciones de medición río arriba. Además, la estación de medición de flujo, que se tomó en cuenta, se encuentra a 10 km río arriba de la zona 8 y al norte de la presa Morelos, que distribuye el agua a la parte mexicana de la cuenca del río Colorado, y por lo tanto, a las zonas 8 y 9. Por lo que este registro del flujo volumétrico promedio anual no refleja la verdadera aportación del agua por el río Colorado a la zona 8.

El análisis multitemporal del área de los cuerpos de agua reveló que en 3 zonas (zonas 4, 5 y 7), el área de los cuerpos de agua tuvo una tendencia lineal descendente. En la zona 4, a pesar de ser una zona donde se regula la entrada y salida del agua hacia el lago y el área de los humedales con el objetivo de mantener sus condiciones hídricas para la preservación de los humedales, el área de los cuerpos de agua se redujo un ~8.7 % (140 ha) en los 40 años analizados. El área de los cuerpos de agua de la zona 5 presentó una reducción del ~26 % (101 ha) en 40 años. En la zona 7, los cuerpos de

agua presentan dos tendencias lineales con pendientes similares, interrumpidas por un incremento considerable que coincide con el periodo de lluvias y deshielos extraordinarios de 1983 - 1989. A pesar de estos eventos extraordinarios, la gráfica no muestra una disminución gradual continua del área de los cuerpos de agua, los resultados del análisis indican que en la zona 7 existen factores que causan la disminución gradual de las áreas de los cuerpos de agua durante todo el periodo analizado (1972 - 2011). En la zonas 6 y 9 el área de los cuerpos de agua no presentó disminución gradual, sino variaciones irregulares. Los fenómenos meteorológicos, la presencia o la ausencia de la vegetación acuática, así como errores de identificación de los cuerpos de agua debido al tamaño de pixel y tamaño (ancho y profundidad) de algunos cuerpos de agua pueden ser algunos de los factores de las variaciones observadas. En la zona 9 la acción de las mareas del Golfo de California, hacia el Delta y la construcción de la estructura conocida como "El Tapón" influenciaron en las variaciones del área de los cuerpos de agua, junto con otros factores ya mencionados. En la zona 8, en el periodo de 1972 - 1987 el área de los cuerpos de agua tuvieron un considerable incremento (~240 %, 243.5 ha). Dicho incremento es continuo más no lineal (diferente velocidad de incremento). No se pudo explicar dicho incremento en las áreas del agua superficial con la información que se tuvo disponible para este trabajo de tesis. Para el siguiente año de muestreo (1992) el área de cuerpos de agua se redujo un ~78 % (267.16 ha). Dicha disminución concuerda con el periodo de sequía. A partir de este año, el área de los cuerpos de agua se mantuvo prácticamente constante, sin importantes variaciones.

Los factores que influenciaron en las variaciones observadas del área de cubierta vegetal en las zonas seleccionadas, es más amplio que para las otras dos variables analizadas. Lo que provoca que las gráficas de series de tiempo del área de cubierta vegetal tenga patrones más complejos. En el caso de la zona 5, dichas variaciones no pudieron ser explicadas con la información analizada y disponible para este trabajo de tesis. Además, los errores causados al utilizar un umbral de NDVI alto para algunas zonas (zona 8 y 9) y/o las imágenes adicionaron errores (p. ej. zona 6, año 1972). En general, las variaciones a corto plazo se debieron a los eventos meteorológicos, incendios (zona 6), así como la acción de las mareas que se observan en la zona 9, donde estas crearon nuevos cuerpos de agua o aumentaron el área de los ya

existentes, cubriendo con agua áreas con vegetación. La baja calidad del agua que llegaba la zona 4 en la década de los 70's, también fue un factor a mencionar. El mejoramiento de la calidad del agua entre los años 1972 y 1982 provocó el incremento gradual del área de cubierta vegetal en la zona. A pesar de esto, a partir de 1982, el área de cubierta vegetal presentó una clara tendencia gradual descendente con una reducción del ~31 % (1,576.4 ha) de su área vegetal en 30 años. En la zona 6, el área de cubierta vegetal no presentó una tendencia lineal definida, sin embargo vale la pena destacar, que un incendio, ocurrido en el año 2006, causó la reducción del ~37 % (1,721 ha) de la vegetación. En la zona 7, el área cubierta vegetal se redujo un ~28.6% (515 ha) entre 1972 y 2011, a pesar de que presentó una tendencia ascendente en el periodo de 1972-2002 con el incremento de ~19.5 % (335.7 ha). En la zona 8, el área de cubierta vegetal no tuvo una tendencia lineal definida, sino variaciones irregulares los cuales, por lo general, coincidieron con los eventos meteorológicos. En la zona 9, el área de cubierta vegetal presentó una tendencia lineal decreciente entre los años de 1987 y 2011 con una reducción del área en un ~ 58 % (6,278 ha). Al inicio (1972) y final (2011) del periodo analizado, el área de cubierta vegetal se redujo un ~45% (2,773 ha).

La correlación lineal entre las variables analizadas de las 6 zonas pertenecientes a la Cuenca Baja del río Colorado, en general, varían entre baja y nula, presentando valores tanto positivos como negativos (Tablas 19 y 20). Hecho que se debe a que cada variable tiene varios factores que influyen al comportamiento de su serie de tiempo, y dichos factores no son iguales o no se reflejan de igual manera en las variables restantes. Como ya ha sido mencionado, la distancia entre la estación de medición de flujo y la zona de estudio, las condiciones del cauce principal del río, así como los usos de suelo a lo largo de esta distancia, tienen influencia importante a los resultados de la correlación lineal entre el flujo volumétrico promedio anual y las áreas de los cuerpos de agua y de cubierta vegetal. La excepción es la correlación lineal alta (0.71) y moderada (0.50) positiva entre el flujo volumétrico promedio anual y el área de los cuerpos de agua y de cubierta vegetal en la zona 7 (Tabla 20), lo que indica que el recurso hídrico es el principal factor que controla las variaciones del estado del humedal en esta zona. Es importante mencionar que la estación de medición de flujo volumétrico se encuentra dentro de la zona 7. También se obtuvo la correlación positiva alta (0.71) entre el flujo volumétrico promedio anual y el área de cubierta vegetal en la zona 9, y la correlación

lineal positiva moderada (0.57) entre las áreas de cuerpos de agua y de vegetación en la zona 4 (Tabla 19).

Tabla 19. Correlación lineal entre el área de cuerpos de agua, el área de cubierta vegetal y el flujo volumétrico promedio anual de las zonas 4, 5 y 6 en los 40 años (1972 –2011) analizados.

Zonas	4		5		6	
r_{xy}	Flujo volumétrico promedio anual	Área de cuerpos de agua	Flujo volumétrico promedio anual	Área de cuerpos de agua	Flujo volumétrico promedio anual	Área de cuerpos de agua
Área de cuerpos de agua	0.21	-	-0.006	-	0.22	-
Área de vegetació n	0.14	0.57	-0.36	0.21	0.30	-0.04
Distancia estación - zona (km)	50		46		60	

Tabla 20. Correlación de las áreas de cuerpos de agua, el área de cubierta vegetal y el flujo volumétrico promedio anual de las zonas 7, 8 y 9 en los 40 años (1972 –2011) analizados.

Zonas	7		8		9	
r_{xy}	Flujo volumétrico promedio anual	Área de cuerpos de agua	Flujo volumétrico promedio anual	Área de cuerpos de agua	Flujo volumétrico promedio anual	Área de cuerpos de agua
Área de cuerpos de agua	0.71	-	0.42	-	0.21	-
Área de vegetación	0.50	0.	0.39	0.	0.71	-0.08
Distancia estación - zona (km)	0		10		32	

En la tabla 21, para cada zona de estudio, se muestra una comparación entre el área de cubierta vegetal del humedal estimada por este trabajo para el año 2011 y el área reportada por el INH de EUA y México. Es importante notar que las área reportadas por el INH de EUA y México se obtuvieron descargando los archivos shape (.shp) con los polígonos de las zonas que cada uno de los inventarios (U.S. Fish and Wildlife Service, CONAGA e INEGI) clasifica como humedal y calculando las áreas de dichos polígonos, usando las herramientas del paquete ArcMap.

De la Tabla 21, se puede notar que para las zonas de la Cuenca Alta del río Colorado (zonas 1 - 3), las áreas de cubierta vegetal obtenidas en este trabajo de tesis son muy

por encima de los reportados por el INH de los EUA. Dichas diferencias pueden atribuirse a los diferentes métodos empleados, ya que en el INH de los EU; además de las imágenes satelitales, también se realizan reconocimiento en los sitios, lo que permite diferenciar y delimitar las áreas del humedal de la mejor manera. Es importante hacer notar, que las zonas de estudio en la Cuenca Alta se encuentran en zonas con vegetación abundante, representada, principalmente por bosques de pinos y enebros, dicha vegetación puede pertenecer o no al área de humedal, sin embargo en este trabajo de tesis no se realizó la clasificación de tipos de vegetación, sino se consideró toda la vegetación natural.

La Cuenca Baja del río Colorado se encuentra en una zona desértica, donde la vegetación natural no perteneciente al humedal es escasa o nula, por lo que en las zonas 4-7 se obtuvieron los valores del área de cubierta vegetal similares y comparables con los reportados por el INH de los EUA, a pesar de la diferencia de los métodos utilizados.

Para las zonas 4 y 5 los valores estimados por este trabajo de tesis son mayores que los reportados por el INH de los EUA. Existe una diferencia de 3 años (2011 - 2014) entre valores estimados y reportados que se están comparando. Por lo tanto, en el caso de la zona 4, se puede concluir que el área de cubierta vegetal de los humedales sigue disminuyendo, a pesar de contar con un sitio de restauración. En la zona 5, el área de cubierta vegetal no presentó tendencia clara en el periodo analizado, sin embargo podemos concluir que entre 2011 - 2014 el área de cubierta vegetal disminuyó.

Para las zonas 6 y 7 las área apreciadas por este trabajo de tesis son menores que las reportadas por el INH de los EUA, lo que indica el incremento del área de cubierta vegetal en el periodo 2011 - 2014. En el caso de la zona 6, este incremento quizá se deba a los trabajos de reforestación de la zona después del incendio del 2006, y a los trabajos de restauración del humedal en el sitio "Hart Mine Marsh". En la zona 7, donde el área de cubierta vegetal tuvo un decremento importante (lineal y gradual) en el periodo 2002 - 2011, los resultados de comparación indican el restablecimiento de la vegetación, que se debe, probablemente, a los efectos positivos de la restauración del humedal en el área "Laguna Division", que inició en noviembre del 2011.

En la zona 8, tanto el INH de los EUA (2014), como la CONAGUA (2012), reportan el área del humedal más alta que la estimada en este trabajo de tesis. Hecho que se debe al uso de un umbral demasiado alto para detectar y vectorizar las áreas de cubierta vegetal para esta zona, donde la vegetación es escasa y poco rigorosa.

Y por último en la zona 9, de acuerdo con la CONAGUA (2012) y el INEGI (2012), las áreas obtenidas difieren mucho en cuanto a los resultados obtenidos en el presente trabajo (Figura 58). Esto se debe a que tanto la CONAGUA como el INEGI consideran como humedales otras zonas, que según este trabajo desde hace 40 años, ya no son zonas de inundación, como es el caso de la Laguna Salada (INEGI) o las zonas inundadas por el mar debido al ciclo del nodo lunar de la Tierra, que provoca un aumento en el nivel medio del mar, causando inundaciones cada 18.6 años aproximadamente (Bidart-Jiménez, 1992). Además, la CONAGUA e INEGI no consideran el corredor ripario como humedales y que en la actualidad es un sitio en restauración muy importante para la región.

En resumen, el 66 % de las zonas estudiadas presentaron una pérdida del área de cubierta vegetal y 33 % presentaron una disminución del área de los cuerpos de agua durante el periodo analizado (1972-2011).

Se presenta un anexo fotográfico con las fotografías recopiladas a lo largo de la revisión bibliográfica que sustenta este trabajo, y que se considera pertinente incluirlas como acervo cultural de la región estudiada.

Tabla 21. Área de los humedales del presente trabajo y del INH que se reporta en EUA y en México .

Zona	Nombre	Resultado del trabajo 2011	Inventario Nacion al de Humedales 2014
1	Ruby Canyon, Utah, EUA	358.1 ha	El INH de los EUA reporta : 78 ha
2	Cisco, Utah, EUA	243.8 ha	El INH de los EUA reporta:14 ha
3	Moab, Utah, EUA	372.3 ha	El INH de los EUA reporta: 149 ha
4	Topock Marsh, Arizona, EUA	3,343 ha	El INH de los EUA reporta: 2,174
5	Lost Lake, California, EUA	1,427 ha	El INH de los EUA reporta: 906 ha
6	Refugio nacional de vida silvestre Cíbola, Arizona y California, EUA	2,940 ha	El INH de los EUA reporta: 3,654 ha
7	Mittry Lake, Arizona, EUA	1,283 ha	El INH de los EUA reporta: 1,726 ha
8	Tramo limítrofe del río Colorado, EUA-México	594.4 ha	El INH de los EUA reporta: 787 ha En 2012 CONAGUA reporta: 674 ha
9	Río Colorado en México	3,390 ha	En 2012 CONAGUA reporta: 54,984 ha. El INEGI reporta 350,000 ha (con la Laguna Salada) * Ni CONAGUA ni INEGI consideran como humedal el corredor ripario

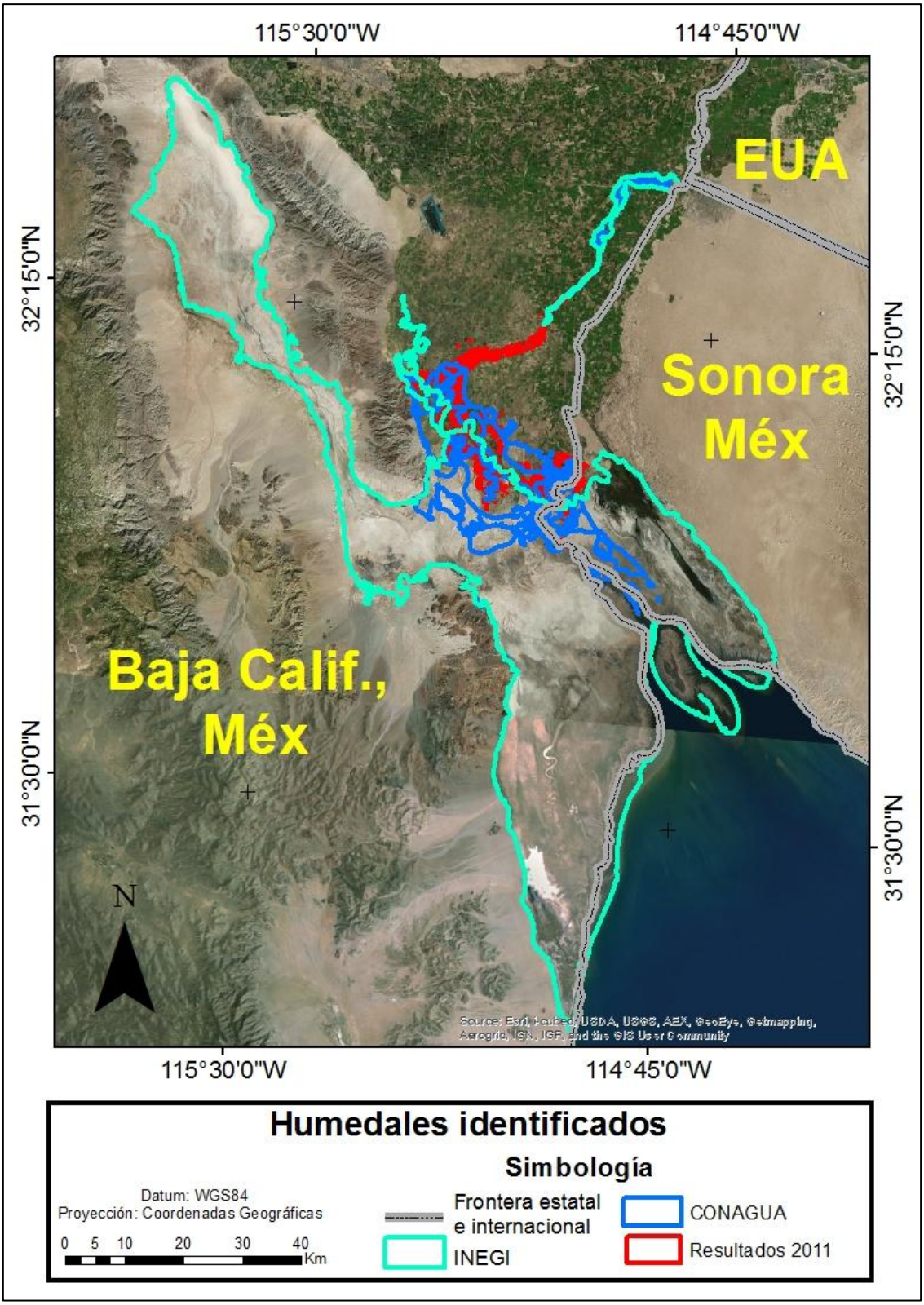


Figura 58. Mapa de comparación de las áreas clasificadas como humedales por parte de INEGI y CONAGUA, con el área obtenida en el presente trabajo.

7. Manejo binacional de la cuenca

Las actividades que se realizan en la Cuenca Alta del río Colorado, indiscutiblemente afectan; no sólo el volumen hídrico, sino a todo lo que abarca la cuenca hidrográfica: el agua superficial y subterránea, el suelo, la vegetación, los animales, etc.

7.1. Generalidades

El río Colorado es la principal fuente de agua para la región desértica del suroeste de los EUA y noroeste de México. El reparto del agua comenzó a finales de la segunda década del siglo XX y se ha ido modificando según los distintos tratados que se han elaborado.

El primer tratado se firmó en el año de 1944, donde no se reconoce al ambiente como un usuario de las aguas internacionales reguladas por la IBWC (Comisión Internacional de Límites y Aguas, por sus siglas en inglés).

El primer reconocimiento formal de las necesidades y valores de los hábitats naturales y del ambiente en el Delta del río Colorado fue posible con la firma del Acuerdo 306 en el año 2000 (IBWC, 2000), un acuerdo conceptual que estableció un grupo de trabajo para asesorar a la IBWC respecto a la importancia de la restauración ecológica y las necesidades ambientales.

En México, en el año 2008, se declararon 86 áreas de humedales de importancia internacional, bajo la convención Ramsar (Ramsar Convention Secretariat, 2009), donde el 18 % pertenecen a zonas áridas y semiáridas en el norte del país, ver la figura 59 (CONAGUA, 2008). Estas áreas de humedales se consideran protegidas, sin embargo, el suministro de agua a estos ecosistemas no lo está. En las regiones áridas el agua disponible se limita a fugas accidentales de agua, lluvias esporádicas y flujos sub-superficiales.

Es importante resaltar que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) es la responsable de administrar y proteger el agua en México, incluyendo con esto, a los humedales. Sin embargo, el orden de prioridad, según la Ley de Aguas Nacionales, coloca a los usos ambientales y conservación ecológica en 5º lugar, después de los

usos domésticos, municipales, ganaderos y agrícolas (CONAGUA, 2004). En los EUA, los derechos sobre el agua pertenecen a los usuarios, dando prioridad a la primera persona que usará el agua para un uso benéfico (doméstico, industrial o agrícola). Por ejemplo en el río Colorado, la regla de apropiación determina qué usuario tiene prioridad en las entregas de agua; en virtud de su escasez.

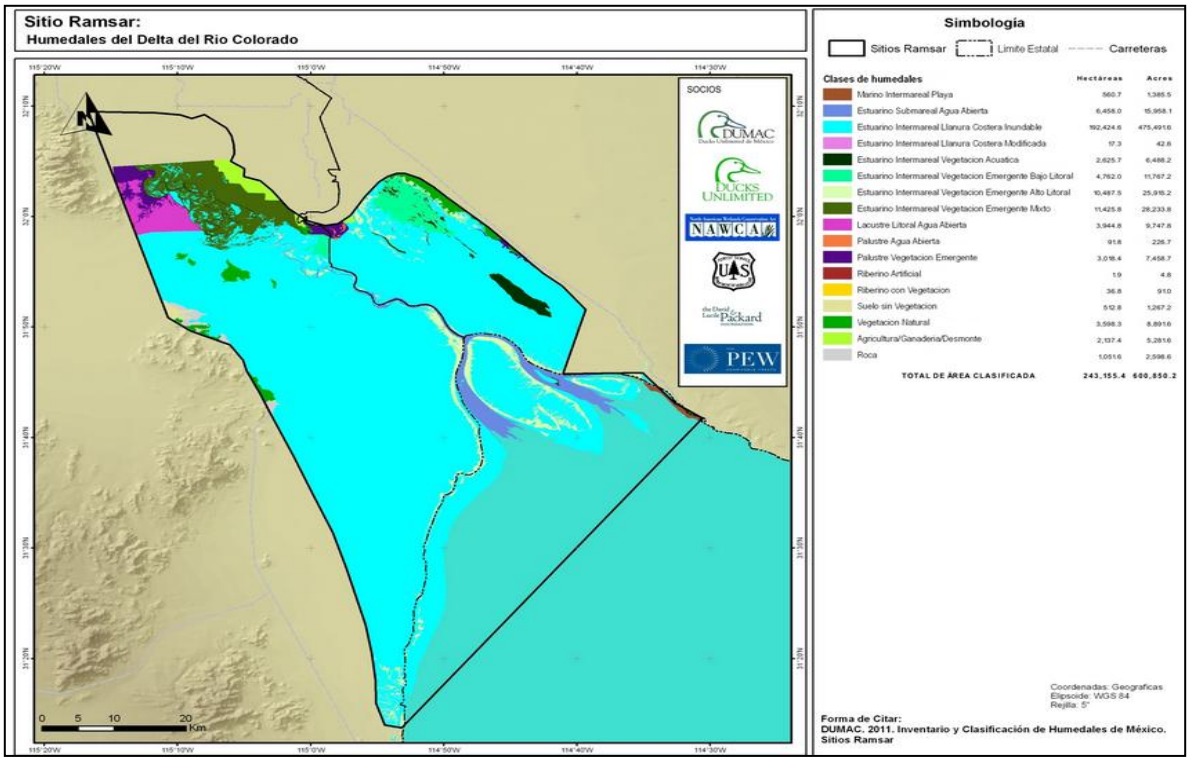


Figura 59. Humedales del río Colorado en México que son considerados sitios Ramsar.

El Canal Todo Americano (All American Canal, en inglés), atraviesa íntegramente por el territorio norteamericano (Figura 60), empieza en la presa Imperial, tiene una longitud total de 132 km, y transporta agua (~3,200 Mm^3 al año,) a los Valles de Imperial y Coachella (Anguiano, 1995; Contreras, S.F.). En el año 2009 se dio un suceso importante que fue el revestimiento de este canal, que desde el año 2006 se gestionó y, a pesar de la oposición del Gobierno Mexicano, finalmente se realizó. En EUA, esta obra civil se considera una maravilla de la ingeniería hidrológica y agrícola, ya que cambió una zona desértica en una de las regiones más productivas del mundo (Perry, 2009). Sin embargo, en México, el revestimiento de dicho canal afectó directamente la recarga del acuífero que abastecía al Valle de Mexicali y cuya agua es utilizada en la

agricultura y usos domésticos. Con este suceso se evita una infiltración de agua de 113 Mm^3 al año; cantidad que a su vez el Gobierno Norteamericano recuperó, para abastecer las costas del pacífico que manifestaban problemas de escasez de agua (Sosa y Sánchez, 2007).

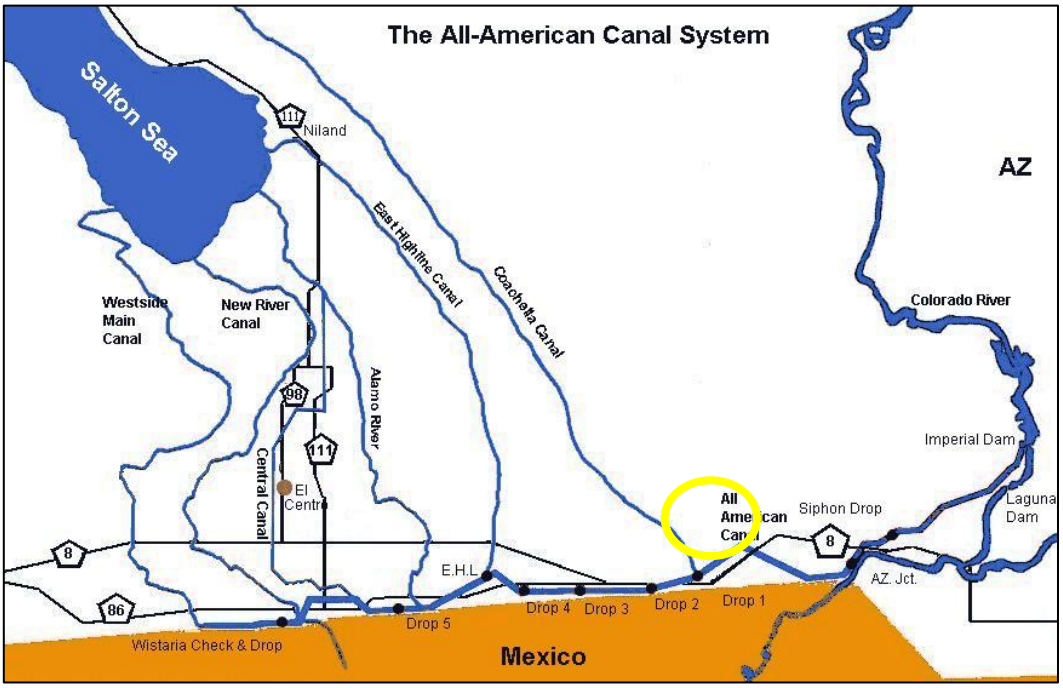


Figura 60. Ubicación geográfica del Canal Todo A mericano (delineado en color azul con puntos negros) , el revestimiento de este canal evita la infiltración de agua hacía territorio mexicano. Imagen tomada de: http://fishingnetwork.net/socal/allamermap.htm

En el año 2010 con el Acuerdo 316 (IBWC, 2010a), se autorizó el primer uso de aguas transfronterizas con fines ambientales durante una operación de prueba de una planta desalinizadora de los EUA (Garrick y Bark, 2011). El agua fue entregada a la Ciénaga de Santa Clara para reemplazar el agua desviada a la planta desalinizadora.

Ese mismo año, con el Acuerdo 317 (IBWC, 2010b) se estableció un Consejo Consultivo que considera el agua para fines ambientales y de manera importante, un marco conceptual para las acciones de cooperación entre ambos países.

Los acuerdos anteriores fueron el principio del Acuerdo 319, firmado en noviembre de 2012 (IBWC, 2012) y que es un acuerdo integral que detalla como México compartirá

en cualquier escasez y excedentes futuros, el agua del río Colorado, así como un conjunto de acuerdos temporales que:

(a) Estipulan el apoyo financiero para la mejora de la infraestructura de riego en México a cambio de agua.
(b) Asignan un almacén de reserva a México en el Lago Mead, en EUA.
(c) Permiten a México utilizar parte de su agua almacenada en el Lago Mead para un flujo de pulsos destinados a beneficiar las condiciones hidrológicas y ambientales en el Delta del río Colorado (Gerlak, Zamora-Arroyo y Kahler, 2013).

Es importante señalar que el flujo pulso se compone, en su totalidad, de agua asignada a México. Dicha agua fue almacenada en el Lago Mead, así como lo estipula el Acuerdo 318 (IBWC, 2010c) que permite a México almacenar agua en los EUA, debido a que, la infraestructura hidráulica del Valle de Mexicali estaba muy dañada y no podía recibir el agua después del sismo del 4 de abril de 2010 de $Mw = 7.2$, localizado a 60 km al sureste de Mexicali, Baja California, México.

El flujo pulso que, de acuerdo al Acuerdo 319, fue liberado en los meses de marzo y mayo de 2014, aportó una cantidad de 130 Mm^3 de agua a la parte mexicana de la cuenca del río Colorado. Sin embargo, esta cantidad de agua es inferior a la de 320 Mm^3 que se necesita para sostener el actual corredor ripario, de acuerdo a las estimaciones de Zamora-Arrollo et al., (2005). Es importante notar, que incluso, este valor estimado es muy inferior a la cantidad de agua que llegaba al Delta del río Colorado en la primavera, antes de la construcción de las presas y desvíos, el flujo del río era de más de 15,000 Mm^3/año (Lavín y Sánchez, 1999).

El Acuerdo 319 estará vigente hasta diciembre de 2017, y existen planes de su renovación. La renovación del dicho acuerdo dependerá del éxito de muchos componentes de inter-bloqueo del mismo acuerdo, incluyendo la provisión de agua al ambiente, la cantidad de agua, la inversión en infraestructura y la capacidad de almacenar el agua.

7.2. Cambios h idrológicos

Aunque oficialmente la regulación y distribución del agua del río Colorado se ha dado desde 1944, anteriormente EUA comenzó a retener el agua en las presas que fueron construidas desde 1903 hasta 1980. Desafortunadamente, con el uso de imágenes satelitales, sólo se pueden evaluar los cambios hidrológicos y de vegetación a partir de los años 70's. El lanzamiento de los satélites de la constelación Landsat, con el primer satélite lanzado en el 1972, se abrió la posibilidad de evaluar dichos cambios en un periodo de 40 años.

De acuerdo a los resultados obtenidos del análisis de las imágenes satelitales obtenidas en intervalos de 5 años desde 1972 al 2011, en la parte mexicana, la principal amenaza para los ecosistemas del Delta del río Colorado es la ausencia de los flujos de agua dulce, los cuales han ido disminuyendo conforme el consumo de agua río arriba aumentaba.

En 1972, 1977 y 1982, muy poca agua bajó del río Colorado, sin embargo, el río Hardy y los flujos de drenaje agrícola aportaron agua a la región conocida como "El Riñón" y la región sureste, sin haber conexión entre el río y el Golfo de California. En 1987 se presentó un cambio muy grande, ya que en el cauce principal del Colorado transportó gran cantidad de agua. Sin embargo, el agua que fue aportada al Delta por el río no se acumuló en la zona sureste de El Riñón, sino en la región noroeste con respecto a este. En este mismo año si se presentó la conexión del río con el Golfo de California. Este escenario corresponde a las intensas lluvias de junio 1983 y mayo 1984 que causaron inundaciones en la Cuenca Alta del río Colorado, lo que provocó que se abrieran las compuertas de las presas Hoover y Glen Canyon (United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, 1990). Es importante mencionar que en las zonas de estudio, localizadas arriba de las presas mencionadas (zona 1: Ruby Canyon, zona 2: Cisco, y zona 3: Moab, Utah, EUA), no se observan importantes cambios hidrológicos, mientras que en la Cuenca Baja del río Colorado, sobretodo en la parte mexicana, los cambios son notables, aunque la imagen es de 3 años después del suceso. Además se observa una importante transportación de sedimentos por las aguas del río Colorado.

En 1992, a pesar de que el cauce principal del río Colorado y el río Hardy llevan agua, no se detectaron cuerpos de agua en la zona cercana a El Riñón, como se habían observado en las imágenes anteriores (1972 - 1982). En este mismo año un evento mareal causó que el agua de mar inundara la parte inferior del Delta, sin existir conexión con las corrientes de agua dulce. En 1997 y 2002 se observa una conexión entre agua de mar y agua dulce y se formaron cuerpos de agua en la zona noroeste con respecto a El Riñón. Y el cauce principal del río Colorado lleva agua. En el 2007 se perdió la conexión entre el mar y el agua de los ríos, aparece un cuerpo de agua en la parte sureste, pero no es la misma posición de los cuerpos de agua observados en 1972-1982 y los cuerpos de agua del noroeste de El Riñón ya no se identifican. Finalmente en el 2011, se encontraron cuerpos de agua al sureste de El Riñón, que corresponden al agua del Golfo de California, que incluso pudo haber llegado hasta El Riñón, pero el cauce del río Colorado casi no lleva agua.

Estos cambios hidrológicos demuestran que la zona de inundación al sureste de El Riñón se ha visto afectada de manera significativa desde 1982, la parte noroeste de El Riñón ha sido inundada a partir de 1987, aunque en menor cantidad que la parte sureste, lo que compromete la existencia de los humedales.

7.3. Cambios en la Vegetac ión

A pesar de todas las negociaciones que se han hecho con el gobierno de los EUA, lo que es una realidad es que la zona de humedales en el Delta del río Colorado se ha visto afectada de gran manera. La CONAGUA define un área de humedales de 56, 636 ha en el Delta del río Colorado, sin considerar a la Laguna Salada, ni las Ciénagas del Indiviso-Indio y Santa Clara (http://sigagis.conagua.gob.mx/Humedales/) y el INEGI delimita un área de humedales de 350,000 ha, incluyendo la Laguna Salada (http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/humedales/informacionhumedales.aspx)

En este trabajo, al considerar que la definición de humedal debe cumplir con 3 elementos esenciales que son: agua, vegetación y suelo; las áreas calculadas con base en el NDVI fijo y a los cambios hidrológicos se obtienen áreas muy por debajo de lo que reporta CONAGUA e INEGI. Incluso cuando los eventos extraordinarios de inundación (1987) o de mareas del Golfo de California (2011) han permitido un incremento en el

agua superficial de la zona. Cabe resaltar que aunque en este trabajo no se está considerando a la Ciénaga de Santa Clara ni al humedal del Indio-Indiviso, ni tampoco a la Ciénaga El Doctor, por no estar directamente relacionados con las aguas del cauce principal del río Colorado, al descartar éstas áreas del total de humedales calculados por la CONAGUA y el INEGI, aun así siguen estando muy por encima de lo calculado en este trabajo. Incluso en un trabajo hecho por Carrillo-Guerrero, Glenn e Hinojosa-Huerta en el 2013, las áreas de humedales que ellos reportan de la zona (36,377 ha) siguen estando por debajo de lo que CONAGUA e INEGI reportan. Los autores de dicho trabajo también estiman que el corredor ripario consta de un área de 11,000 ha, cuando en este trabajo el área máxima de humedales de la zona fue de 12,410 ha (1987), considerando toda la zona de humedales directamente relacionada con el cauce principal del río Colorado.

En contraste, las áreas calculadas en las zonas de estudio elegidas del lado estadounidense pueden ser comparadas y son del mismo rango que las reportadas por el INH del U.S Fish and Wildlife Service (2014), excepto de las zonas ubicadas en la Cuenca Alta del río Colorado, donde en este trabajo se obtuvieron áreas significativamente mayores. Debido a que estas zonas se encuentran en las áreas boscosas y a que en el presente trabajo se delimitó como zonas de humedales a toda aquella vegetación cercana al cauce del río, mientras que el U.S Fish and Wildlife Service, además de utilizar imágenes satelitales, realizó trabajos de campo para delimitar las áreas de los humedales con mayor precisión.

Esto demuestra que es de gran importancia tener un criterio unificado en la determinación de áreas de humedales en ambos países, lo que facilitará la toma de decisiones de un manejo binacional del agua.

8. Conclusiones

1. La combinación en falso color (RGB 4/3/2 TM) realza las masas vegetales en tonos rojos y el agua en color negro, esta combinación permitió identificar visualmente los cambios hidrológicos y de cobertura vegetal que se presentaron entre las imágenes Landsat 5 TM obtenidas en dos décadas diferentes.
2. La banda infrarroja de los sensores MSS y TM, permitió delinear los cuerpos de agua profundos presentes en las zonas de estudio gracias a falta de reflectividad del agua en el infrarrojo. Pero presentó dificultades cuando la hidrología de la zona era muy escasa y de baja profundidad, y por lo estrecho del cauce.
3. La utilización de un umbral fijo resultó útil en las zonas con abundante vegetación y de vigor alto, para la comparación de las imágenes, sin modificar la capacidad discriminatoria de cada imagen adquirida por los diferentes sensores.
4. Con la aplicación del NDVI se visualizó la pérdida de grandes coberturas de vegetación en las zonas 3 y 6, debido a los eventos de incendio que se presentaron. También fue posible observar la recuperación de la vegetación.
5. Las zonas 8 y 9, por ser zonas más áridas y de menores recursos hídricos, el umbral utilizado no abarcó toda la vegetación presente en los humedales, que es la vegetación escasa y de bajo vigor. Por lo que las áreas de los humedales en estas zonas pueden ser más grandes que las que se registraron en este trabajo.
6. El flujo volumétrico promedio anual medido a lo largo del cauce principal del río Colorado, cerca o dentro de las zonas de estudio, y durante el periodo analizado, tuvo respuestas importantes a los eventos meteorológicos: periodos de lluvias y deshielos extraordinarios y de sequías. En la Cuenca Baja del río Colorado, la respuesta del flujo volumétrico promedio anual a los periodos de sequías prolongadas era de baja o, incluso, nula, lo que es indicador del estado de escasez de agua.
7. El análisis de la correlación lineal permitió detectar que en seis de las nueve zonas estudiadas existe una correlación lineal positiva (baja, moderada o alta) entre la cantidad de flujo volumétrico promedio anual y el área de cubierta vegetal.
8. El análisis de la correlación lineal entre el flujo volumétrico promedio anual y el área de los cuerpos de agua, permitieron establecer la existencia de una

correlación lineal positiva (muy baja, baja o alta) entre las variables. Siete de las nueve zonas son las que resultaron con este tipo de correlación lineal.

9. Los valores de la correlación lineal bajos y muy bajos entre el flujo volumétrico promedio anual y el área de los cuerpos de agua y de cubierta vegetal se debe, principalmente, a la influencia antropogénica.
10. La ocurrencia de un incendio importante en la zona de estudio (zona 6 y 3) durante el periodo analizado atribuía a que la correlación lineal entre el área de cubierta vegetal y las otras dos variables analizadas sea baja o nula.
11. El ancho del cauce principal del río Colorado se ha reducido considerablemente a partir de la construcción de la presa Imperial, lo que ha provocado alteraciones en la hidrología superficial y en la vegetación aguas abajo de la presa.
12. Las discrepancias entre las áreas de los humedales calculadas en este trabajo, con respecto a las reportadas por el INH, tanto de EUA como de México, se deben a las diferencias entre las metodologías empleadas. A pesar de esto, las áreas de los humedales de las zonas localizadas en la Cuenca Baja del río Colorado (excepto la zona 8 y 9), fueron muy cercanas entre sí.
13. Existe una relación directa entre la cantidad de flujo volumétrico y las condiciones de los sistemas estudiados. El 66 % de las zonas estudiadas presentaron una pérdida de vegetación y 33 % una disminución del área de cuerpos de agua, esto implica que el manejo y gestión de los flujos de la cuenca tiene impactos directos en los humedales, tanto en EUA como en México.
14. Cinco de las nueve zonas analizadas cuentan o contaban con un sitio de restauración de humedales.
15. El desarrollo de trabajos como este ayuda a una mejor comprensión de las problemáticas de una de las cuencas binacionales más importantes de México y de EUA, que puede servir como eslabón en la generación de soluciones integrales.

9. Recomendac iones

Durante la elaboración de este trabajo de tesis varios desafíos se presentaron a causa de diversas circunstancias. Por lo que se recomienda para trabajos futuros, lo siguiente:

1. Hacer un análisis más detallado para cada zona en particular, ya que en este trabajo se realizó un análisis general siguiendo la misma metodología y tomando en cuenta el mismo valor de los umbrales para la detección y delimitación de los cuerpos de agua y el área de la cubierta vegetal de los humedales en diferentes zonas. Así pues, se pueden utilizar diferentes umbrales y combinaciones en falso color R/G/B, dependiendo del estado de la vegetación y de la hidrología superficial de cada zona analizada. Para la delimitación de los cuerpos de agua poco profundos otras bandas espectrales pudieran ser más útiles que las bandas del infrarrojo. Por ejemplo, la banda azul del TM. También se recomienda probar diferentes índices de agua.
2. Realizar el análisis más detallado con la aplicación de otras técnicas de procesamiento de las imágenes, como análisis de componentes principales, la transformación “Tasseled Cap”, la clasificación tanto supervisada como no supervisada, pudiera aportar una información adicional útil para cada una de las zonas.
3. Completar la información obtenida, con otras técnicas, como LIDAR, o imágenes de RADAR que pueden ser incluidas en el análisis, y aportar una información adicional valiosa.

Por último, recomiendo a las personas que planean realizar estudio sobre los problemas ambientales e hidrológicos en el Valle de Mexicali y parte mexicana de la cuenca del río Colorado, así como al público en general, ver el documental: Todo Americano: https://www.youtube.com/watch?v=fMf1-kcqt4k, que es un documental sobre el conflicto binacional por el agua, surgido por la construcción del Canal Todo Americano en la frontera entre el Valle de Mexicali (México) y el Valle Imperial y Coachella (EUA), con un escenario que ya afecta al ambiente y la economía local. Además se puede obtener información de la restauración del río Colorado en la página: https://www.facebook.com/savethecoloradoriverdelta.

Lista de referencias bibl iográficas

Abarca, F. J. (2007). Técnicas para evaluación y monitoreo del estado de los humedales y otros ecosistemas acuáticos. Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México. Instituto Nacional de Ecología (INE-Semarnat), 113-144.

Acosta-Velázquez, J., Díaz-Gallegos, J. R., Rodríguez-Zúñiga, M. T., Cerdeira-Estrada, S., Troche-Souza, C., Cruz, I., Ressi I. R. and Jiménez-Rosenberg R. (2010). Aplicaciones de percepción remota en el inventario y monitoreo de ecosistemas costeros en México. XIV Internacional SELPER Symposium, Guanajuato, México. Recuperado de: https://www.academia.edu/1318664/APLICACIONES_DE_PERCEPCI%C3%93N_REMOTA_EN_EL_INVENTARIO_Y_MONITOREO_DE_ECOSISTEMAS_COSTEROS_EN_M%C3%89XICO.

Adler, R. W. (2007). Restoring the environment and restoring democracy: lessons from the Colorado River. Va. Envtl. LJ, 25, 55.

Álvarez-Mozos, J., and Crespo, J. J. (2005). Estimación de la humedad superficial del suelo en cuencas agrícolas por medio de imágenes de teledetección radar. En Actas del XVII Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica, Sevilla (España) (pp. 162-163). Recuperado de: http://www.cartesia.org/geodoc/ingegraf2005/gis6.pdf.

Ángel-Martínez, M. C. (1994). Aplicación de la teledetección en la localización de superficies de agua. CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas), Madrid.

Anguiano, M. E. (1995). Agricultura y migración en el Valle de Mexicali, Tijuana. El Colegio de la Frontera Norte (El Colef). Tijuana, Baja California.

Ariza, A., Garcia, S., Rojas, S., and Ramírez, M. (S.F.). Desarrollo de un modelo de corrección de imágenes de satélite para inundaciones: (CAIN-Corrección Atmosférica e Índices de Inundación). Recuperado de: http://www.un-spider.org/sites/default/files/ModeloCAIN.pdf.

Ávila Mora I. M. (2014). Metodología basada en el análisis de intensidades en imágenes de resonancia magnética para la detección de cicatrices en la corteza cerebral. Tesis de Doctorado. Departamento de Computación. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. 161 p. Recuperado de: http://www.cs.cinvestav.mx/TesisGraduados/2014/TesisIvonneAvila.pdf.

Ayala-Carcedo, F. J. (2002). Notas sobre impactos físicos previsibles del cambio climático sobre los lagos y humedales españoles. III Congreso Ibérico de Planificación y Gestión de Aguas, pp. 360-364. Recuperado de: http://divulgameteo.es/uploads/Impacto-CC-lagos-humedales.pdf

Baker, C., Lawrence, R., Montagne, C., and Patten, D. (2006). Mapping wetlands and riparian areas using Landsat ETM+ imagery and decision-tree-based models. Wetlands, 26(2), 465-474.

Barrett, E. C. (2013). Introduction to environmental remote sensing. (4a. ed).Routledge. London.

Berlanga-Robles, C. A., and Ruiz-Luna, A. (2004). Análisis comparativo de los sistemas clasificatorios de humedales. Instituto Nacional de Ecología/Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo AC México. Archivo interno. Recuperado de: http://www.inecc.gob.mx/descargas/ord_ecol/inf_clasif_humedales.pdf

Berlanga-Robles, C. A., Ruiz-Luna, A., and Trujillo-Batiz, P. (2008). Inventario de los humedales costeros del sistema lagunar Altata-Ensenada del Pabellón, Sinaloa, México, a partir del análisis digital de imágenes de satélite Landsat TM del 2005. Rev. Invest. Mar, 29(1), 3-11.

Bidart-Jiménez, C. (1992). Glosario de mareas y corrientes. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, Valparaíso. Repuperado de: http://www.shoa.cl/servicios/descargas/pdf/Pub3013.pdf.

Bustamante, J., Díaz-Delgado, R., and Aragonés, D. (2005). Determinación de las características de masas de aguas someras en las marismas de Doñana mediante teledetección. Revista de Teledetección, 24, 107-111.

Brena-Zepeda, J. E., Castillo-Romano, C., Castillo-Campos, G., Pale-Pale, J., and Moreno-Casasola, P. (2012). Inventario y caracterización de humedales en la cuenca del río Papaloapan, México. Tecnología y ciencias del agua, 3(2), 131-139.

Brizuela-Amador B., Alcántar-González G., Sánchez-García P., Pea-Kalra Y., Crumbaugh J., Olive C., Tijerina-Chávez L. and Maldonado-Torres R. (2007). Establecimiento de índices espectrales en el diagnóstico nutrimental de nitrógeno en maíz. Agrociencia, 41(8), 827-835.

Brizuela, A., Aguirre, C., and Velasco, I. (2007). Aplicación de métodos de corrección atmosférica de datos Landsat 5 para análisis multitemporal. Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Argentina. Recuperado de: http://www.aet.org.es/congresos/xii/arg27.pdf.

Cabello, J., and Paruelo, J. M. (2008). La teledetección en estudios ecológicos. Revista Ecosistemas, 17(3).

Campbell, J. B. (2002). Introduction to remote sensing. CRC Press. (3a. ed.). 654 p.

Carrillo-Guerrero, Y., Glenn, E. P., and Hinojosa-Huerta, O. (2013). Water budget for agricultural and aquatic ecosystems in the delta of the Colorado River, Mexico: Implications for obtaining water for the environment. Ecological Engineering, 59,

41-51. Recuperado de: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857413001651.

Castro Villegas, J. C., Balderas Plata, M. A. and Hernández Tellez M. (S.F.). Identificación de humedad en el suelo a través de la Teledetección para el mejor manejo de la tierra: Caso zona florística, Estado de México. Facultad de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado de:http://www.inegi.org.mx/eventos/2011/Conf_Ibero/doc/ET6_49_CASTRO.pdf.

Ceccato, P., Flasse, S., Tarantola, S., Jacquemoud, S., and Grégoire, J. M. (2001). Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. Remote sensing of environment, 77(1), 22-33.

Cerdeira-Estrada, S., Heege, T., Kolb, M., Ohlendorf, S., Uribe, A., Muller, A., Garza, R.; Ressl, R.; Aguirre, R.; Marino, I.; Silva, R. and Martell, R. (2012). Benthic habitat and bathymetry mapping of shallow waters in Puerto Morelos reefs using remote sensing with a physics based data processing. En Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012 IEEE International (pp. 4383-4386). IEEE. Recuperado de: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6350402&tag=1.

Cervantes, M. (2007). Conceptos fundamentales sobre ecosistemas acuáticos y su estado en México. Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México. Instituto Nacional de Ecología-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F, México, 37-67.

Cervantes-Escobar, A., Ruiz-Luna, A., and Berlanga-Robles, C. A. (2008). Evaluación de la condición de los sistemas de manglar en el noroeste de México. En: 1ra Bienal del Programa de Ordenamiento Ecológico Marino del Golfo de California, La Paz, Baja California Sur. De: http://inecc.gob.mx/descargas/ord_ecol/1bienal_oemgc_res_acervantes_etal.pdf.

Chander, G., Markham, B. L., and Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. Remote sensing of environment, 113(5), 893-903.

Chavez, P. S. (1988). An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. Remote sensing of environment, 24(3), 459-479.

Chavez, P. S. (1996). Image-based atmospheric corrections-revisited and improved. Photogrammetric engineering and remote sensing, 62(9), 1025-1035. De: http://asprs.org/a/publications/pers/96journal/september/1996_sep_10251036.pdf

Chavez, P. S., and MacKinnon, D. J. (1994). Automatic detection of vegetation changes in the southwestern United States using remotely sensed images. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 60(5).

Chengyuan, H. Shaohong, W. and Chaunyang, X. (2008). Comparison of some vegetation indices in seasonal information. Chinese Geographical Science, 18 (3): 242-248.

Chuvieco Salinero, E. (1990). Fundamentos de teledetección espacial. Rialp. (2ª. ed). 454 p.

Chuvieco Salinero, E. (1996). Fundamentos de teledetección espacial. Rialp. (3a. ed). Madrid.

Chuvieco Salinero, E. (2002). Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio. Ariel, Madrid.

Chuvieco Salinero, E., Salas Rey, F. J., Meza, E., and Vargas, F. (2002). Empleo de la Teledetección en el análisis de la deforestación tropical: el caso de la reserva forestal de Ticoporo (Venezuela). Serie geográfica. vol. 10, p. 55-76

Chuvieco Salinero, E. (2008). Teledetección Ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio. Barcelona. Ariel. Madrid.

Cohen, M. J. (2011). Municipal Deliveries of Colorado River Basin Water. Pacific Institute, Oakland, California. De: http://pacinst.org/wp-content/uploads/sites/21/2013/02/crb_water_8_21_2011.pdf.

Cohen, M. J., Henges-Jeck, C., and Castillo-Moreno, G. (2001). A preliminary water balance for the Colorado River delta, 1992–1998. Journal of Arid Environments, 49(1), 35-48.

Colón-Ortiz, L. (2004). Teledetección de las regiones de humedales de la zona oeste de Puerto Rico, ¿cuán saludables se encuentran? Recuperado de: http://gers.uprm.edu/geol6225/pdfs/l_colon.pdf.

CONAGUA (2004). Ley de Aguas Nacionales. Recuperado de: http://info4.juridicas.unam.mx/ijure/fed/15/209.htm?s=.

CONAGUA (2008). Estadísticas del agua en México. Actualizado al mes de agosto de 2009. Comisión Nacional del Agua. México, D.F. Recuperado de: http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM_2008.pdf.

CONAGUA (2012). Atlas Digital del Agua México. Recuperado de: http://www.conagua.gob.mx/atlas/ciclo20.html.

CONANP (S.F.). Humedales de México. Recuperado de: http://ramsar.conanp.gob.mx/sitios.php.

CONANP (2011). Logros 2011. Recuperado de: http://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/pdf/pdf_informes/logros_2011.pdf.

Contreras Rodríguez E. (S.F.) El Bordo: retos de frontera. El revestimiento del Canal Todo Americano. Recuperado de: http://www.tij.uia.mx/academicos/elbordo/vol15/canal1.html.

Cotler H., Garrido A., Bunge V. and Cuevas M.L. (2010). Las cuencas hidrográficas de México: Priorización y toma de decisiones. En: La cuenca binacional del río Colorado (O. Hinojosa y Y. Carrillo.). Instituto Nacional de Ecología-Fundación Gonzalo Río Arronte I.A.P. México D.F., México. pp. 180-187.

Cowardin, L. M., Carter, V., Golet, F. C., and LaRoe, E. T. (1979). Classification of wetlands and deepwater habitats of the United States. US Department of the Interior, US Fish and Wildlife Service. Washington, D.C. Recuperado de: https://www.fws.gov/wetlands/Documents/classwet/index.html.

Di, L., Rundquist, D. C., and Han, L. (1994). Modelling relationships between NDVI and precipitation during vegetative growth cycles. International Journal of Remote Sensing, 15(10), 2121-2136.

Díaz, P., y Fernández, P. (2001). Determinación del tamaño muestral para calcular la significación del coeficiente de correlación lineal. Metodología de la Investigación, 1, 6. Recuperado de: http://www.fisterra.com/material/investiga/pearson/pearson.pdf.

Díez, P. J. (1993). Introducción a la percepción remota. Colección textos y apuntes/47, Facultad de Geografía. Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México.

Domínguez Gómez, J. A. (2002). Estudio de la calidad del agua de las lagunas de gravera mediante teledetección. Tesis de Doctorado. Alcalá de Henares, Universidad de Alcalá. Alcalá de Henares, Madrid, España. 430 p. Recuperado de: http://www.researchgate.net/publication/262802557_Estudio_de_la_calidad_del_agua_de_lagunas_de_gravera_mediante_teledeteccin.

Elvidge, C. D., Miura, T., Jansen, W. T., Groeneveld, D. P., and Ray, J. (1998). Monitoring trends in wetland vegetation using a Landsat MSS time series.Remote sensing change detection: Environmental monitoring methods and applications, 191-210.

Engman, E. T. (1995). Recent advances in remote sensing in hydrology.Reviews of Geophysics, 33(S2), 967-975.

Escribano, P. (2009). Integración de técnicas espectrales para la detección y cuantificación de los tipos de cubiertas en ecosistemas áridos. Bases para un programa de seguimiento de pN Cabo de gata Níjar, Almeria. Tesis de Doctorado. Universidad de Almeria. España. 144 p.

Estrada Loreto, F., Barba Macías, E., and Ramos Reyes, R. (2013). Cobertura temporal de los humedales en la cuenca del Usumacinta, Balancán, Tabasco, México. Universidad y ciencia, 29(2), 141-151.

Fernández, L. (2010). Diagnóstico de base sobre el impacto de las obras de infraestructura en la capacidad de adaptación de los humedales. Proyecto "Evaluación del componente de adaptación al cambio climático en obras de infraestructura". Wetlands International. Fundación humedales. Recuperado de: http://lac.wetlands.org/Portals/4/NAPA/NAPAs%20infraestructure%20analysis%20report%201.pdf.

Flores, E. S., Caravantes, R. E. D., Peña, L. C. B., and Patricio, B. L. Z. (2012). Sistema de monitoreo de la dinámica de uso de suelo (MODUS) en la región binacional México-Estados Unidos. GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica, (12), 1-15. Recuperado de: http://geofocus.rediris.es/2012/Articulo1_2012.pdf.

Fred Phillips Consulting, Inc. (2008). Recuperado de: http://www.fredphillipsconsulting.com/index.htm.

García, E., y Lleellish, M. A. (2012). Cartografiado de bofedales usando imágenes de satélite Landsat en una cuenca altoandina del Perú. Revista de Teledetección, 38, 92-108. Recuperado de: http://www.aet.org.es/revistas/revista38/Revista_38_Todo.pdf#page=96.

Gao, B. C. (1995). Normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. En SPIE's 1995 Symposium on OE/Aerospace Sensing and Dual Use Photonics (pp. 225-236). International Society for Optics and Photonics. Recuperado de: http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=999866.

Garrick, D., and Bark, R. (2011). 23. Comparative Perspectives on Basin Governance in the Murray–Darling Basin: Insights from the western United States. Basin Futures, 367.

Gerlak, A. K., Zamora-Arroyo, F., and Kahler, H. P. (2013). A delta in repair: Restoration, binational cooperation, and the future of the Colorado River Delta.Environment: Science and Policy for Sustainable Development 55(3), 29-40.

Glenn, E. P., Lee, C., Felger, R., and Zengel, S. (1996). Effects of water management on the wetlands of the Colorado River Delta, Mexico. Conservation Biology, 10(4), 1175-1186.

Glenn, E.P., Mexicano, L., Garcia-Hernandez, J., Nagler, P.L., Gomez-Sapiens, M.M., Tang, D., Lomeli, M.A., Ramirez-Hernandez, J. and Zamora-Arroyo, F., (2013). Evapotranspiration and water balance of an anthropogenic coastal desert wetland: Responses to fire, inflows and salinities. Ecological Engineering 59, 176–184.

Green, E. P., Mumby, P. J., Edwards, A. J., and Clark, C. D. (1996). A review of remote sensing for the assessment and management of tropical coastal resources. Coastal management, 24(1), 1-40.

González-Casillas, A. (1991). Contaminación salina del río Colorado, Rev. Travesía, núm. 24, pp. 12-21.

Guay, B. E. (2001). Preliminary Hydrologic Investigation of Topock Marsh, Arizona 1995-98. Recuperado de: http://arizona.openrepository.com/arizona/handle/10150/191252.

Hernández Linares, Y. (2012). Propiedades sortivas del humedal RAMSAR-Pátzcuaro. Tesis de Maestría en Ciencias. Instituto de investigaciones sobre los recursos naturales. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 107 p.

Hewitt, M. J. (1990). Synoptic inventory of riparian ecosystems: the utility of Landsat Thematic Mapper data. Forest ecology and management, 33, 605-620.

Hewitt, P. G. (2006). Física conceptual. Décima edición. Pearson Educación.

IBWC (2000). Minute 306: Conceptual framework for United States-Mexico studies for future recommendations concerning the riparian and estuarine ecology of the Limitrophe section of the Colorado River and its associated delta. Recuperado de: http://www.ibwc.gov/Files/Minutes/Min306.pdf.

IBWC (2010a). Minute 316: Utilization of the Wellton-Mohawk bypass drain and necessary infrastructure in the United States for the conveyance of water by Mexico and non-Governmental Organizations of both countries to the Santa Clara wetland during the Yuma desalting plant pilot run. Recuperado de: http://www.ibwc.gov/Files/Minutes/Minute_316_w_JR.pdf.

IBWC (2010b). Minute 317: Conceptual framework for US–Mexico discussions on Colorado River cooperative actions. Recuperado de: http://www.ibwc.state.gov/Files/Minutes/Minute_317.pdf.

IBWC (2010c). Minute 318: Adjustment of Delivery Schedules for Water Allotted to Mexico for the Years 2010 Through 2013 as a Result of Infrastructure Damage in Irrigation District 014, Rio Colorado, Caused by the April 2010 Earthquake in the Mexicali Valley, Baja California. Recuperado de: http://www.ibwc.state.gov/Files/Minutes/Min_318.pdf.

IBWC (2012). Minute 319: Interim International Cooperative Measures in the Colorado River Basin Through 2017 and Extension of Minute 318 Cooperative Measures to Address the Continued Effects of the April 2010 Earthquake in the Mexicali Valley, Baja California. Recuperado de: http://www.ibwc.gov/Files/Minutes/Minute_319.pdf.

Ibrahim, S., and Hashim, I. (1990). Classification of mangrove forest by using 1: 40 000-scale aerial photographs. Forest Ecology and Management, 33, 583-592.

Ibrahim, K., and Jusoff, K. (2009). Assessment of Wetlands in Kuala Terengganu District Using Landsat^{TM}. Journal of Geography and Geology, 1(2), p33. Recuperado de: http://www.ccsenet.org/journal/index.php/jgg/article/viewFile/4150/3578.

IELBC (2013). Instituto de Estudios Legislativos. Agua en Baja California. Recuperado de: http://www.congresobc.gob.mx/IELWeb/documentos/AguaenBajaCalifornia.pdf.

INE-SEMARNAT, (2006). La investigación ambiental para la toma de decisiones. Instituto Nacional de Ecología 2001-2006. México, D.F. Recuperado de: http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/download/492.pdf.

Jensen, J. R. (2005). Introductory Digital Image Processing A Remote Sensing Perspective. 3rd ed. (Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall). 526 p.

Jensen, J. R. (2007). Remote sensing of the environment: An Earth Resource Perspective. 2da ed. (Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall). 592 p.

Ji, L., Zhang, L., and Wylie, B. (2009). Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water index. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 75(11), 1307-1317.

Jones, K., Lanthier, Y., van der Voet, P., van Valkengoed, E., Taylor, D., and Fernández-Prieto, D. (2009). Monitoring and assessment of wetlands using Earth Observation: The GlobWetland project. Journal of environmental management, 90(7), 2154-2169.

Kandus, P., Quintana, R. D., Minotti, P. G., Oddi, J. D. P., Baigún, C., González Trilla, G., and Ceballos, D. (2009). Ecosistemas de humedal y una perspectiva hidrogeomórfica como marco para la valoración ecológica de sus bienes y servicios. Valoración de servicios ecosistémicos: conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial. Ediciones INTA, Buenos Aires, 265-290.

Kaufman, Y. J. (1993). Aerosol optical thickness and atmospheric path radiance. J. Geophys. Res, 98(D2), 2677-2692.

Kelly, M. (2007). En la frontera hace falta cooperación, no muros. En: Una barrera a nuestro ambiente compartido. El muro fronterizo entre México y Estados Unidos. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, El Colegio de la Frontera Norte, Consorcio de Investigación y Política Ambiental del Suroeste. Pág. 43.

Landgrave, R., and Moreno-Casasola, P. (2012). Evaluación cuantitativa de la pérdida de humedales en México. Investigación ambiental, 4(1), 19-35.

Lavın, M. F., and Sánchez, S. (1999). On how the Colorado River affected the hydrography of the Upper Gulf of California. Continental Shelf Research, 19(12), 1545-1560.

Lee, K. S., Kim, T. H., Yun, Y. S., and Shin, S. M. (2001). Spectral characteristics of shallow turbid water near the shoreline on inter-tidal flat. *대한원격탐사학회지* (Korean Journal of Remote Sensing), 17(2), 131-139.

Lenoble, J. (1985). Radiative transfer in scattering and absorbing atmospheres: standard computational procedures (Vol. 1, No. 2). Hampton, VA: A. Deepak. Recuperado de: http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/img-090550.pdf.

Leopold, A. (1949). The green lagoons. Pages 150-158 in A Sand County almanac. Oxford University Press, New York. (Reprinted 1966).

Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., and Chipman, J. W. (2004). Remote sensing and image interpretation (No. Ed. 5). John Wiley & Sons Ltd.

Lira Chávez, J. (2010). Tratamiento digital de imágenes multiespectrales. Recuperado de: ftp://ftp.ehu.es/cidira/profs/iipbaiza/Libro_TDI_PR_Electronic.pdf.

Lissesand, T. M., and Kiefer, R. W. (1994). Remote sensing and image interpretation. New York: John Wiley and Sons. 736 p.

López, M. A. S. (2008). El control del río Colorado como factor histórico. Frontera Norte, 20(40). Recuperado de: http://scielo.unam.mx/pdf/fn/v20n40/v20n40a2.pdf.

López B. E. (1991). Corrección atmosférica en el espectro solar. En La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Recursos renovables: agricultura. Universitat de Valencia. Valencia. 409 p.

Lopez, R. D., and Siobhan Fennessy, M. (2002). Testing the floristic quality assessment index as an indicator of wetland condition. Ecological Applications,12(2), 487-497.

Lozano-Pontón, C., Brausin-Pulido D., and Rodríguez-Gaviria C. (2013). Ecosistema del humedal Tibabúyes: valoración cultural para el patrimonio natural. Trabajo de grado. Facultad de Ciencias Humanas. Universidad Colegio Mayor de Nuestra Señora del Rosario. Bogotá. 84 p. Recuperado de: http://repository.urosario.edu.co/bitstream/handle/10336/4314/52692469-2013.pdf?sequence=1.

Lu, D., Mausel, P., Brondizio, E., and Moran, E. (2002). Assessment of atmospheric correction methods for Landsat TM data applicable to Amazon basin LBA research. International Journal of Remote Sensing, 23(13), 2651-2671. Recuperado de: http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/01431160110109642.

Lunetta, R. S., and Elvidge, C. D. (1999). Remote sensing change detection: environmental monitoring methods and applications. Taylor & Francis. London.

Lyon, J. G., and McCarthy, J. (1995). Wetland and environmental applications of GIS. CRC Press. 400 p.

Malagamba, R. J. (2004). Algunas evidencias sedimentológicas del efecto del represamiento del Río Colorado en la sedimentación del Alto Golfo de California. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California.

Martínez, L., Palà, V., and Arbiol, R. (2003). Discriminación de nubes, agua e innivación en series de imágenes corregidas y compensadas físico-estadísticamente. Pan, 7, 2-08.

McDougal, D. T. (1904). Delta and delta vegetation. Botanical Gazette 38:44-63.

McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. International journal of remote sensing, 17(7), 1425-1432.

Merg, C., Petri, D., Bodoira, F., Nini, M., Díez, M. F., Schmindt, F., Montalva, R., Guzmán, L., Rodríguez, K., Blanco, F., and Selzer, F. (2011). Mapas digitales regionales de lluvias, índice estandarizado de precipitación e índice verde. Pilquen-Sección Agronomía, (11), 5.

Mexicano, L. (2004). Análisis retrospectivo de los humedales del Delta del Río Colorado por medio de sensores remotos y su relación con el flujo a través de la frontera México-E.U.A. Tesis de Maestría en Ciencias, Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de Baja California.

Mexicano, L., Glenn, E. P., Hinojosa-Corona, A., García-Hernández, J., and Hinojosa-Huerta, O. (2013a). Long-term sustainability of Cienega de Santa Clara, an anthropogenic wetland created by disposal of agricultural drain water in the delta of the Colorado River, Mexico. Ecological Engineering 59, 110-120.

Mexicano, L., Nagler, P.L., Zamora-Arrroyo, F. and Glenn, E.P. (2013b). Vegetation dynamics in response to water inflow rates and fire in a brackish Typha domingensis Pers. marsh in the delta of the Colorado River, Mexico. Ecological Engineering 59, 167– 175.

Millennium Ecosystem Assessment (2005). Evaluación de los ecosistemas del Milenio: informe de síntesis. Borrador final. Recuperado de: http://www.millenniumassessment.org/documents/document.439.aspx.pdf.

Mitsch, W. J. and Gosselink J. G. (2000). Wetlands. J. Wiley and Sons, Nueva York. 920 p.

Morrison, J. I., Postel, S., and Gleick, P. H. (1996). Sustainable use of water in the Lower Colorado River Basin. Pacific Institute and the Global Water Policy Project, Oakland. Recuperado de: http://pacinst.org/wp-content/uploads/sites/21/2013/02/sustainable_co_river_es3.pdf.

Mumby, P.J. and A.J. Edwards (2000): Remote sensing objectives of coastal managers. In: Remote sensing handbook for tropical coastal management (E.P. Green, P.J.

Mumby, A.J. Edwards and C.D. Clark, eds.), Coastal Management Sourcebooks 3, UNESCO, Paris, pp. 31-39.

Naranjo García M. J., (2012). Distribución de paisajes submarinos del litoral de Sisal, Yucatán. Tesis de Licenciatura. Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Universidad de Guadalajara. 113 p.

Navarro Pedreño, J.; Meléndez-Pastor, I.; Gómez Lucas, I and Almendro Candel, M. B. (2006). Segmentación de imágenes mediante el empleo de índices de vegetación para la estimación de parámetros edáficos. En XII Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica: El acceso a la Información Espacial y las Nuevas Tecnologías Geográficas. Editorial Universidad de Granada. ISBN: 84-338-3944-6. Granada, pp. 1093-1105.

Nelson, S. M., Fielding, E. J., Zamora-Arroyo, F., and Flessa, K. (2013a). Delta dynamics: Effects of a major earthquake, tides, and river flows on Ciénega de Santa Clara and the Colorado River Delta, Mexico. Ecological Engineering, 59, 144-156.

Nelson, S. M., Fielding, E. J., Zamora-Arroyo, F., and Flessa, K. (2013b). UAVSAR studies of earthquake related surface deformation in the Colorado River estuary, Mexico. Recuperado septiembre 2015 de: http://uavsar.jpl.nasa.gov/science/workshops/presentations2013/UAVSAR_WorkShop2013_Earthquake_Colorado_River_(Nelson).pdf.

Ohmart, R. D., Anderson, B. W., and Hunter, W. C. (1988). The ecology of the lower Colorado River from Davis Dam to the Mexico-United States International Boundary: a community profile. Arizona State Univ Tempe Center For Environmental Studies.

Olaya, V. (2014). Sistemas de Información Geográfica. Libro Libre. Recuperado de: http://volaya.github.io/libro-sig/index.html o http://volaya.github.io/libro-sig/chapters/Imagenes.html#Corrección geométrica.

O'Regan, P. R. (1996). The use of contemporary information technologies for coastal research and management: a review. Journal of Coastal Research, 192-204.

Otieno, M. N., Odenyo, V. O. A., and Okeyo, J. B. (2001). The capabilities of Multispectral Landsat TM for mapping spatial landscape characteristics of a tropical wetland. The case of Yala Swamp, Kenya. In Proceedings of Lake Victoria Environment Management Programme (LVEMP), First Regional Scientific Conference 3rd-7th December.

Oyola Lepe, N. (2009). Identificación de humedales del norte grande de chile utilizando técnicas geomáticas en imágenes satelitales Landsat. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza. Universidad de Chile.

Ozesmi, S. L., and Bauer, M. E. (2002). Satellite remote sensing of wetlands. Wetlands ecology and management, 10(5), 381-402.

Payne, J. M., Reid, F. A., and Carrera Gonzalez, E. (1992). Feasibility Study for the Possible Enhancement of the Colorado Delta Wetlands: Baja California Norte, Mexico. Prepared by Ducks Unlimited. Recuperado de: http://arizona.openrepository.com/arizona/bitstream/10150/280002/1/azu_td_3053866_sip1_m.pdf.

Pérez-Ortega, M. (2011). Aplicaciones de la teledetección y SIG en la caracterización de humedales en la reserva de la biósfera de La Mancha húmeda. Tesis de Maestría. Universidad Computlense de Madrid. 112 p.

Perry T. (2009). Officials celebrate project to cut water loss on All-American Canal, Los Angeles Times, Mayo 02, 2009. Recuperado de: http://articles.latimes.com/2009/may/02/local/me-all-american-canal2.

Pitt, J., Hinojosa-Huerta O. and Carrillo-Guerrero Y. (2010). Colaboración Binacional en la Cuenca del Río Colorado: Recomendaciones para Prevenir una Crisis de Agua. Environmental Defense Fund y Pronatura Noroeste. Recuperado de: https://www.academia.edu/3322820/Colaboraci%C3%B3n_Binacional_en_la_Cuenca_del_R%C3%ADo_Colorado_Recomendaciones_para_Prevenir_una_Crisis_de_Agua.

RAMSAR (2014). Perfiles de los países. Recuperado de: http://www.ramsar.org/es/perfiles-de-los-pa%C3%ADses.

Ramsar Convention Secretariat (2009). The Ramsar List of Wetlands of International Importance. Recuperado mayo 2015 de: http://www.ramsar.org/key sitelist.htm.

Rani, M., Kumar, P., Yadav, M., and Hooda, R. S. (2011). Wetland Assessment and Monitoring Using Image Processing Techniques: A Case Study of Ranchi, India. J. Geographic Information System, 3(4), 345-350.

Rebelo, L. M., Finlayson, C. M., and Nagabhatla, N. (2009). Remote sensing and GIS for wetland inventory, mapping and change analysis. Journal of environmental management, 90(7), 2144-2153.

Rebelo, L.M., and Finlayson, C.M. (2010). K&C Science Report–Phase 1. Characterization of inland wetlands in Africa. The ALOS Kyoto & Carbon Initiative. Science Team Reports Phase 1 (2006-2008). Recuperado de: http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/kyoto/phase_1/KC_Phase-1_ScienceTeamReports_JAXA-EORC_NDX-100003.pdf.

Rejas Ayuga, J. G. (2008). Tratamiento digital previo de las imágenes. Recuperado de: http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45518/componente45516.pdf.

Resolución IX.1(2005). Anexo A, del “Marco Conceptual para el uso racional de los humedales y el mantenimiento de sus características ecológicas”. Recuperado de: http://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/pdf/guide/guide-wise-use-2005-s.pdf.

Riaño, D., Salas, J., Chuvieco, E., Aguado, I., and Gómez, M. E. D. (2000). Corrección Atmosférica y Topográfica, Información Multi-temporal y Auxiliar Aplicadas a la Cartografía de Modelos de Combustibles con Imágenes Landsat-TM. Tecnologías Geográficas para el Desarrollo Sostenible, 222-239. Recuperado de: http://age-tig.es/docs/IX_2/Riano_David.PDF.

Richards, J. A., and Jia, X (1999). Remote sensing digital image analysis: an introduction 4th ed. Berlin, Allemagne Springer-Verlag. Recuperado de: https://uqu.edu.sa/files2/tiny_mce/plugins/filemanager/files/4260086/8/RS%20Digital%20Image%20Analysis.pdf.

Richardson, J., and Carrier J. (1992). The Colorado: a river at risk. Westcliffe Publishers, Englewood, Colorado. 184 p.

Rouse, J. W., Hass, R. H., Schell, J. A., and Deering, D. W. (1973). Monitoring vegetation system in the great plains with ERTS. Third ERST Symposium, NASA SP 351, vol. 1, p. 309-317.

Rundquist, D.C., Narumalani, S., Ram M., and Narayanan, R.M., (2001). A review of wetlands remote sensing and defining new considerations. Remote Sensing Reviews, Vol. 20, pp. 207-226.

Sabins, F. F.(2007). Remote sensing: principles and applications. Waveland Press. 494 p.

Saleh, S. A. (2012). Studying of the Environmental Changes in Marsh Area Using Landsat Satellite Images. Journal of Asian Scientific Research, 2(8), 427-435.

Salinas Castillo, W. E., Treviño Garza, E. J., Jaramillo Tovías, J. G., and Campos Flores, J. A. (2002). Identificación y clasificación de humedales interiores del estado de Tamaulipas por percepción remota y sistemas de información geográfica. Investigaciones geográficas, (49), 74-91.

Samaniego López, M. A. (2008). El control del río Colorado como factor histórico: La necesidad de estudiar la relación tierra/agua. Frontera norte, 20(40), 49-78.

Schott, J. R. (2007). Remote sensing. Oxford University Press. 384 p.

Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable Ministerio de Salud y Ambiente (2004). Inventario Nacional de Bosques Nativos y Sistema Nacional de Evaluación Forestal. Proyecto de Bosques Nativos y Áreas Protegidas BIRF 4085-AR. Manual de teledetección. Dirección de Bosques Dirección Nacional de Recursos Naturales y Conservación de la Biodiversidad. Recuperado de: http://www.ambiente.gov.ar/archivos/web/UMSEF/File/PINBN/nueva_version_manuales/pinbn_manual_teledeteccion.pdf.

Secretaría de la Convención de Ramsar (1999). Cooperación internacional: Lineamientos para la cooperación internacional con arreglo a la Convención Ramsar. Recuperado de: http://www.ramsar.org/key_guide_cooperate_s.htm.

Secretaría de la Convención de Ramsar (2006). Manual de la Convención de Ramsar: Guía a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971), 4a. edición. Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland (Suiza). Recuperado de: http://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/pdf/lib/lib_manual2006s.pdf.

Secretaría de la Convención de Ramsar (2010). Inventario de humedales: Marco de Ramsar para el inventario y la descripción de las características ecológicas de los humedales. Manuales Ramsar para el uso racional de los humedales, 4ª edición, vol. 15. Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland (Suiza). Recuperado de: http://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/pdf/lib/hbk4-15sp.pdf.

Secretaría de la Convención de Ramsar (2013). Manual de la Convención de Ramsar: Guía a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971), 6ª ed., Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland (Suiza). Recuperado de: http://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/manual6-2013-sp.pdf.

SEMARNAT-EPA. (2002). Frontera 2012: Programa ambiental México-Estados Unidos. México. Recuperado de: http://www.semarnat.gob.mx/temas/estadisticas-ambientales/snia/programa-frontera-2012.

Shanmugam, P., Ahn, Y. H., and Sanjeevi, S. (2006). A comparison of the classification of wetland characteristics by linear spectral mixture modelling and traditional hard classifiers on multispectral remotely sensed imagery in southern India. Ecological Modelling, 194(4), 379-394.

Short, N. M., and Robinson, J. (1998). The remote sensing tutorial. Goddard Space Flight Center, NASA. Recuperado de: http://rsd.gsfc.nasa.gov/rsd/RemoteSensing.html.

Slater, P. N. (1980). Remote sensing: optics and optical systems. United States: Addison-Wesley Publishing Co., Inc., Advanced Book Program,Reading,MA.

Song, C., Woodcock, C. E., Seto, K. C., Lenney, M. P., and Macomber, S. A. (2001). Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects? Remote sensing of Environment, 75(2), 230-244.

Sosa Gordillo, J. F. and Sánchez López, E. (2007). Estudio de los efectos socio-económicos en el Valle de Mexicali provocados por el revestimiento del Canal Todo Americano. Revista Mexicana de Agronegocios, julio-diciembre, 359-374. Recuperado de: http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=14102103.

Sykes, G. (1937). The Colorado Delta. American Geographical Society. Baltimore, Maryland: Lord Baltimore Press. 193 p.

Tagestad, J. (2000). Radiometric standardization of adjacent Landsat Thematic Mapper Image for multi-scene mosaics. Tesis de Maestría, Universidad del Estado de Utah, Logan, Utah.

Teleted (S.F.). Recuperado de: http://www.teledet.com.uy/tutorial-imagenes-satelitales/aplicaciones-percepcion-remota.htm.

Tiner, R. W. (1990). Use of high-altitude aerial photography for inventorying forested wetlands in the United States. Forest Ecology and Management, 33, 593-604.

Tiner, R.W., Lang, M.W., and Klemas, V.V. (2015). Remote Sensing of Wetlands: Applications and Advances. CPC Press, Taylor and Francis Group, LLC, Boca Raton, FL .ISBN: 13:978-1-4822-3735-1), 555 pp.).

Nature Conservancy´s Colorado and Green Rivers Area Program Manager. (S.F.). Scott M. Matheson wetlands preserve. Wildfire Response Plan, de The Nature Conservancy. Recuperado de: http://www.tncfiremanual.org/moabwildfireresponseplan.pdf.

Torres Rodríguez, J. (1994). Aplicación de sensores remotos (Landsat MSS) para el reconocimiento de unidades geomórficas en la región deltaica del Río Colorado. Tesis de Maestría en Ciencias, Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California.

United States Department of the Interior Bureau of Reclamation (1990). Colorado River basin probable maximum floods Hoover and Glen Canyon dams. Recuperado de: http://www.riversimulator.org/Resources/USBR/MaxProbableFloods.pdf.

U.S. EPA. (2002). Methods for Evaluating Wetland Condition: Using Vegetation To Assess Environmental Conditions in Wetlands. Office of Water, U.S. Environmental Protection Agency. Washington, DC. EPA-822-R-02-020. Recuperado de: http://www2.epa.gov/sites/production/files/documents/wetlands_10vegetation.pdf.

US Fish and Wildlife Service. (2006). Havasu National Wildlife Refuge water management plan. Final. Lower Colorado River Multi-Species Conservation Program. Recuperado de: http://www.lcrmscp.gov/reports/2006/e17_havasu_wmp_sep06.pdf.

Valor, E., and Caselles, V. (1996). Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American areas. Remote sensing of Environment, 57(3), 167-184.

Ventura, V. F. (1999). Fundamentos Teóricos del Control de las Extracciones Mediante Teledetección. Medida y evaluación de las extracciones de agua subterránea, 89. Recuperado de: http://www.igme.es/actividadesigme/lineas/HidroyCA/publica/libros2_TH/art2/pdf/fundame.pdf.

Wakelyn, L. A. (1990). Wetland inventory and mapping in the Northwest Territories using digital Landsat data. Department of Renewable Resources, Government of the Northwest Territories. Recuperado de: http://www.enr.gov.nt.ca/sites/default/files/96.pdf.

Warner, W. S. (1990). A PC-based analytical stereoplotter for wetland inventories: An efficient and economical photogrammetric instrument for field offices. Forest Ecology and Management, 33, 571-581.

Xin, S. (2004). Inferri wetland hydrological conditions from remote sensing: A case study of Lake Baiyang, China. Thesis submitted to the International Institute for Geo-information Science and Earth Observation in partial fulfilment of the requeriments for the degree of Master of Science in Geo-information Science and Earth Observation with specialization in Environmental System Analyses and Management.

Xu, H. (2006). Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. International Journal of Remote Sensing, 27(14), 3025-3033. Recuperado de: http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/01431160600589179.

Zamora-Arroyo, F., Pitt, J., Cornelius, S., Glenn, E., Hinojosa-Huerta, O., Moreno, M., García J., Nagler P., de la Garza M and Parra, I. (2005). Conservation priorities in the Colorado River delta: Mexico and the United States, Sonoran Institut., Tucson, Arizona. report, 103 pp. Recuperado de: http://www.sonoraninstitute.org/component/docman/doc_view/1307-conservation-priorities-in-the-colorado-river-delta-06152005.html.

Anexo 1

Tabla A1. Banda (b) del sensor MSS y TM de satélite Landsat 1 -3 y Landsat 5 (1,2,3, ó 5), respectivamente, utilizada para diferenciar los cuerpos de agua de los demás tipos de cobertur a en cada zona del estudio, en diferentes años.

	MSS			TM					
Zona	1972	1977	1982	1987	1992	1997	2002	2007	2011
Cañón de Rubí, Utah, EUA	b7	b7	b7	b4	b4	b4	b4	b4	b4
Cisco, Utah, EUA	b7	b7	b7	b5	b5	b5	b5	b5	b5
Moab, Utah, EUA	b7	b7	b7	b4	b4	b4	b4	b4	b4
Topock Marsh, Arizona, EUA	b7	b7	b7	b4	b4	b4	b4	b4	b4
Lost Lake, California, EUA	b7	b7	b7	b5	b5	b5	b5	b5	b5
Refugio Nacional de Vida Silvestre Cíbola, Arizona y California, EUA	b7	b7	b7	b5	b5	b5	b5	b5	b5
Mittry Lake, Arizona, EUA	b7	b7	b7	b5	b5	b5	b5	b5	b5
Tramo limítrofe del río Colorado, EUA-México	b6	b7	b7	b5	b5	b5	b5	b5	b5
Río Colorado en México	b7	b7	b7	b5	b5	b5	b5	b5	b5

ANEXO 2

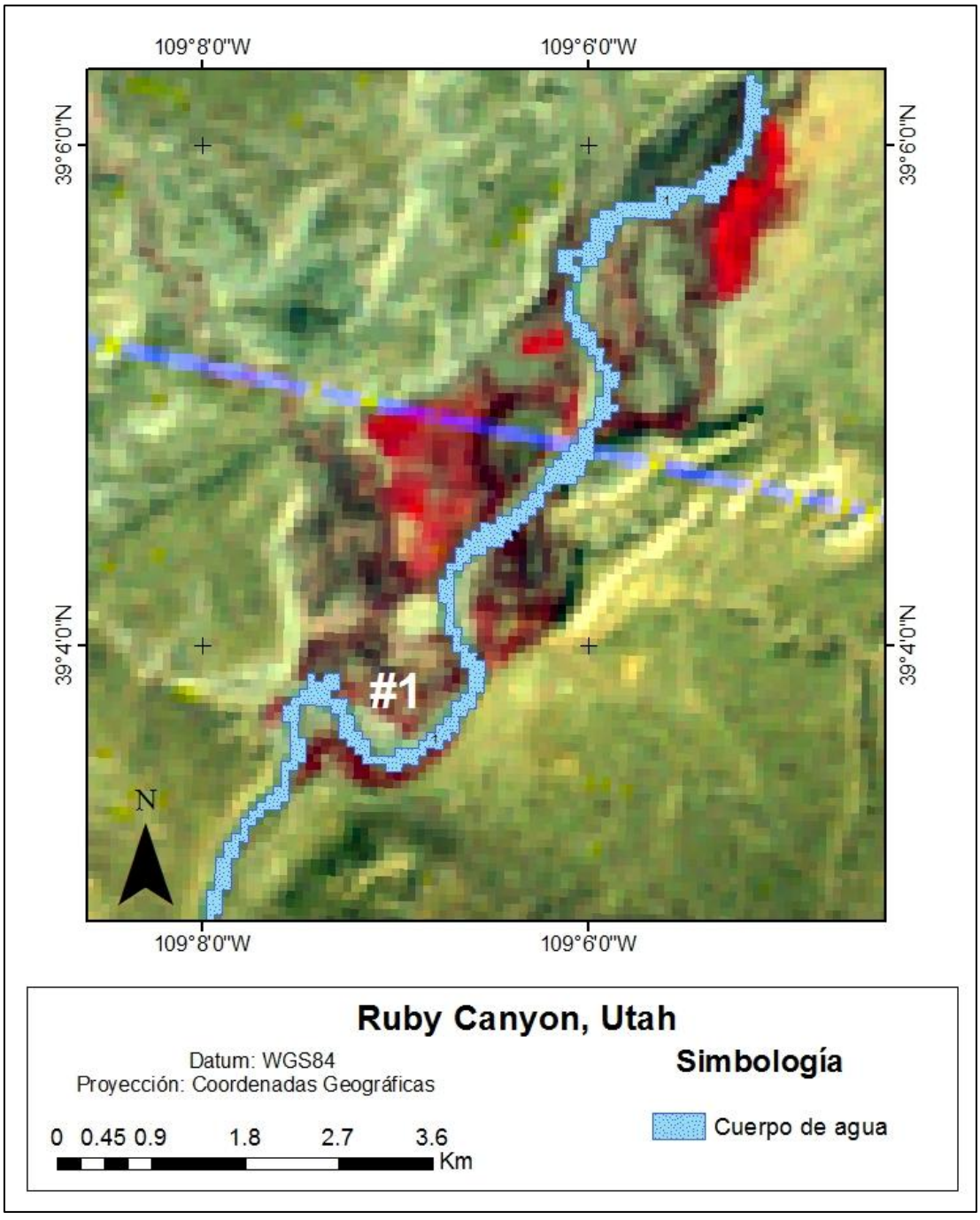


Figura A2.1. Zona 1: Cañón de Rubí , Utah, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos d e agua para el año 1972. La imagen en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 1 MSS se está usando como fondo.

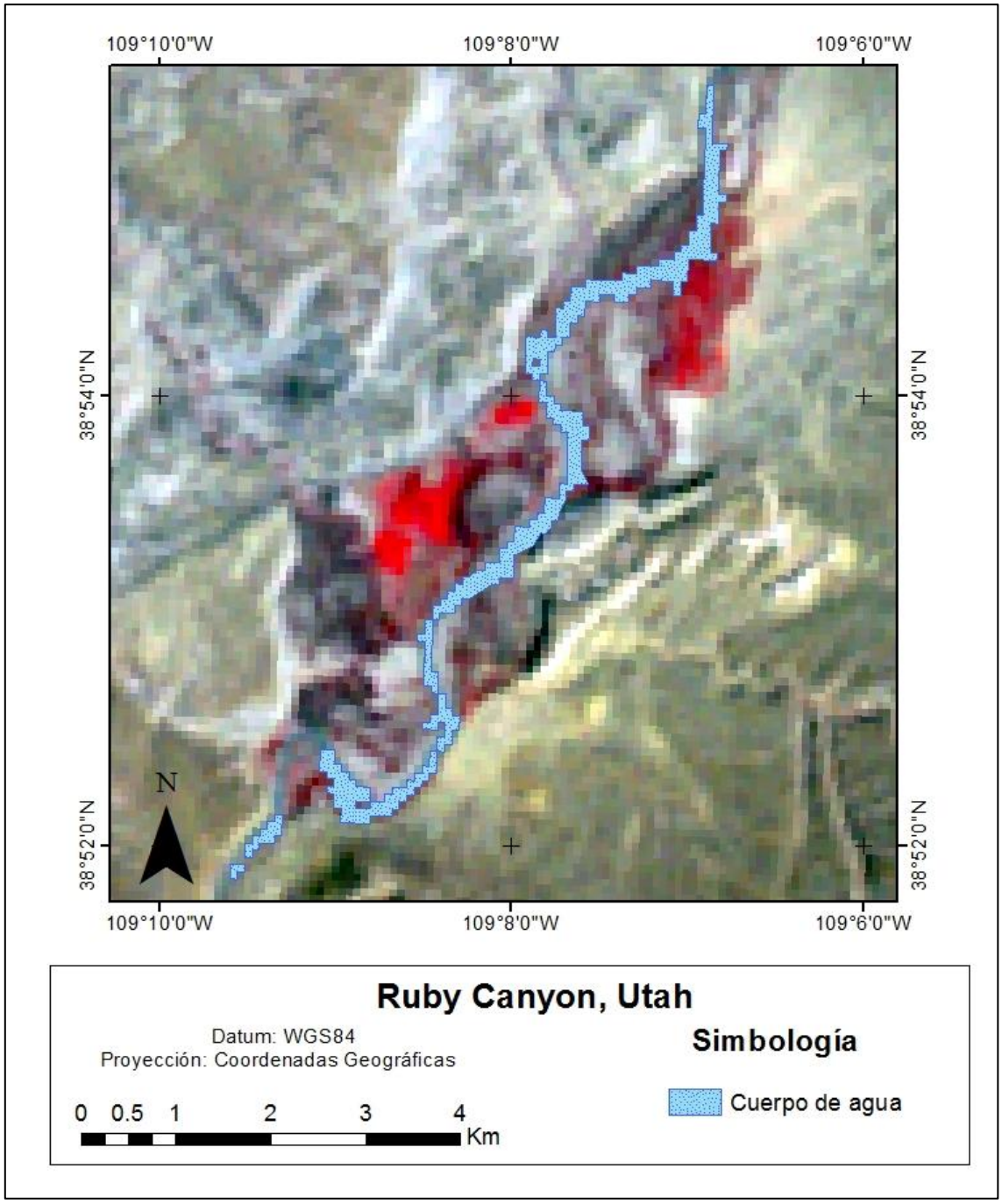


Figura A2.2 . Zona 1: Cañón de Rubí , Utah, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1977 . La imagen en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 2 MSS se está usando como fondo.

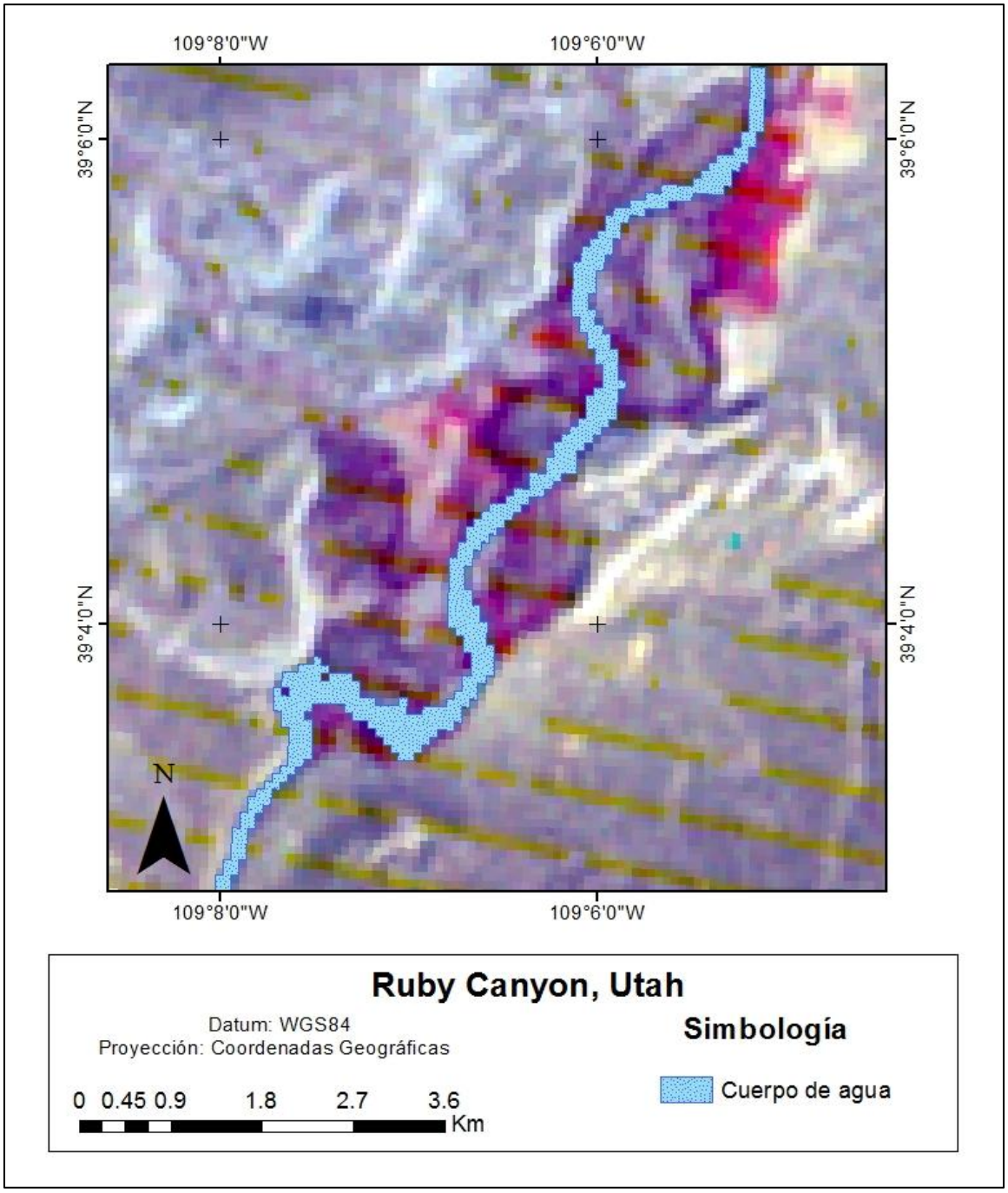


Figura A2.3 . Zona 1: Cañón de Rubí , Utah, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1982 . La imagen en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 3 MSS se está usando como fondo.

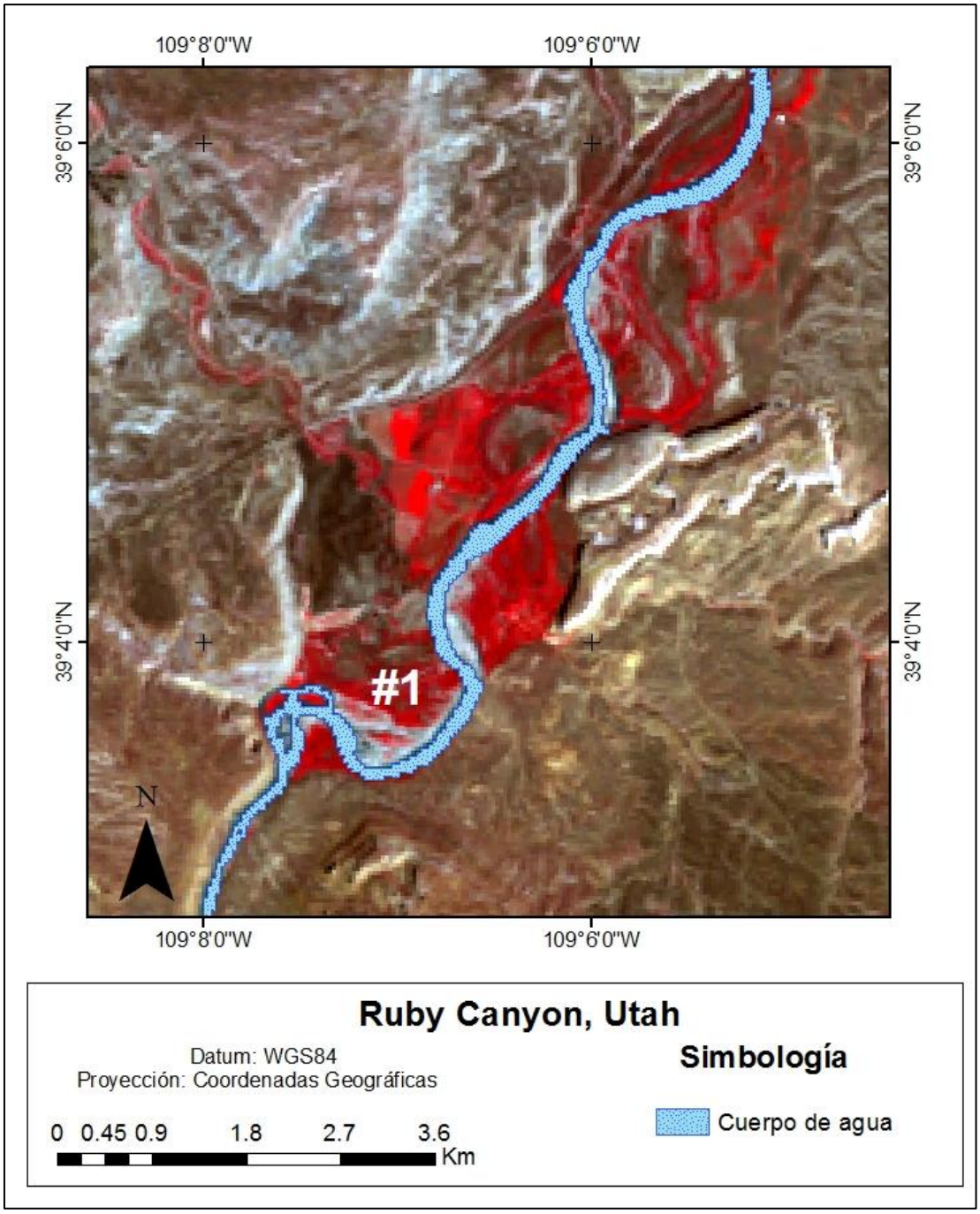


Figura A2 .4. Zona 1: Cañón de Rubí , Utah, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1987. La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

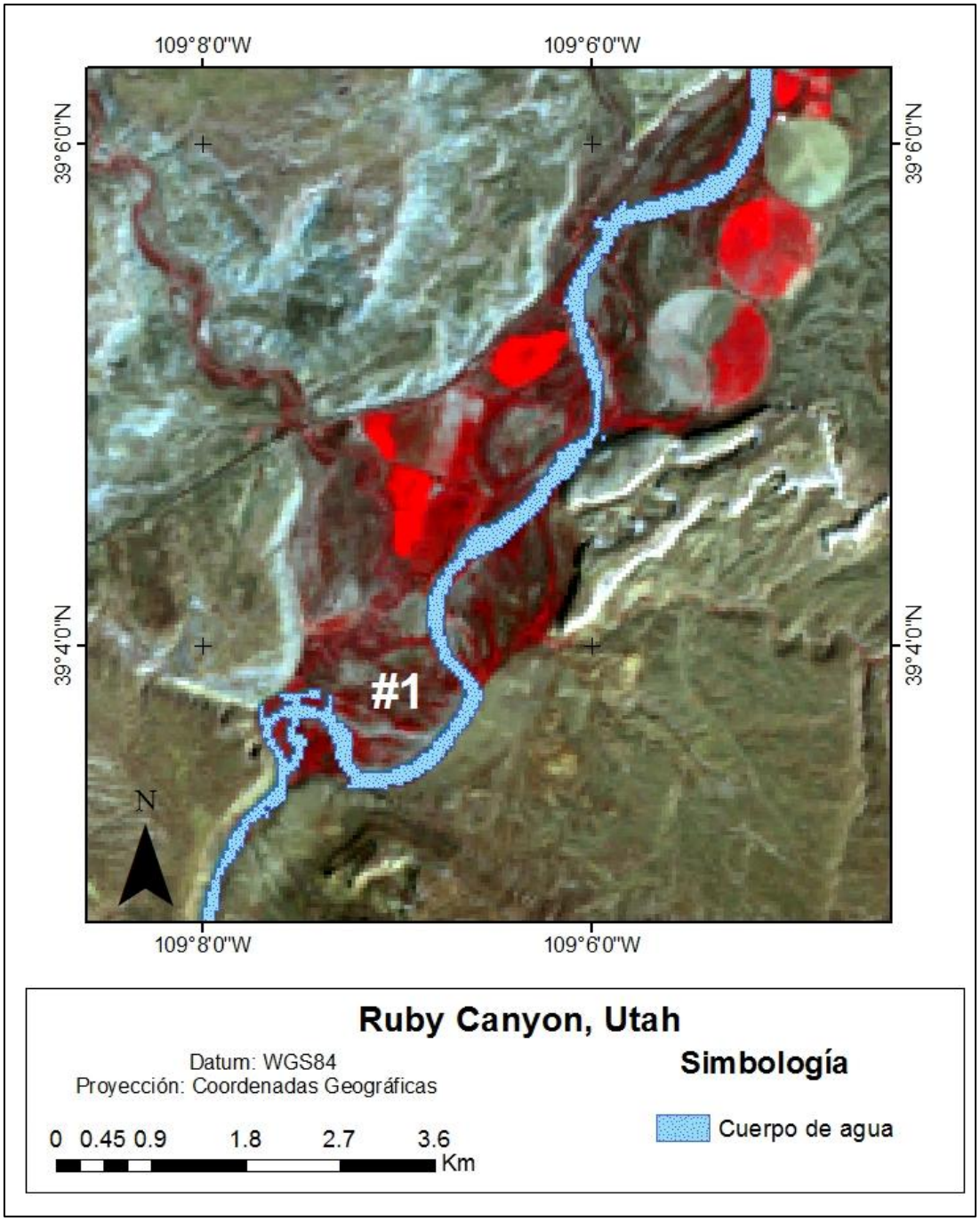


Figura A2.5. Zona 1: Cañón de Rubí , Utah, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1992 . La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

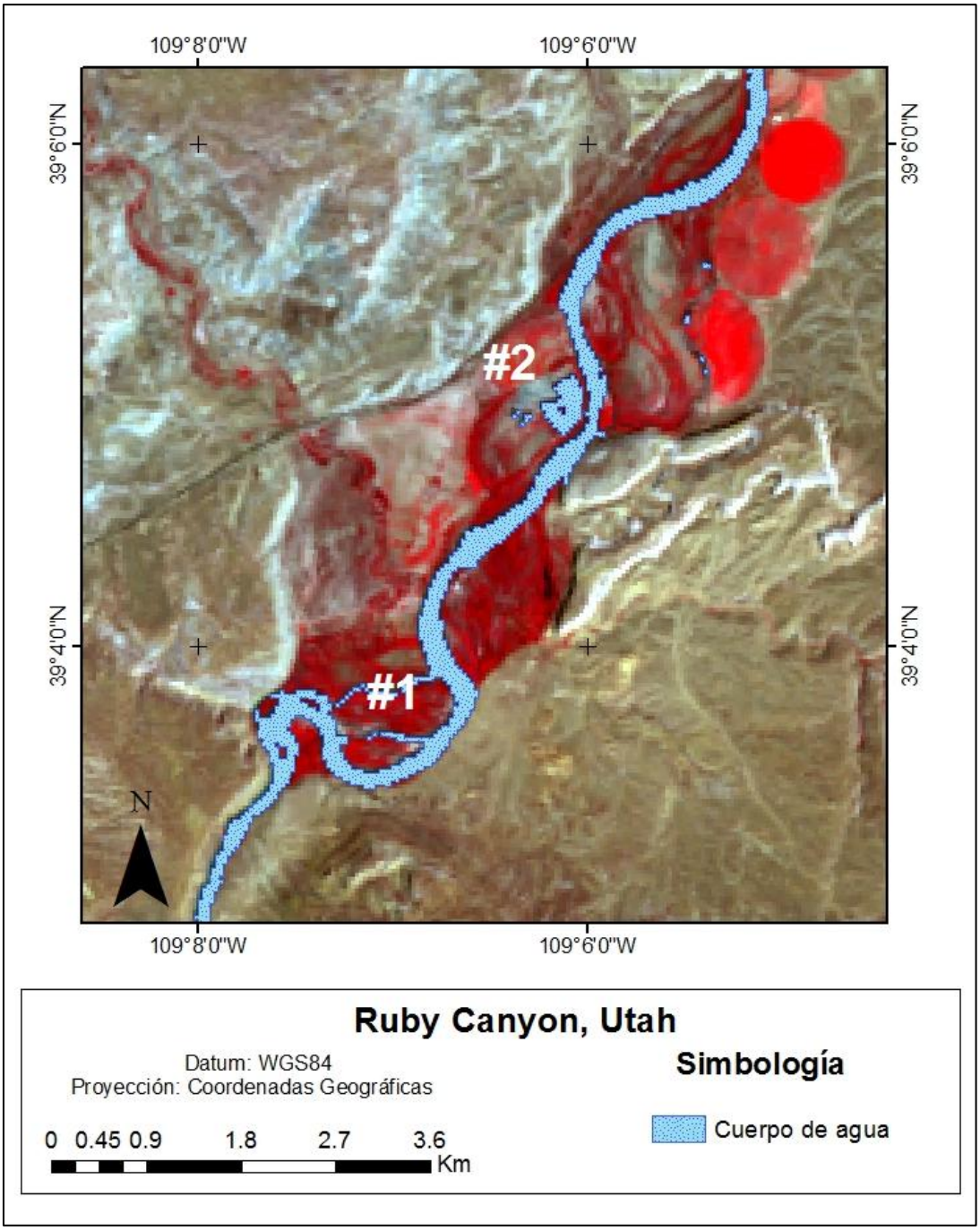


Figura A2 .6. Zona 1: Cañón de Rubí , Utah, EUA. R esultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1997 . La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

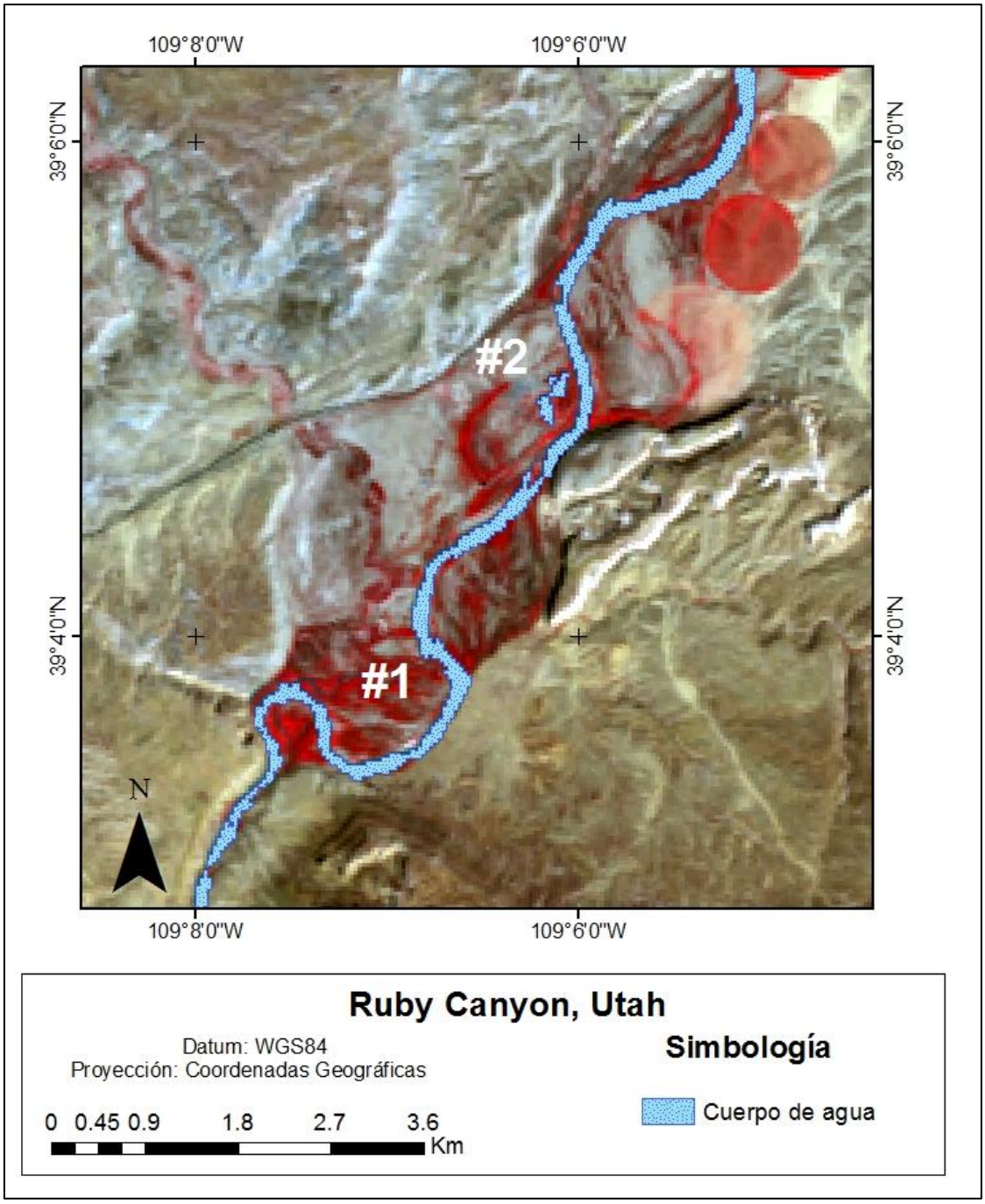


Figura A2 .7. Zona 1: Cañón de Rubí , Utah, EUA. Resultados de la identificación de los cuer pos de agua para el año 2002 . La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

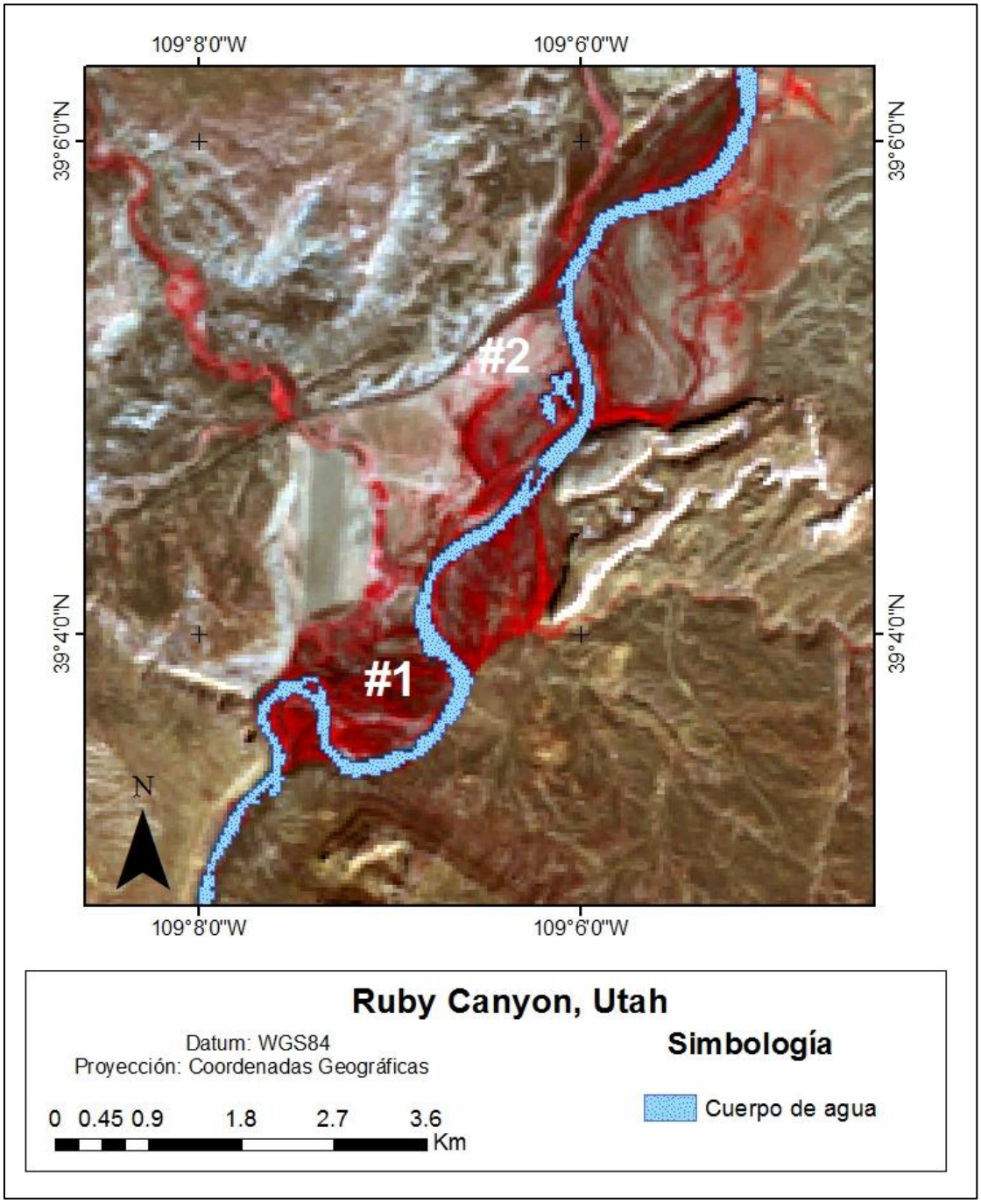


Figura A2 .8. Zona 1: Cañón de Rubí , Utah, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 2007 . La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

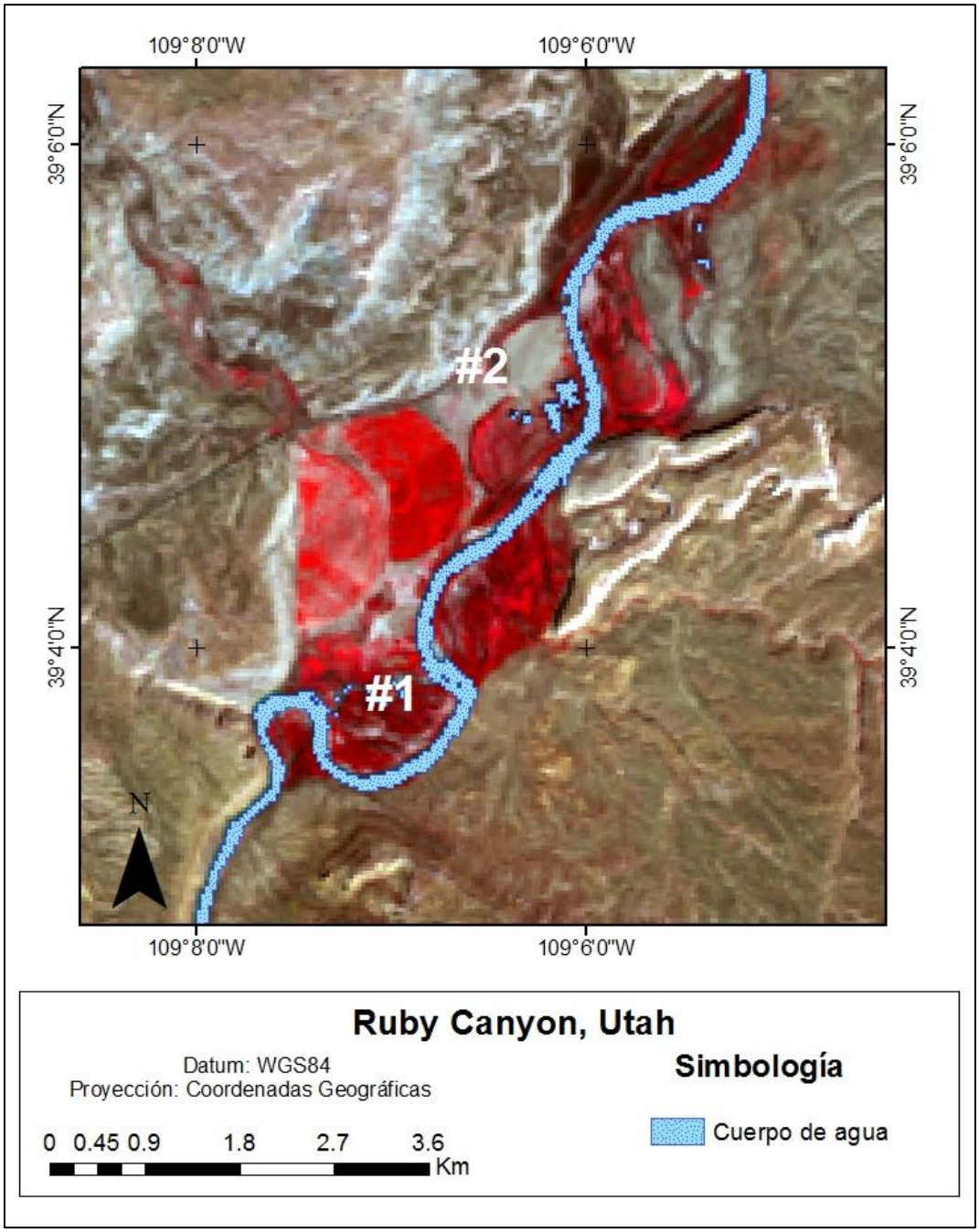


Figura A2 .9. Zona 1: Cañón de Rubí , Utah, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 2011 . La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Lands at 5 TM se está usando como fondo.

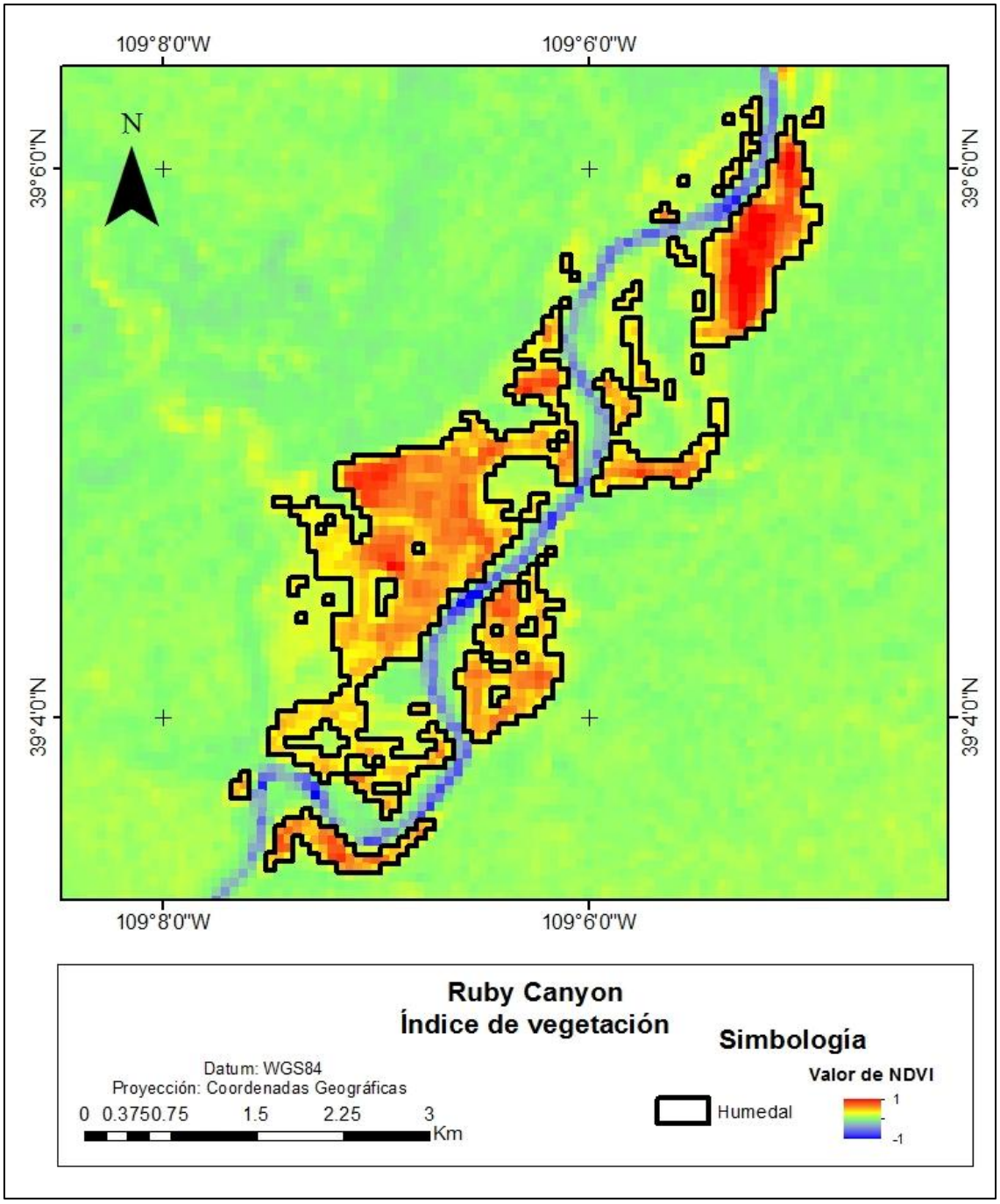


Figura A2 .10. Zona 1: Cañón de Rubí , Utah, EUA. Imagen de NDVI para el año 1972. Las área s de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 1 MSS.

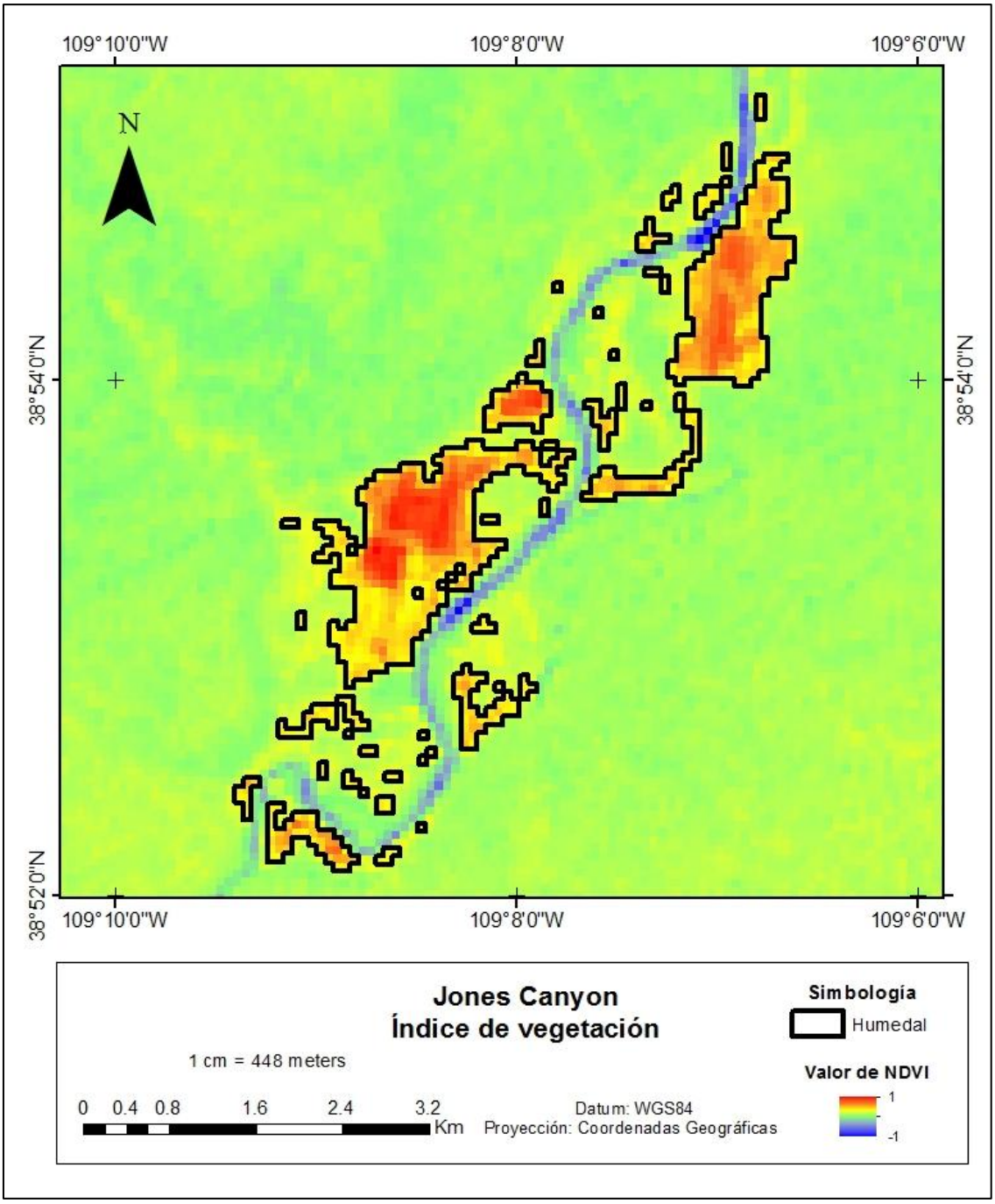


Figura A2 .11. Zona 1: Cañón de Rubí , Utah, EUA. Imagen de NDVI para el año 1977. Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 2 MSS.

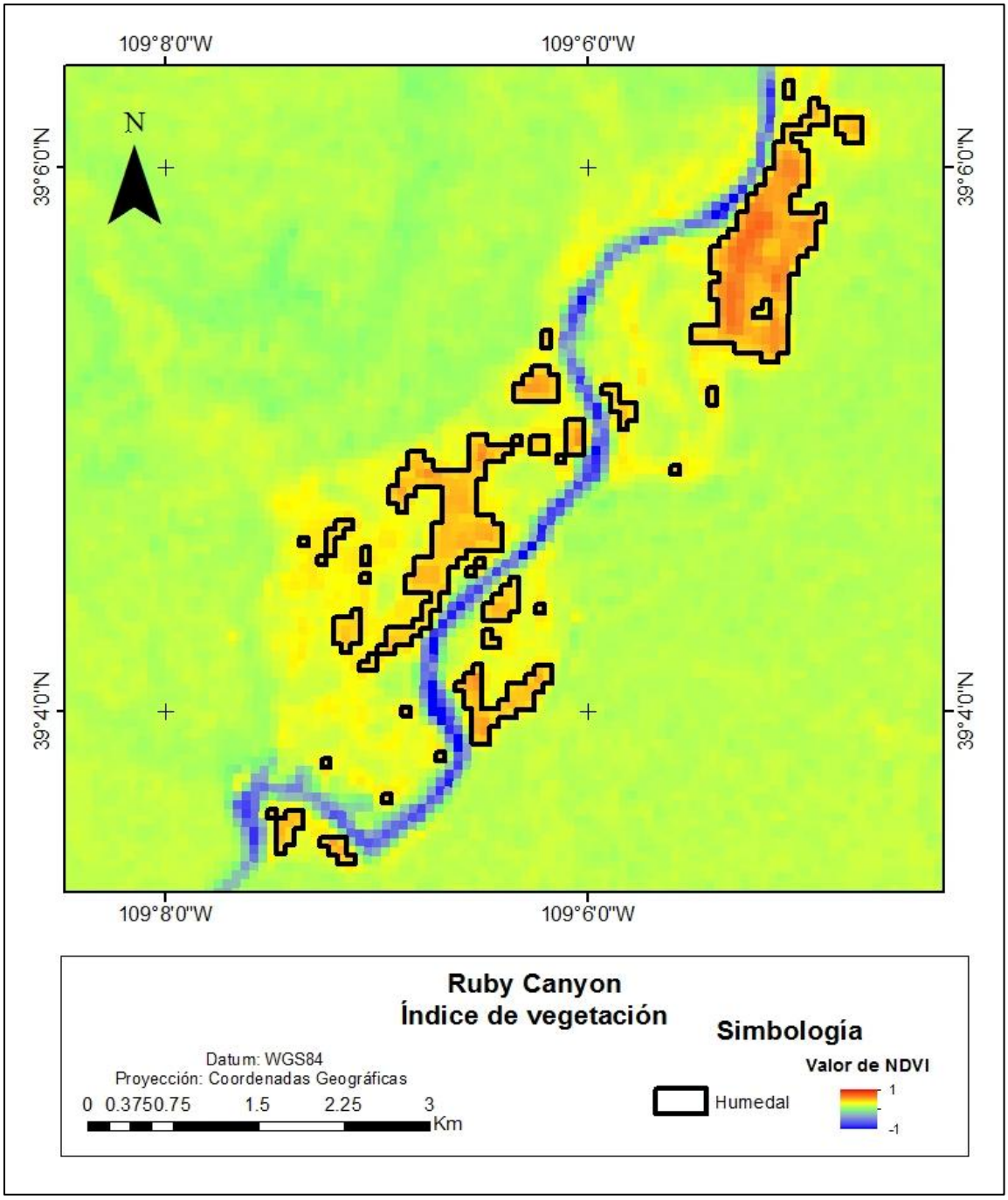


Figura A2 .12. Zona 1: Cañón de Rubí , Utah, EUA. Imagen de NDVI para el año 1982. Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 3 MSS.

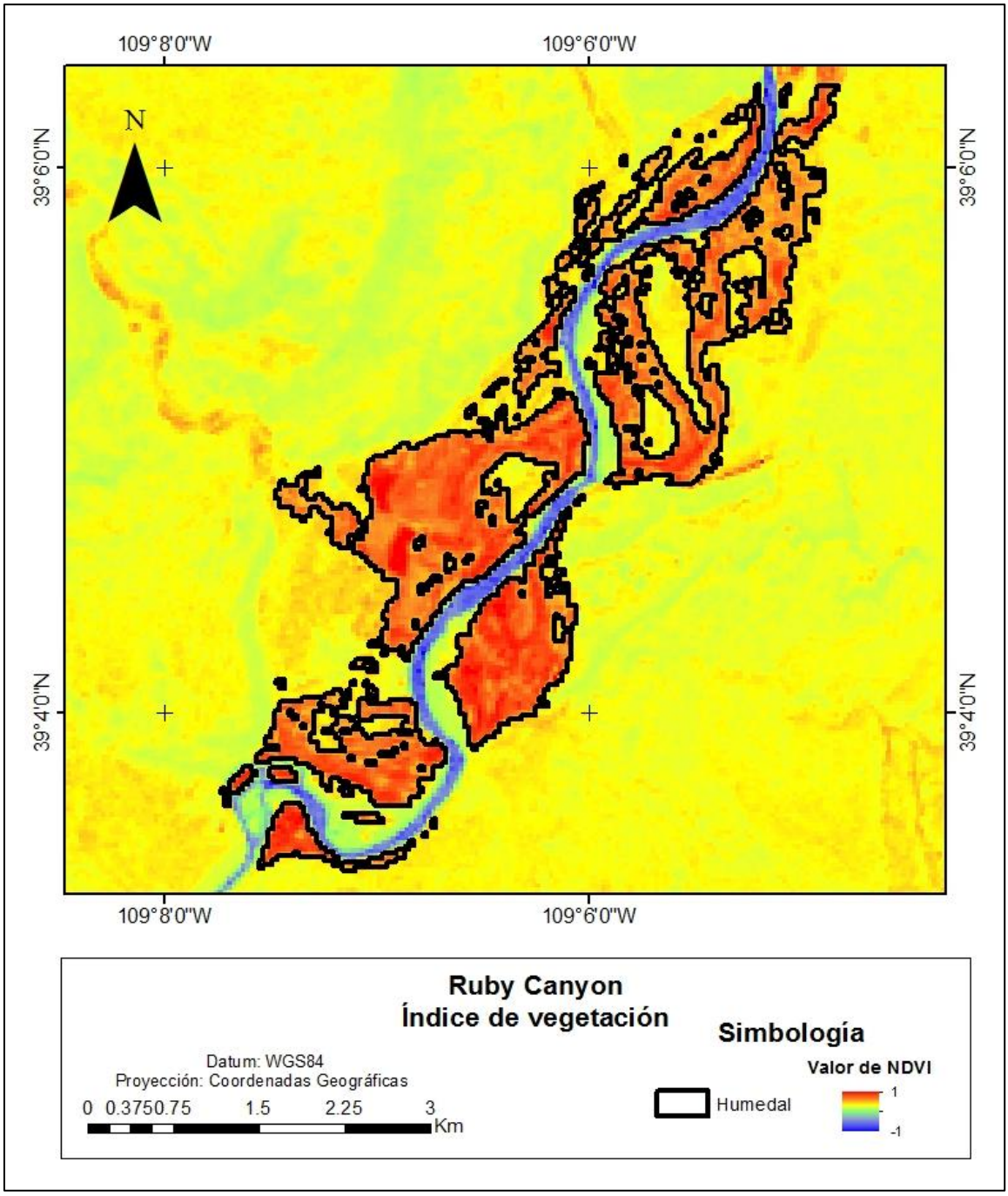


Figura A2 .13. Zona 1: Cañón de Rubí , Utah, EUA. Imagen de NDVI para el año 1987. Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 5 TM.

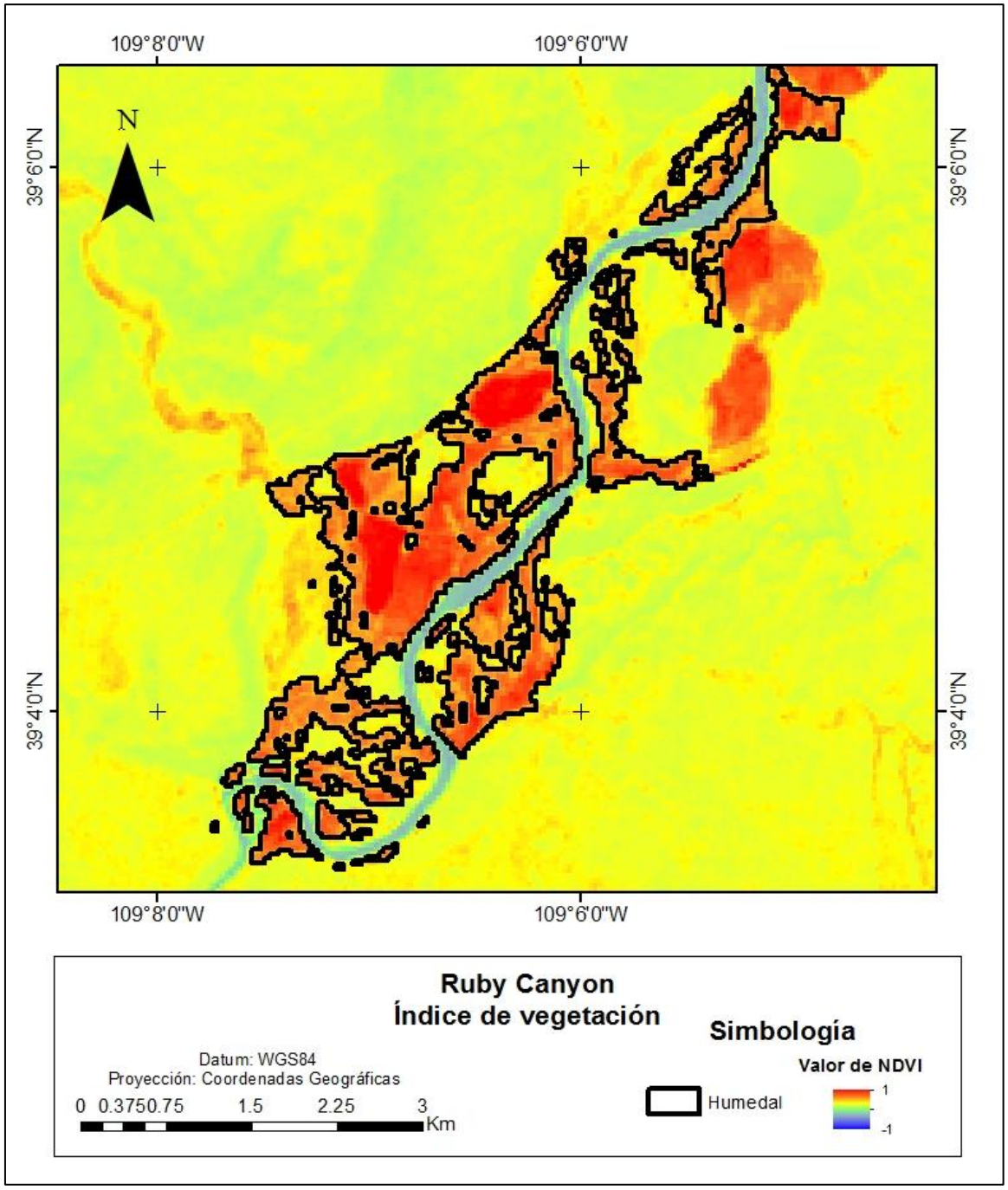


Figura A2 .14. Zona 1: Cañón de Rubí , Utah, EUA. Imagen de NDVI para el año 1992. Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a part ir de la imagen de Landsat 5 TM.

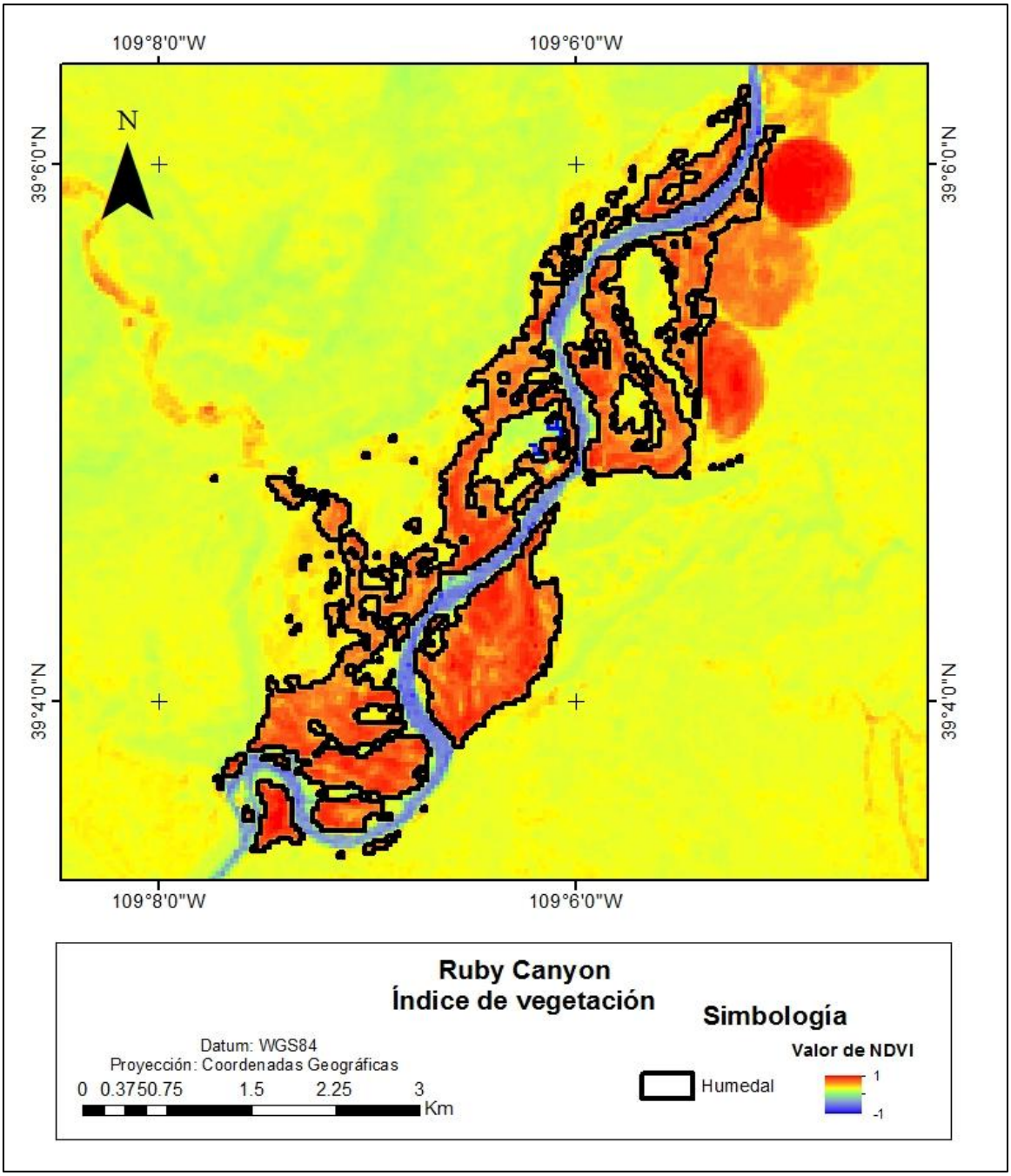


Figura A2 .15. Zona 1: Cañón de Rubí , Utah, EUA. Imagen de NDVI para el año 1997. Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 5 TM.

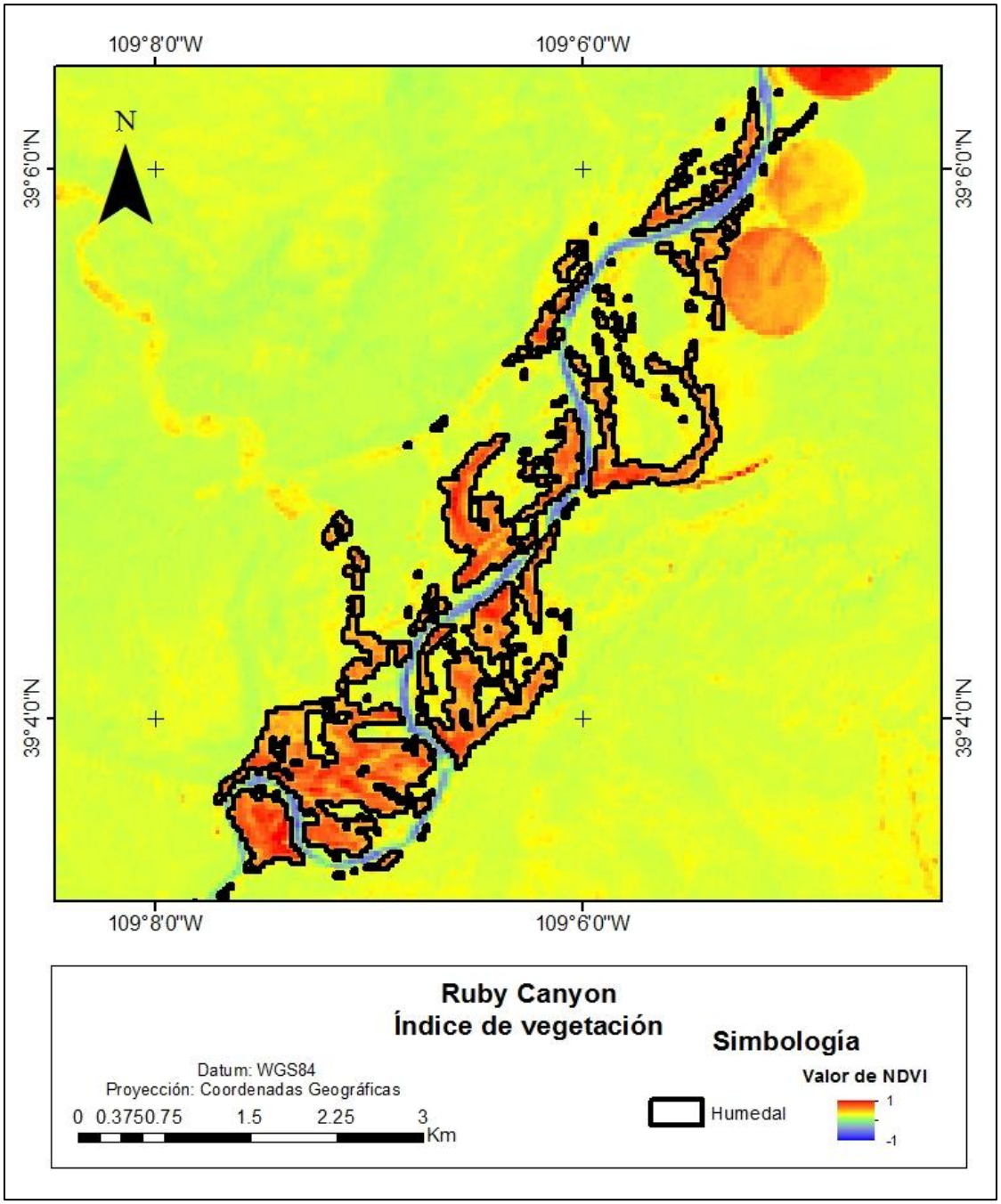


Figura A2 .16. Zona 1: Cañón de Rubí , Utah, EUA. Imagen de NDVI para el año 2002. Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectori zadas. El índice de NDVI se calculó a part ir de la imagen de Landsat 5 TM.

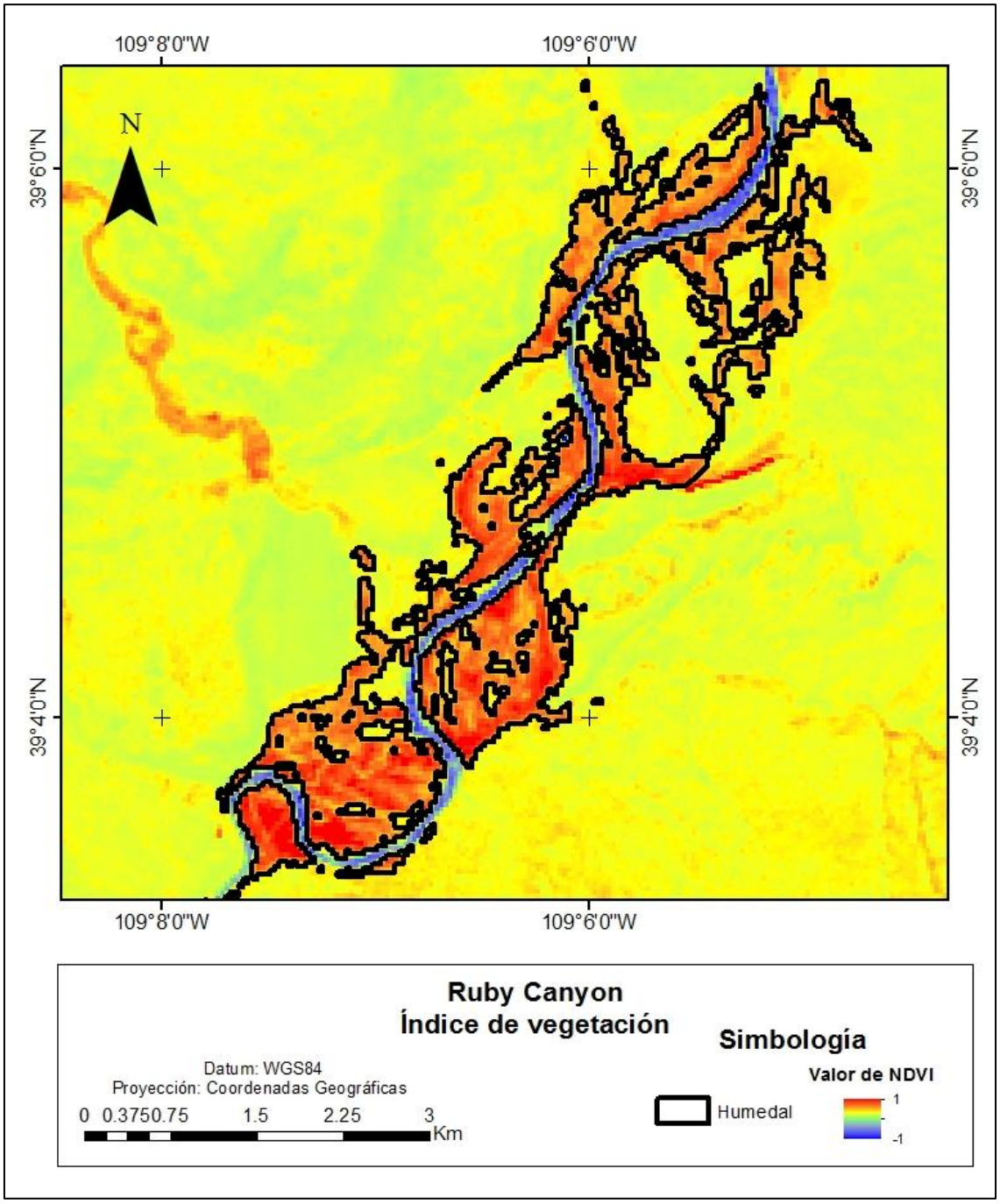


Figura A2 .17. Zona 1: Cañón de Rubí , Utah, EUA. Imagen de NDVI para el año 2007. Las área s de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas. El índice de NDVI se cal culó a part ir de la imagen de Landsat 5 TM.

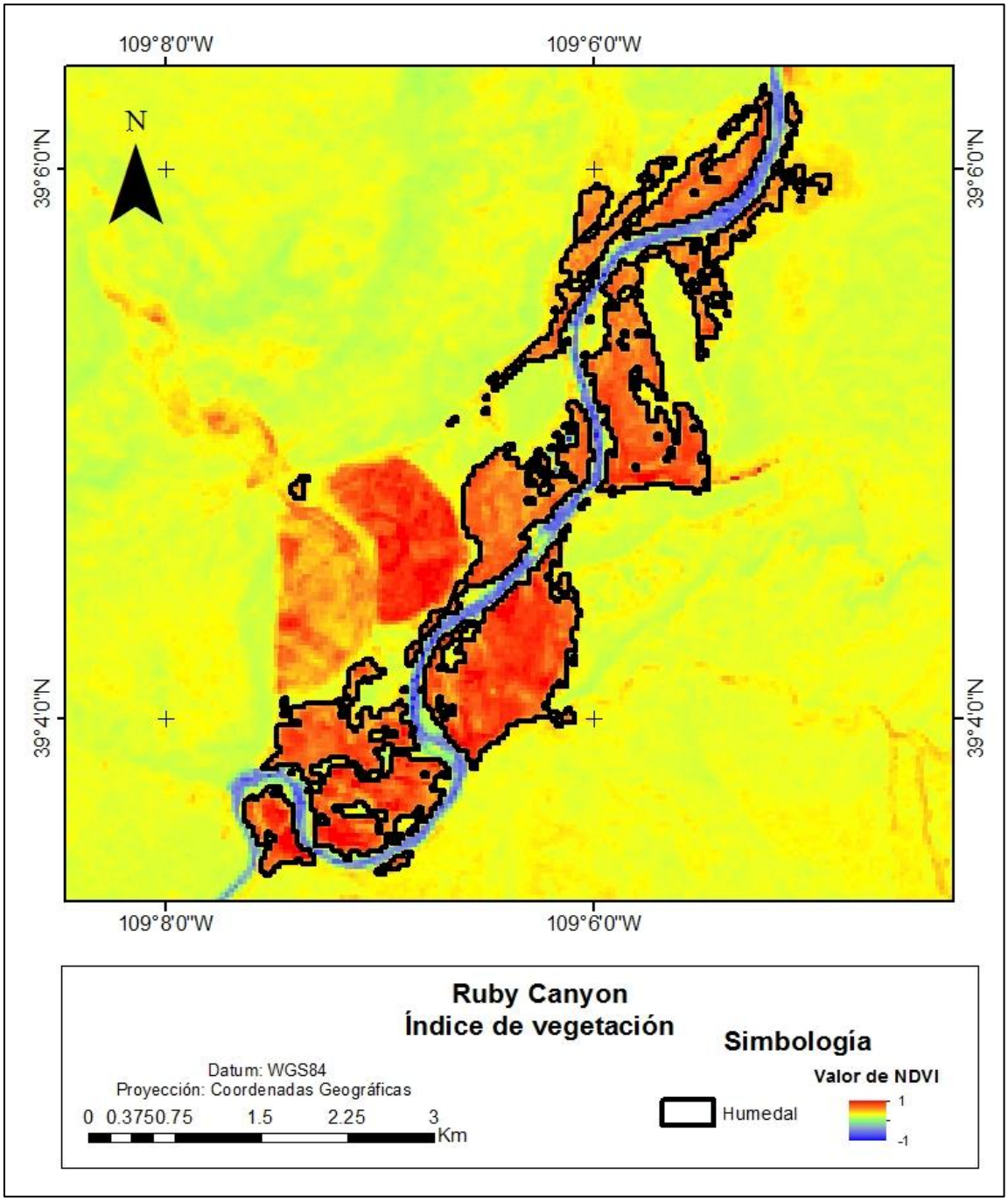


Figura A2 .18. Zona 1: Cañón de Rubí , Utah, EUA. Imagen de NDVI para el año 2011. Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 5 TM.

ANEXO 3

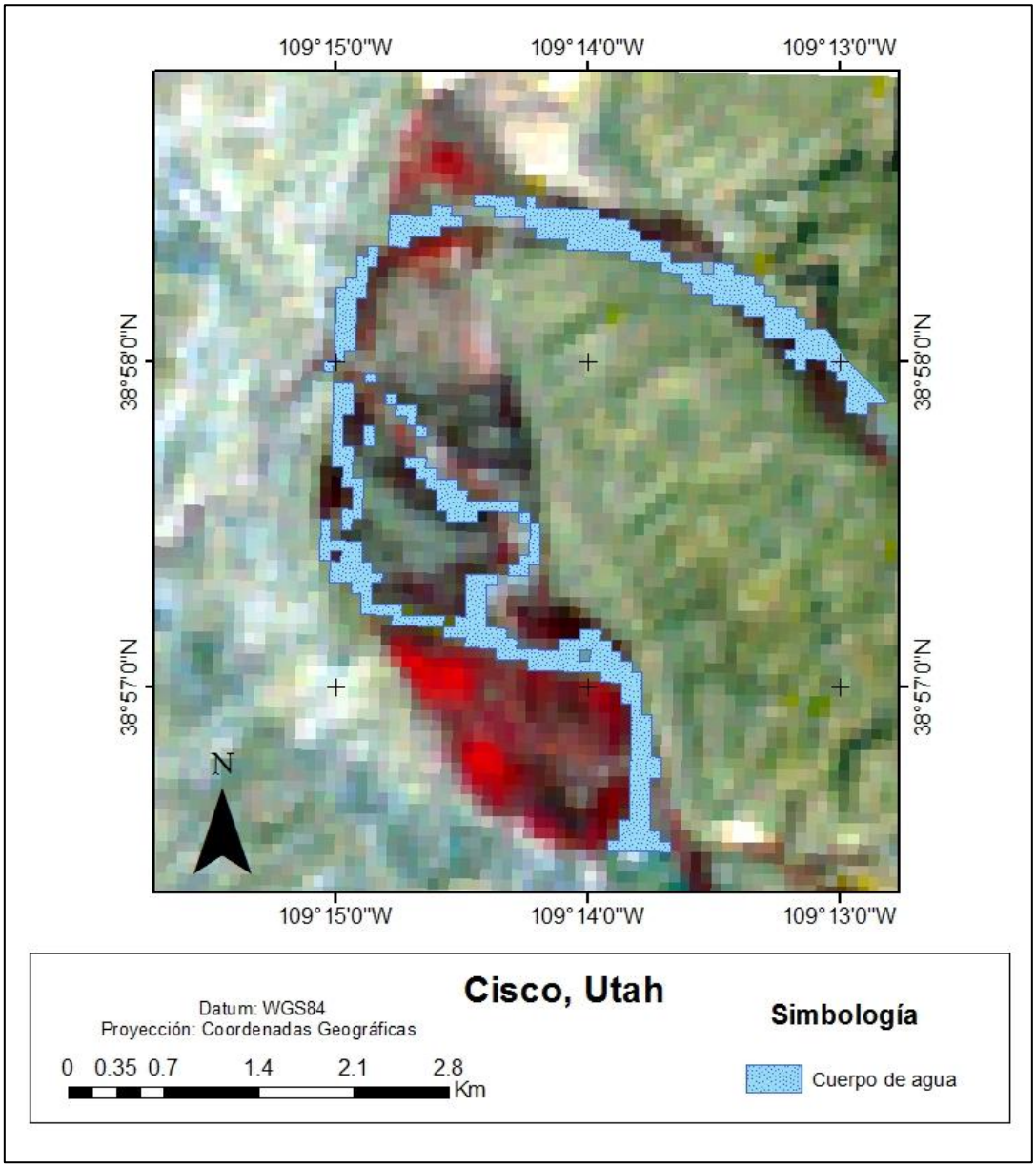


Figura A3.1. Zona 2: Cisco, Utah, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1972. La imagen en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 1 MSS se está usando como fondo.

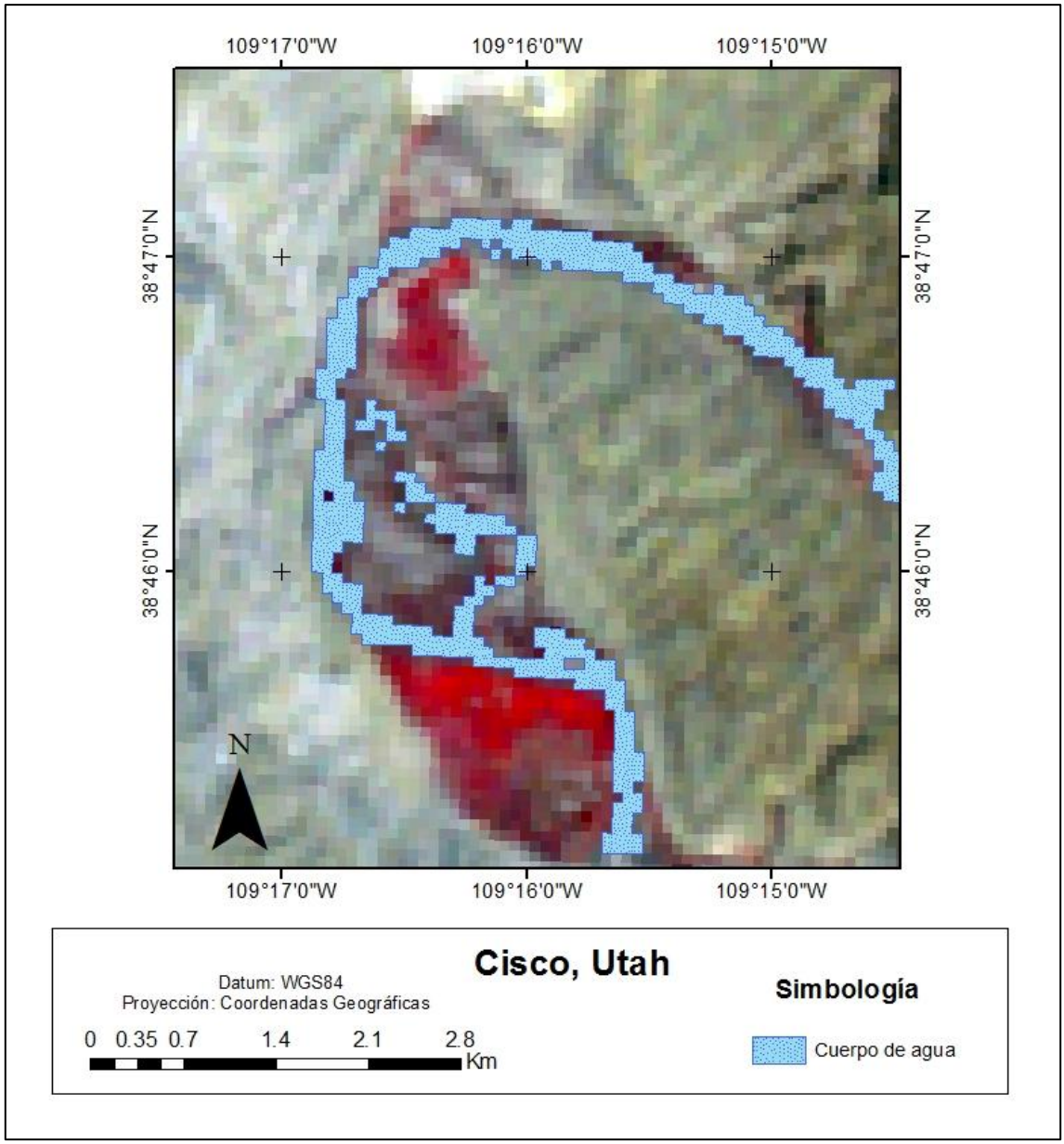


Figura A3 .2. Zona 2: Cisco, Utah, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1977 . La imagen en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 2 MSS se está usando como fondo.

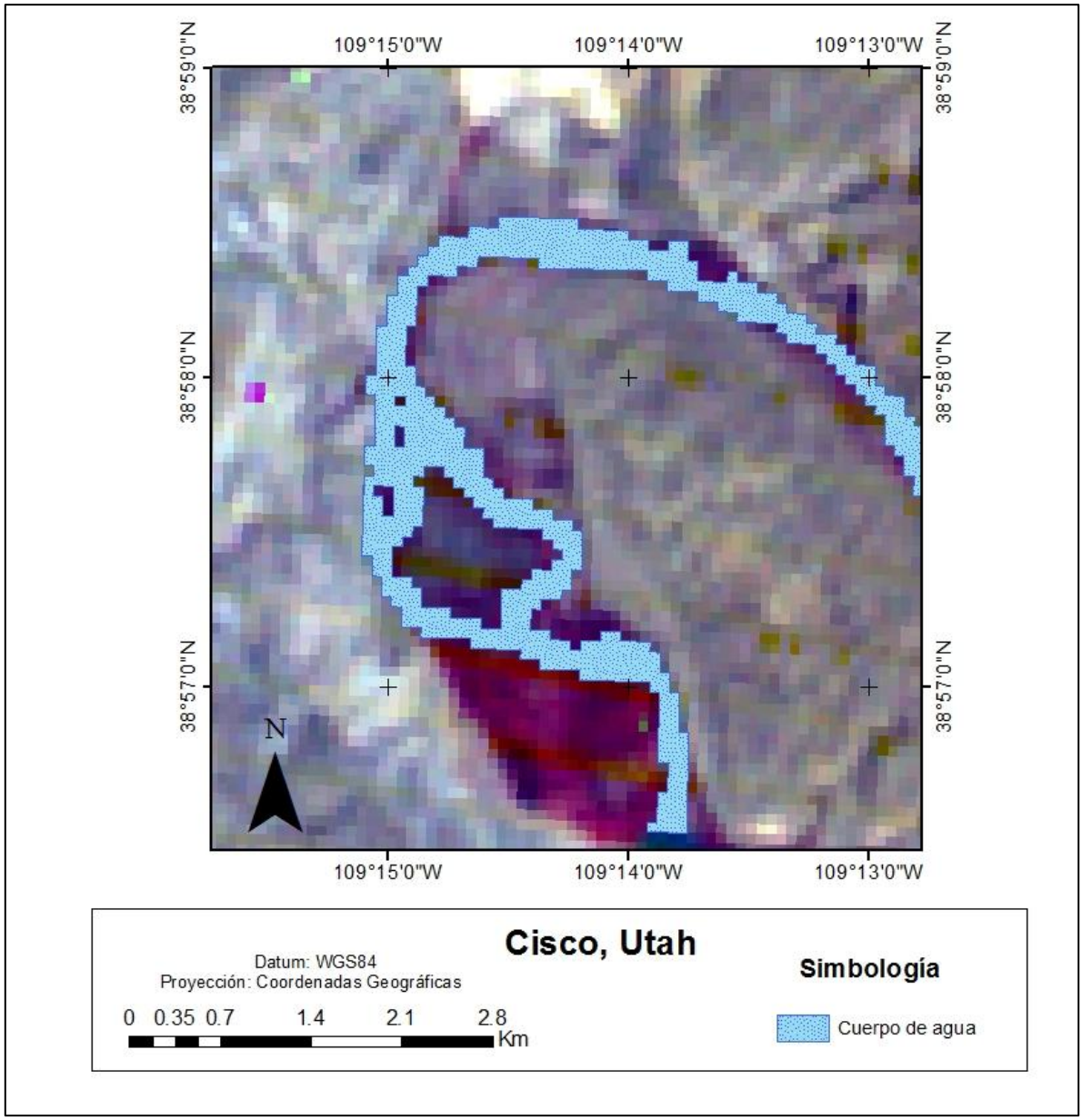


Figura A3 .3. Zona 2: Cisco, Utah, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 198 2. La imagen en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 3 MSS se está usando como fondo.

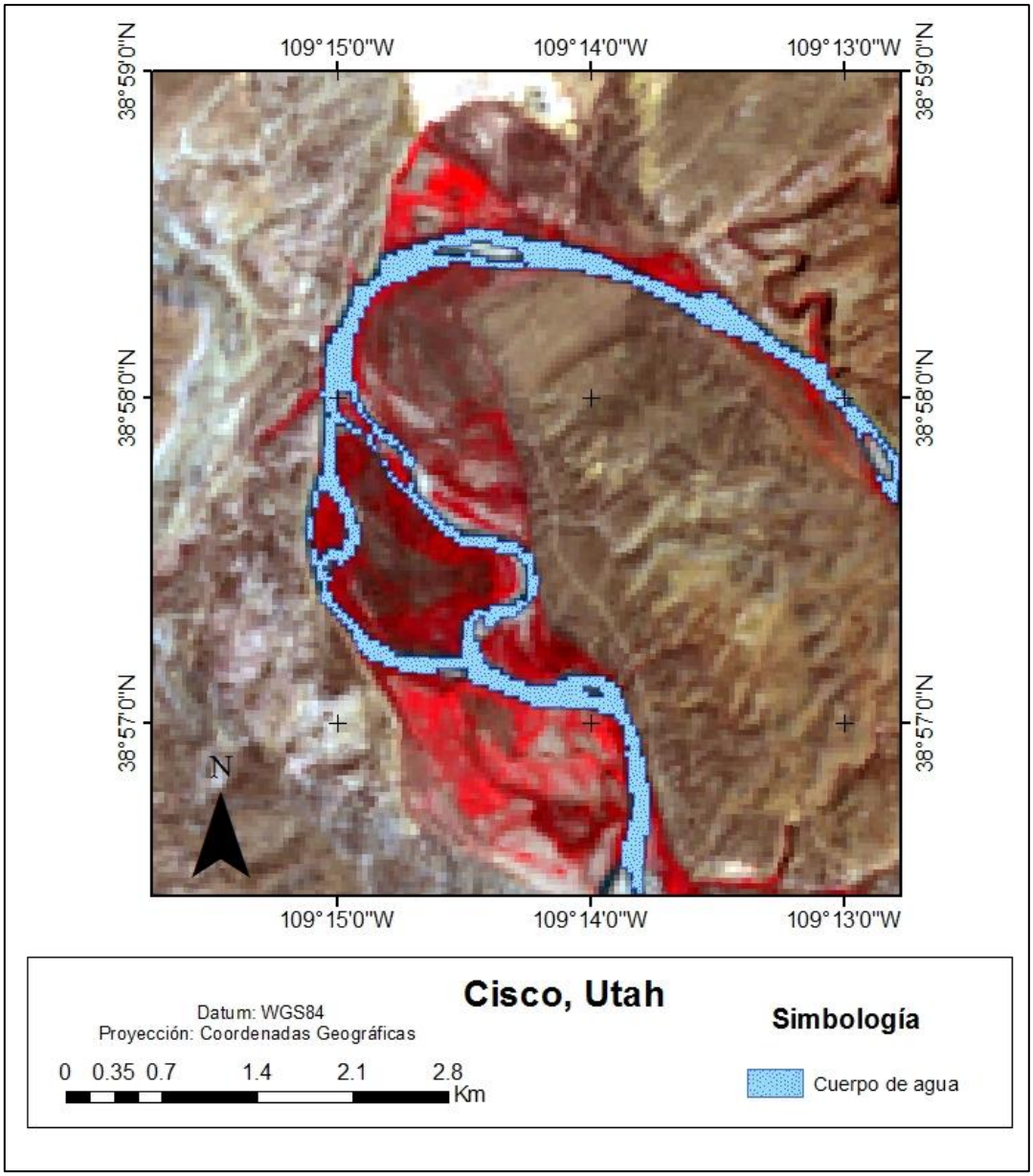


Figura A3.4 . Zona 2: Cisco, Utah, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1987 . La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

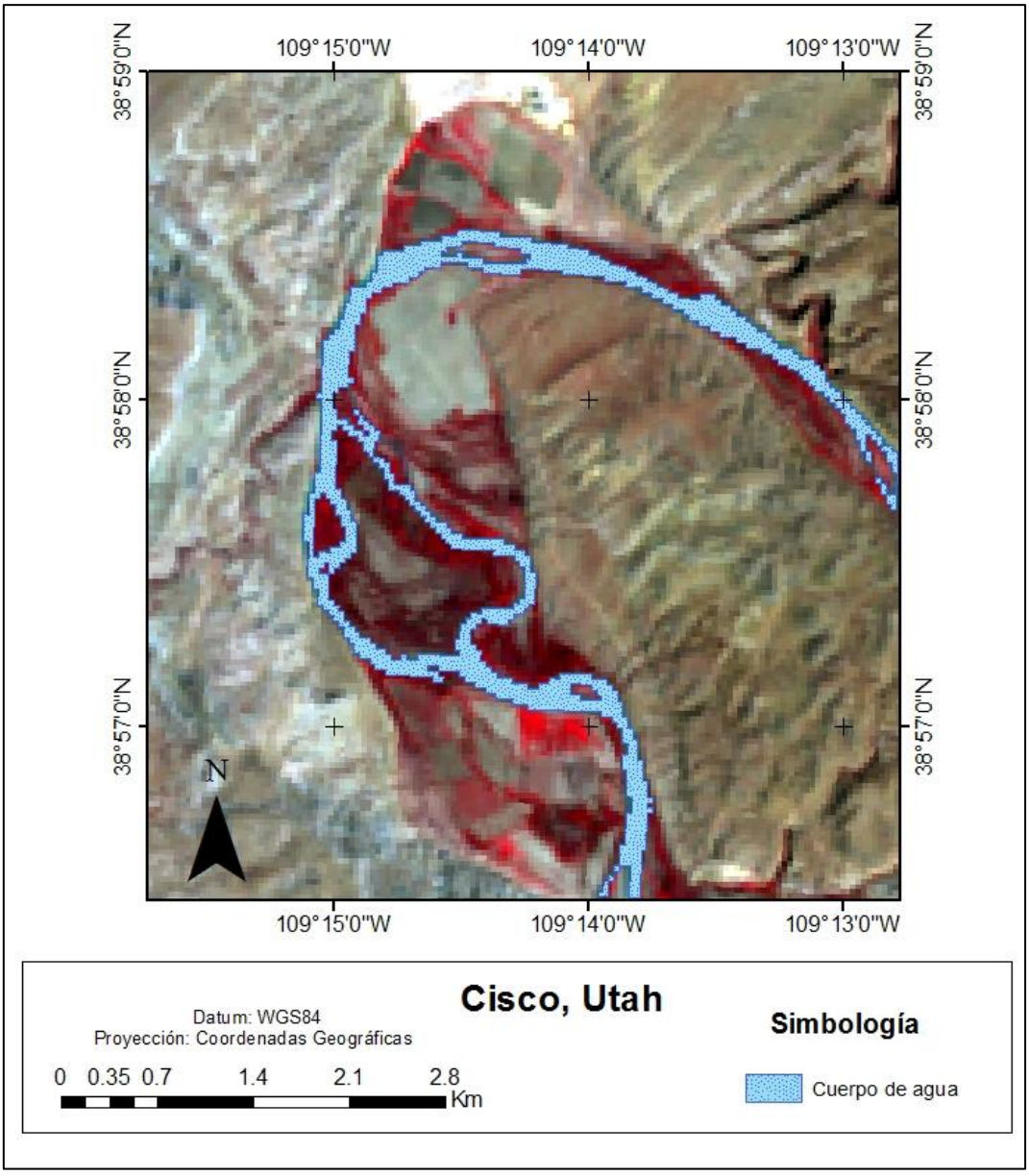


Figura A3.5 . Zona 2: Cisco, Utah, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1992 . La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsa t 5 TM se está usando como fondo.

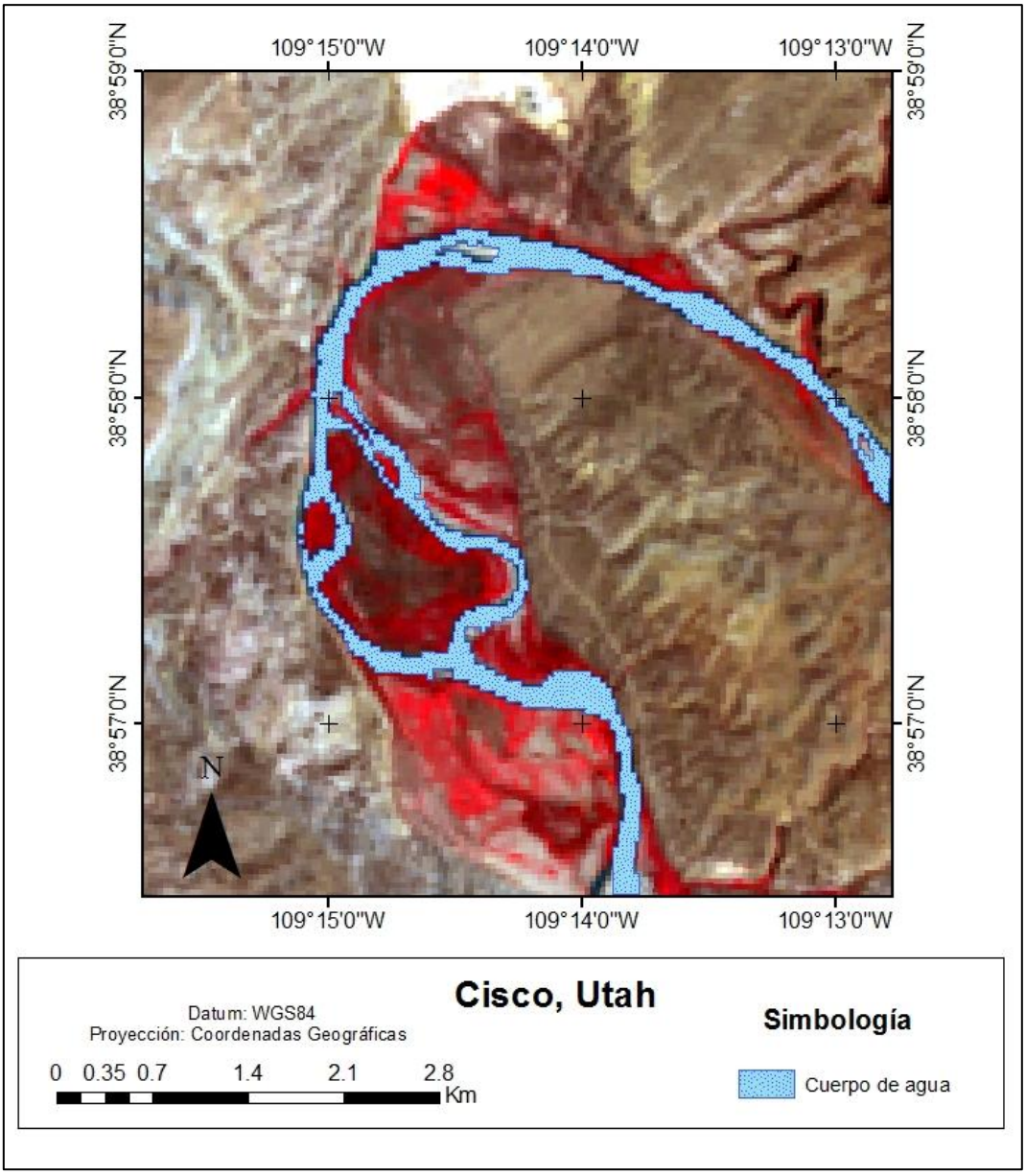


Figura A3.6 . Zona 2: Cisco, Utah, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1997 . La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

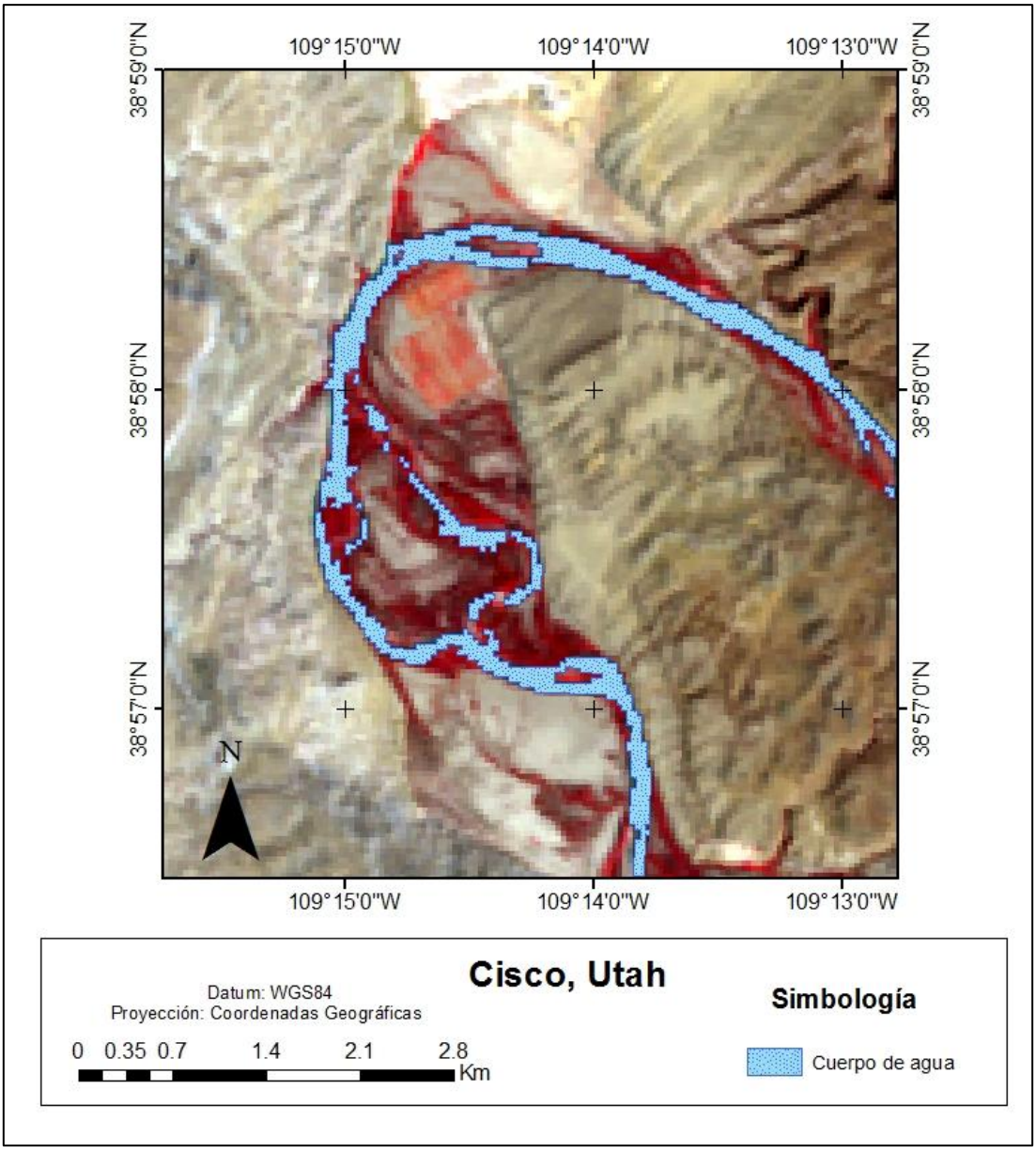


Figura A3.7 . Zona 2: Cisco, Utah, EUA .Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 2002 . La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

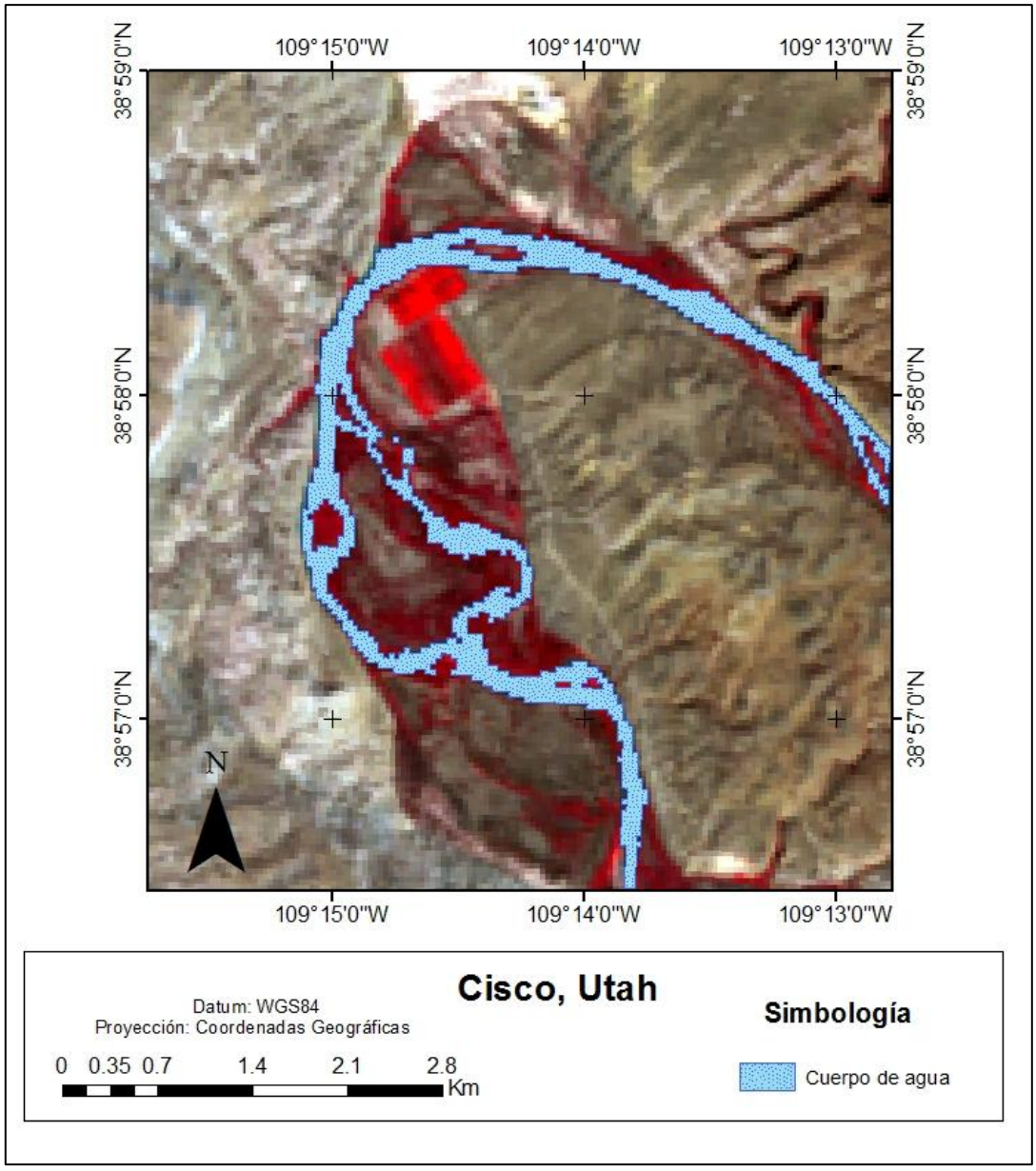


Figura A 3.8. Zona 2: Cisco, Utah, EUA. Resultados de la iden tificación de los cuerpos de agua para el año 2007 . La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo. .

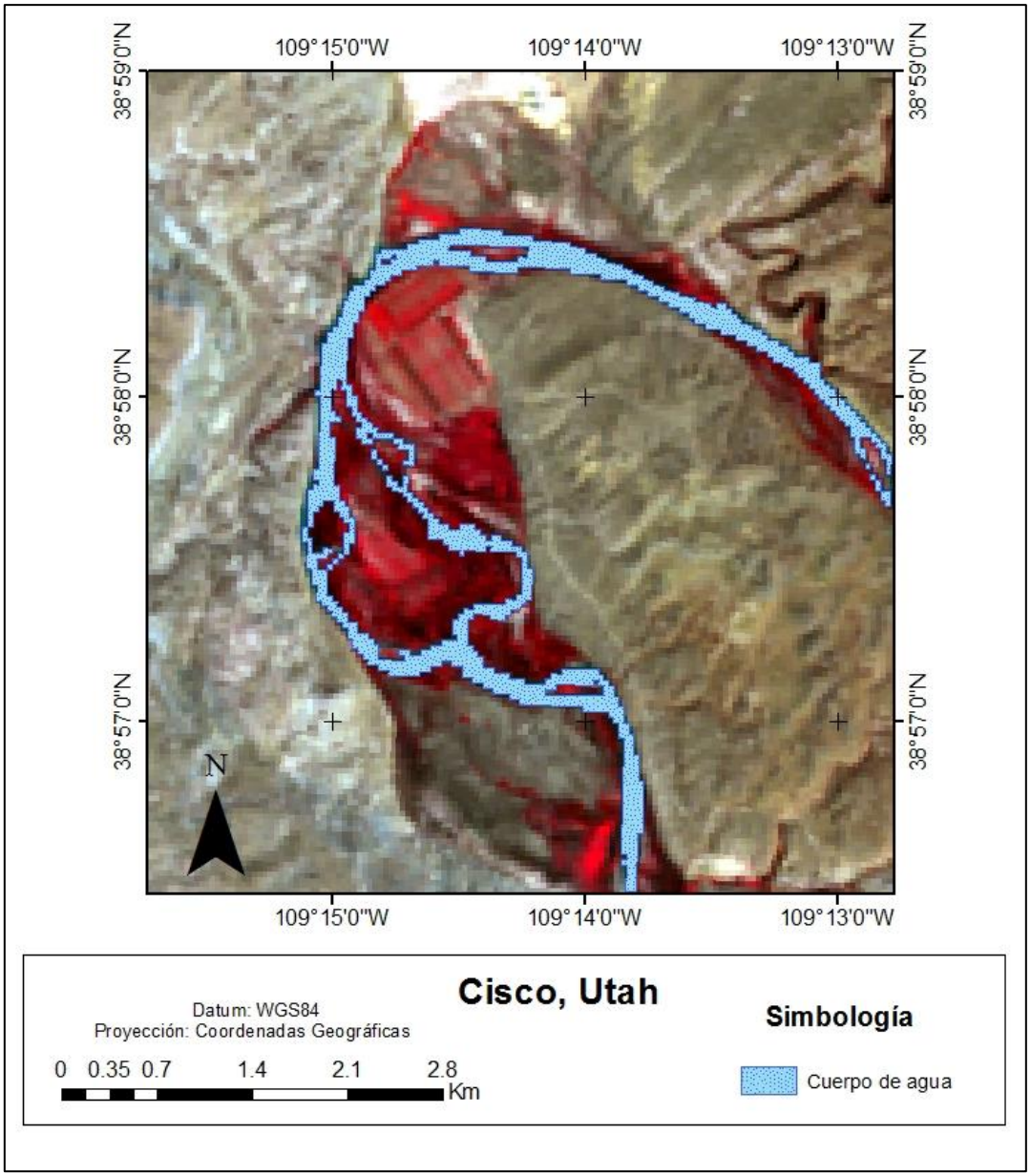


Figura A3.9 . Zona 2: Cisco, Utah, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 201 1. La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

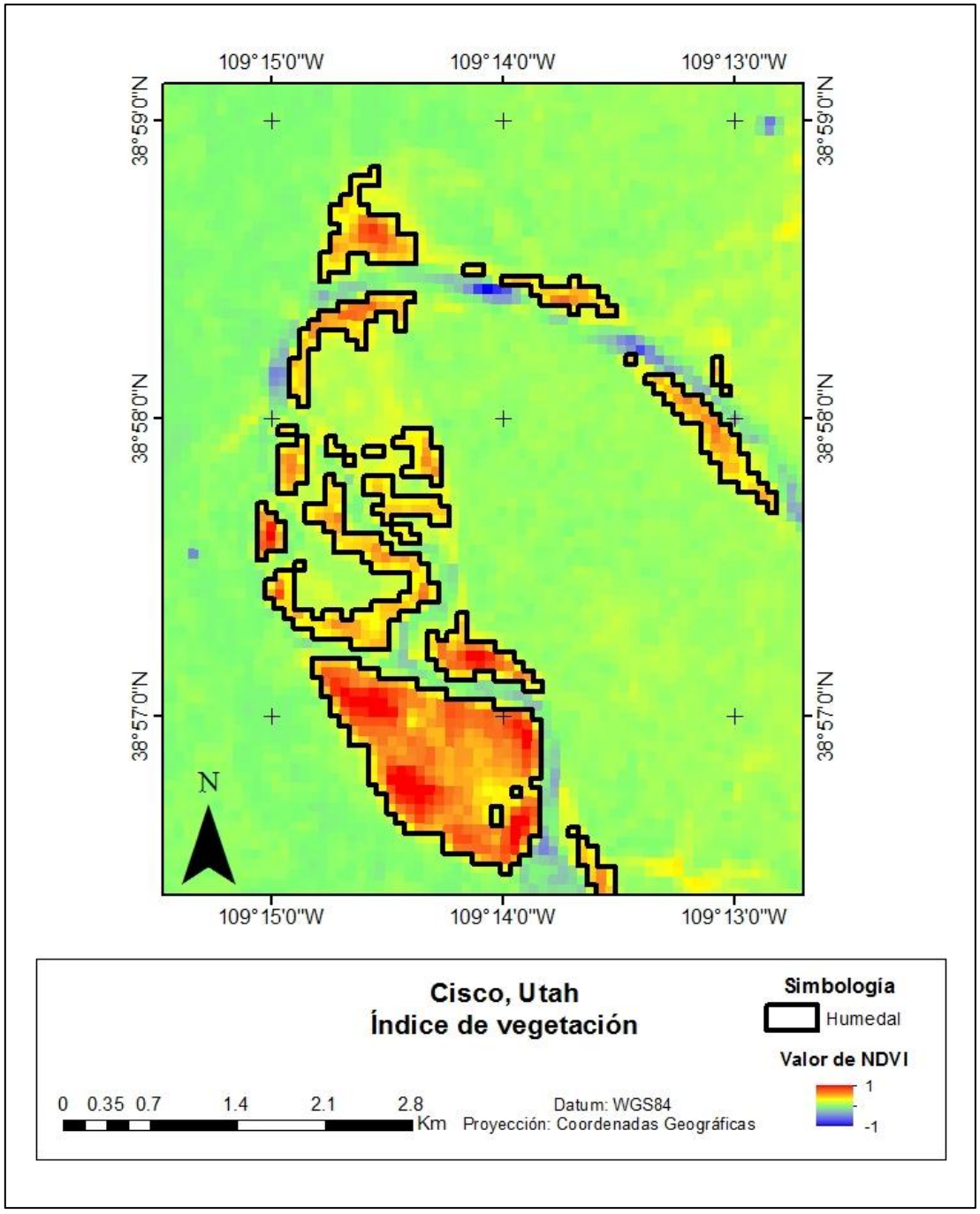


Figura A3.10 Zona 2: Cisco, Utah, EUA. Imagen de NDVI para el año 1972. Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 1 MSS.

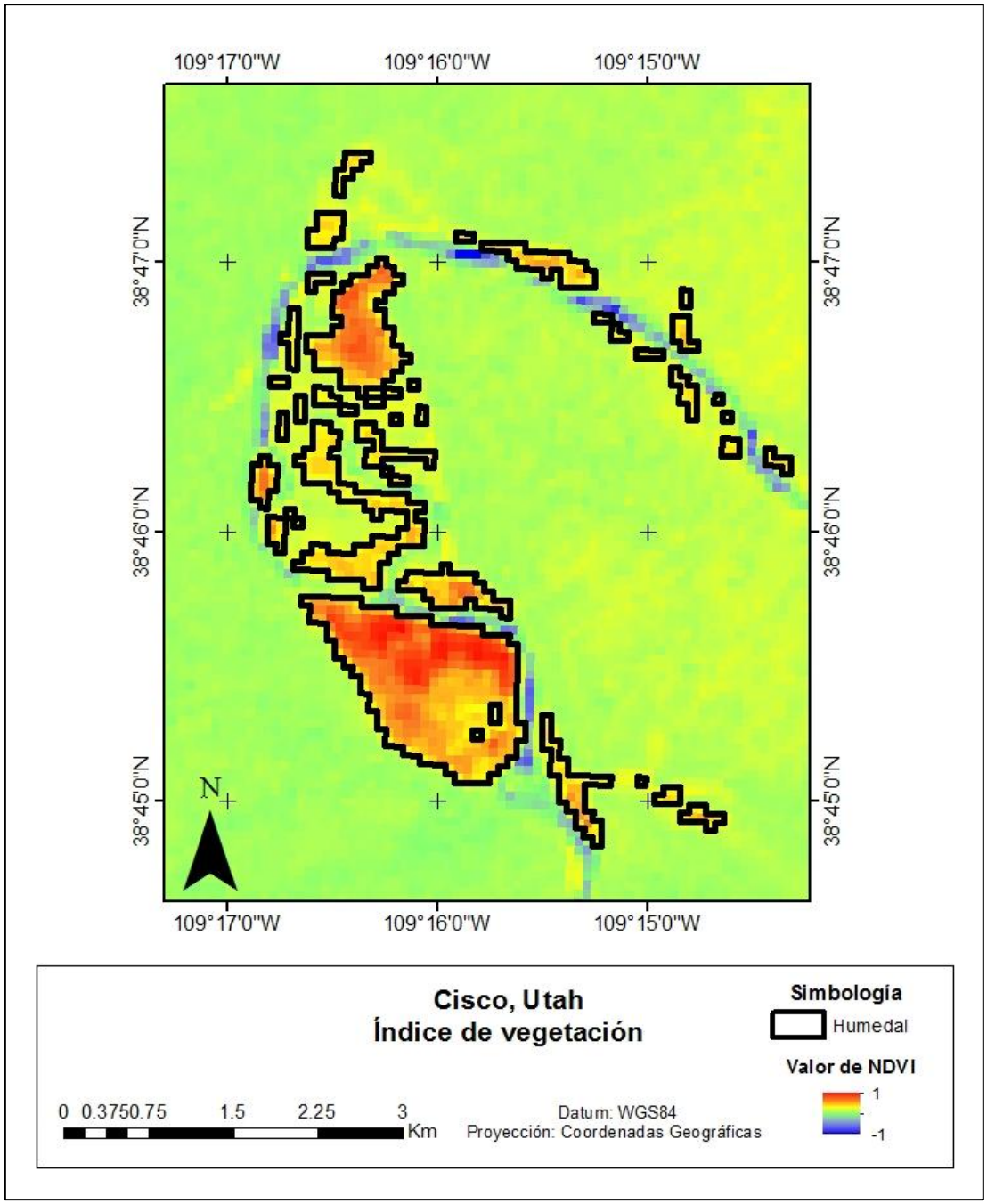


Figura A3.11 . Zona 2: Cisco, Utah, EUA. Imagen de NDVI para el año 1977. Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de La ndsat 2 MSS.

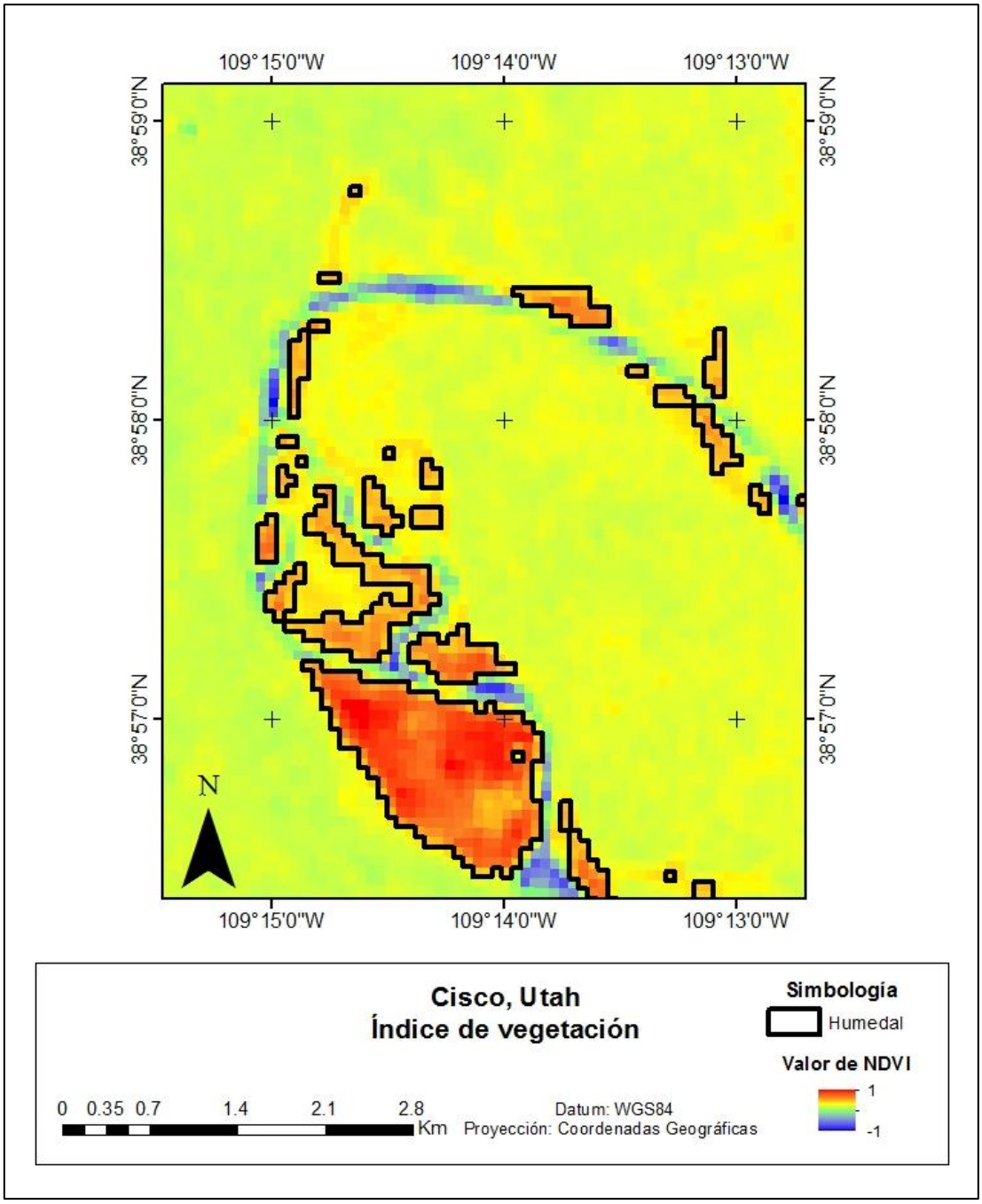


Figura A 3.12. Zona 2: Cisco, Utah, EUA. Imagen de NDVI para el año 198 2. Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 3 MSS..

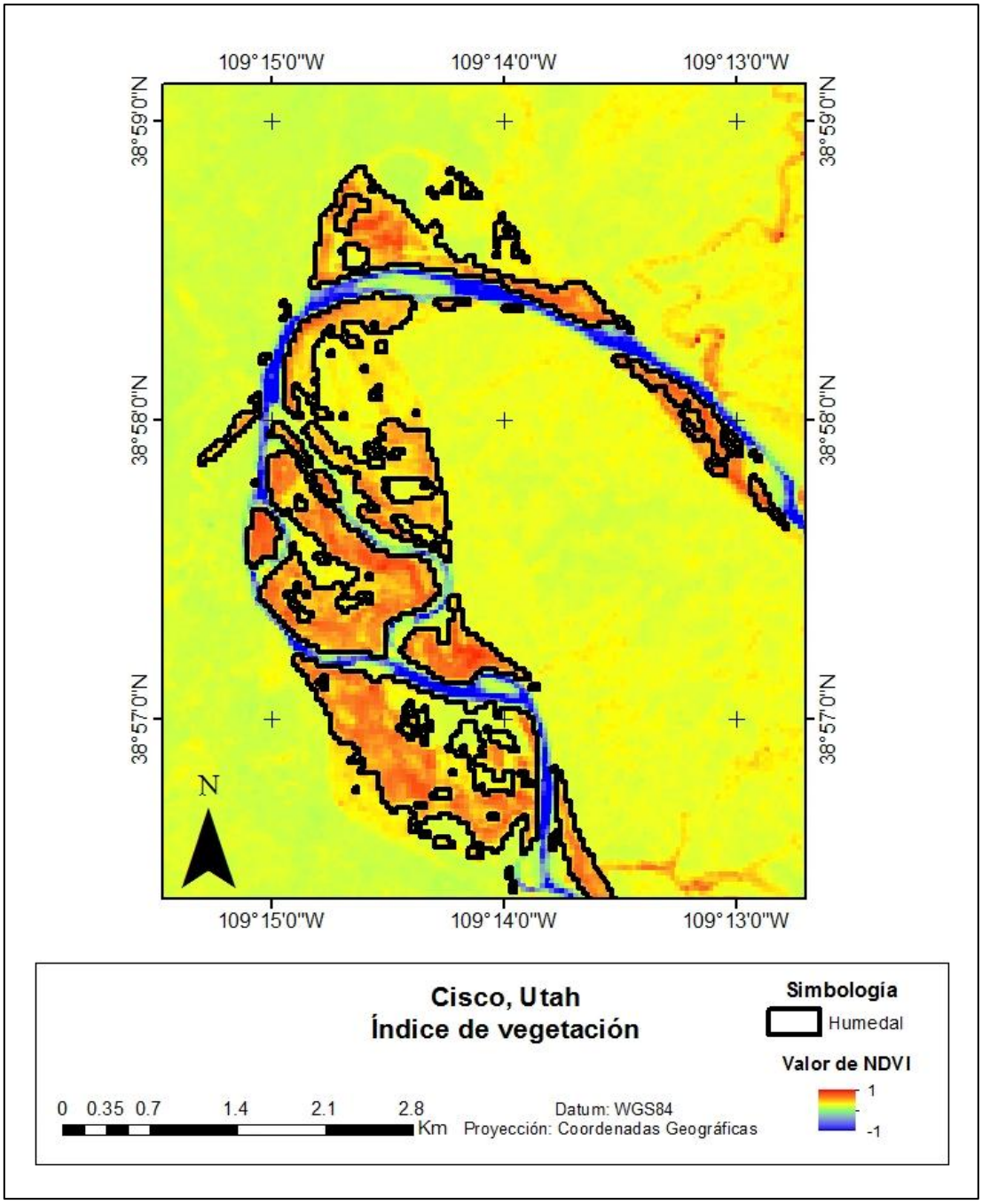


Figura A 3.13. Zona 2: Cisco, Utah, EUA. Imagen de NDVI para el año 1987 . Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a part ir de la imagen de Landsat 5 TM .

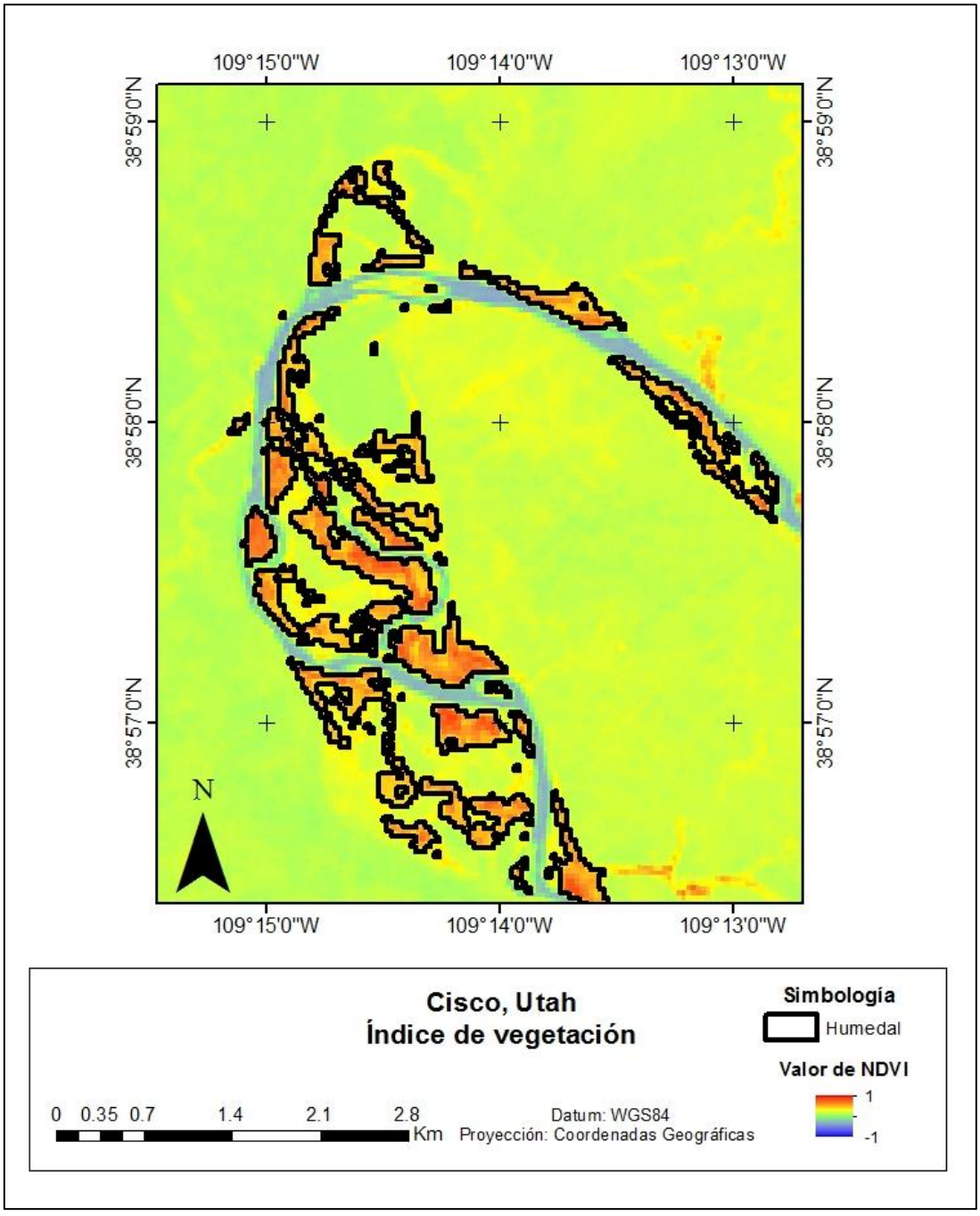


Figura A 3.14. Zona 2: Cisco, Utah, EUA. Imagen de NDVI para el año 1992. Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a part ir de la imagen de Landsat 5 TM .

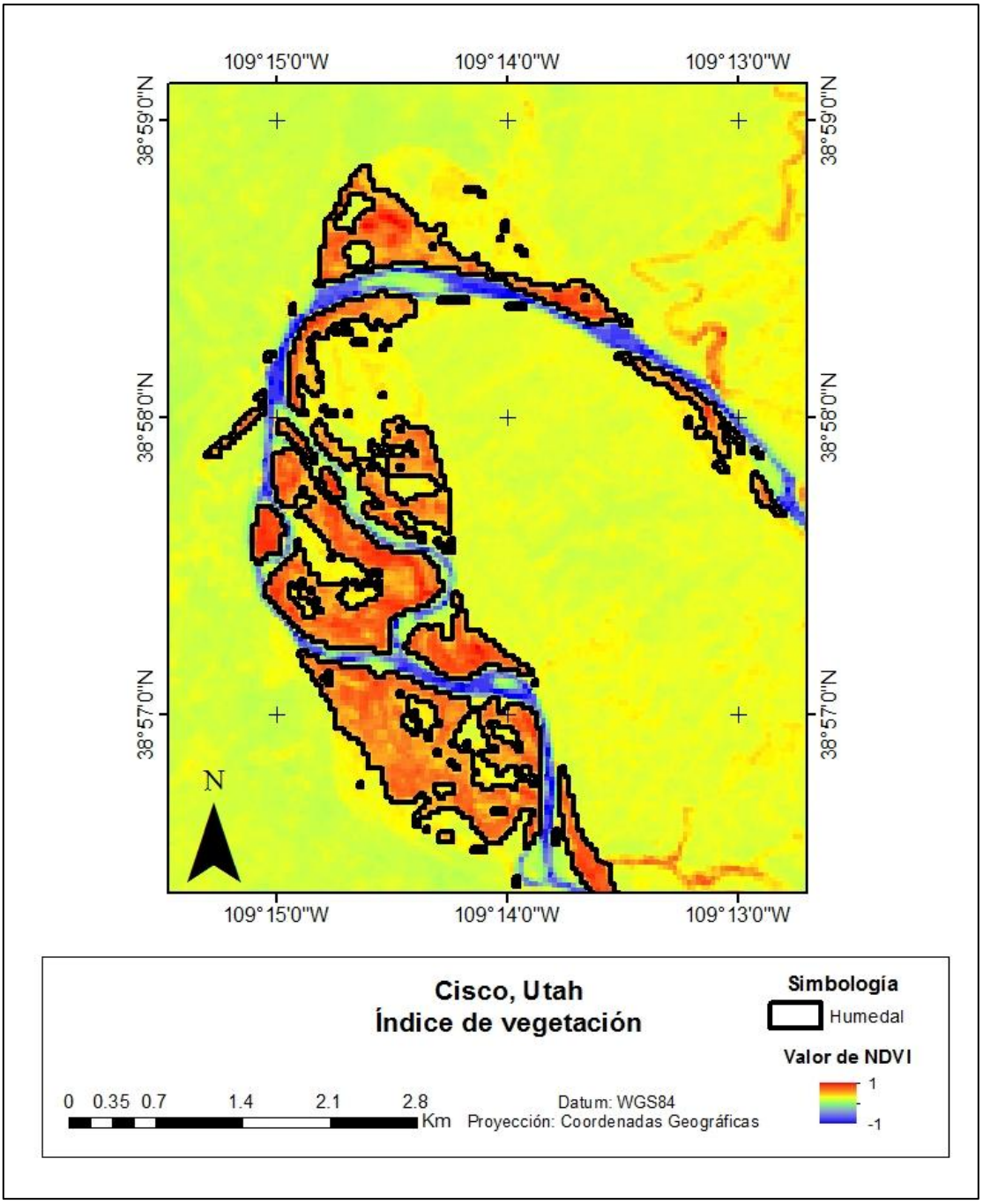


Figura A3.15 . Zona 2: Cisco, Utah, EUA. Imagen de NDVI para el año 1997 . Las áreas de la cubierta ve getal de los humedales están vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a part ir de la imagen de Landsat 5 TM .

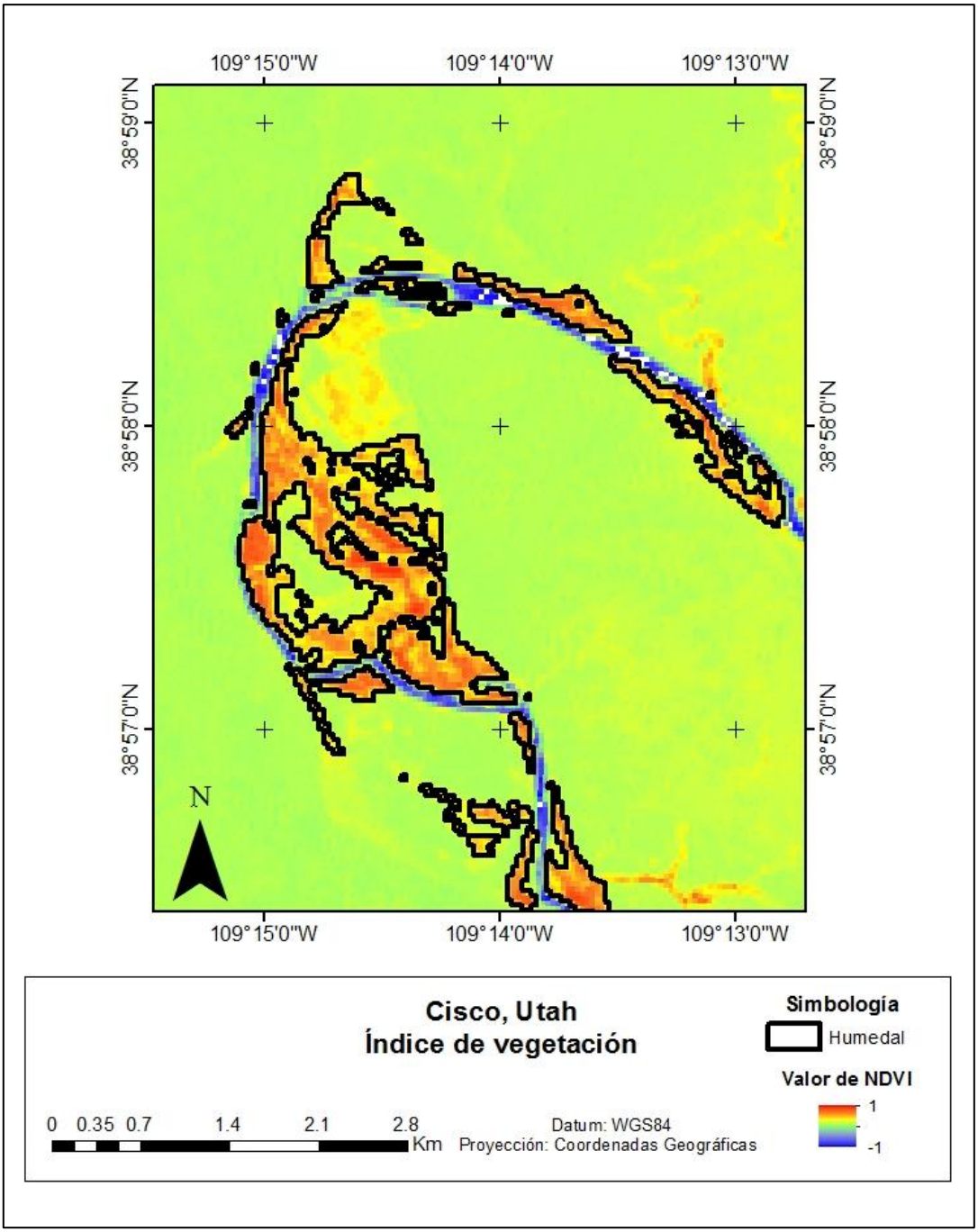


Figura A3.16 . Zona 2: Cisco, Utah, EUA. Imagen de NDVI para el año 2002 . Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizada s. El índice de NDVI se calculó a part ir de la imagen de Landsat 5 TM .

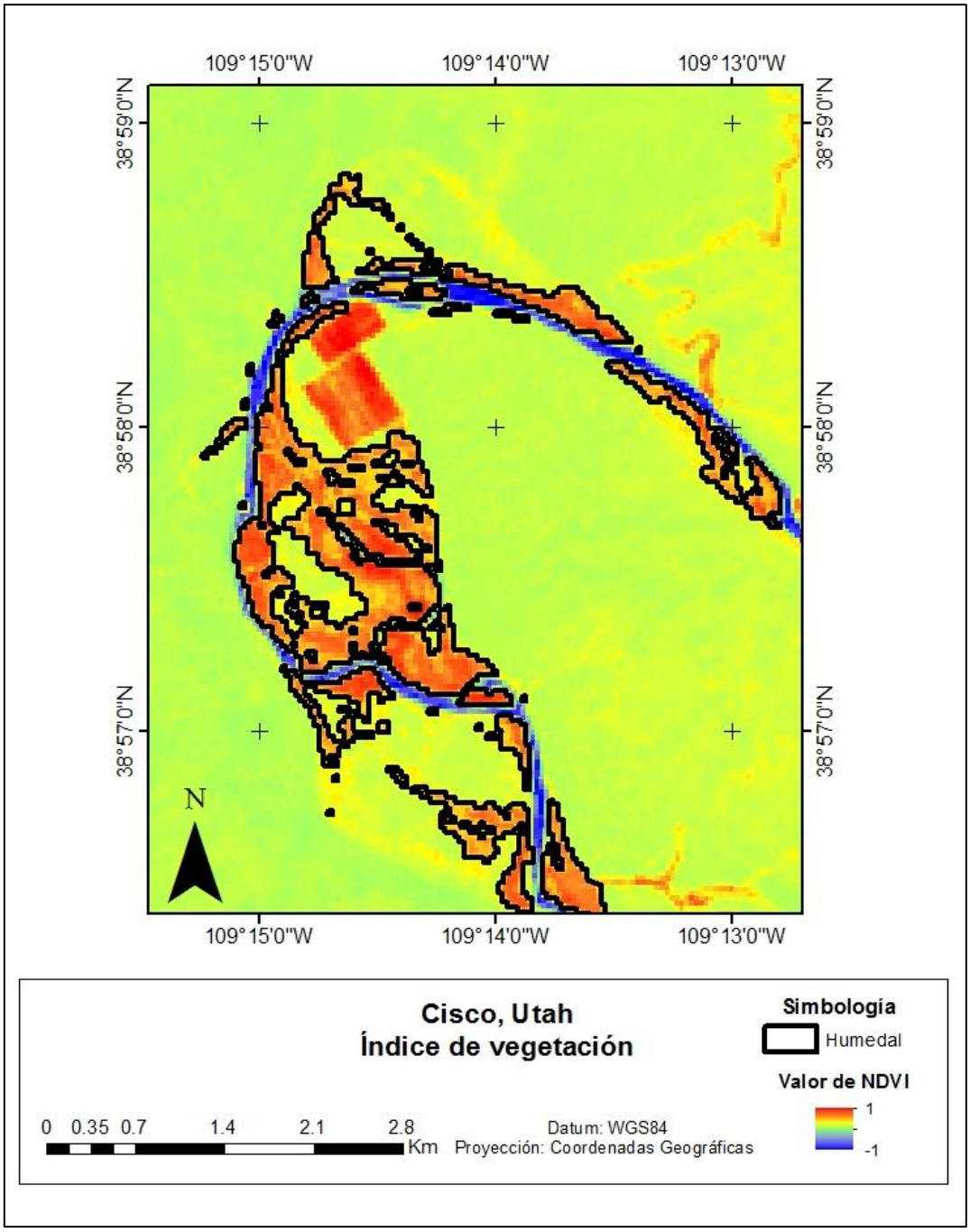


Figura A3.17 . Zona 2: Cisco, Utah, EUA. Imagen de NDVI para el año 2007 . Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a part ir de la imagen de Landsat 5 TM .

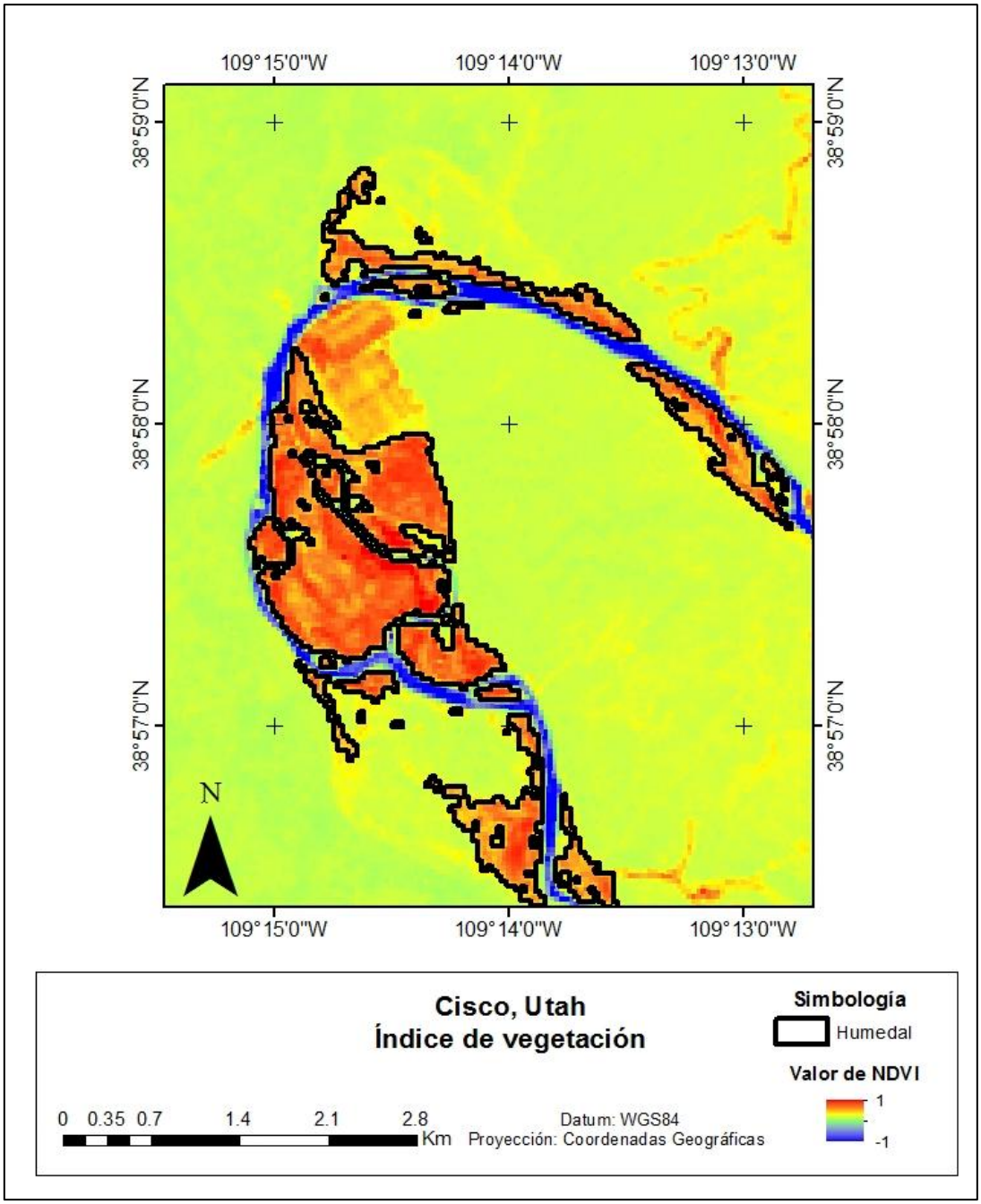


Figura A3.18 . Zona 2: Cisco, Utah, EUA. Imagen de NDVI para el año 2011 . Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a part ir de la imagen de Landsat 5 TM .

ANEXO 4

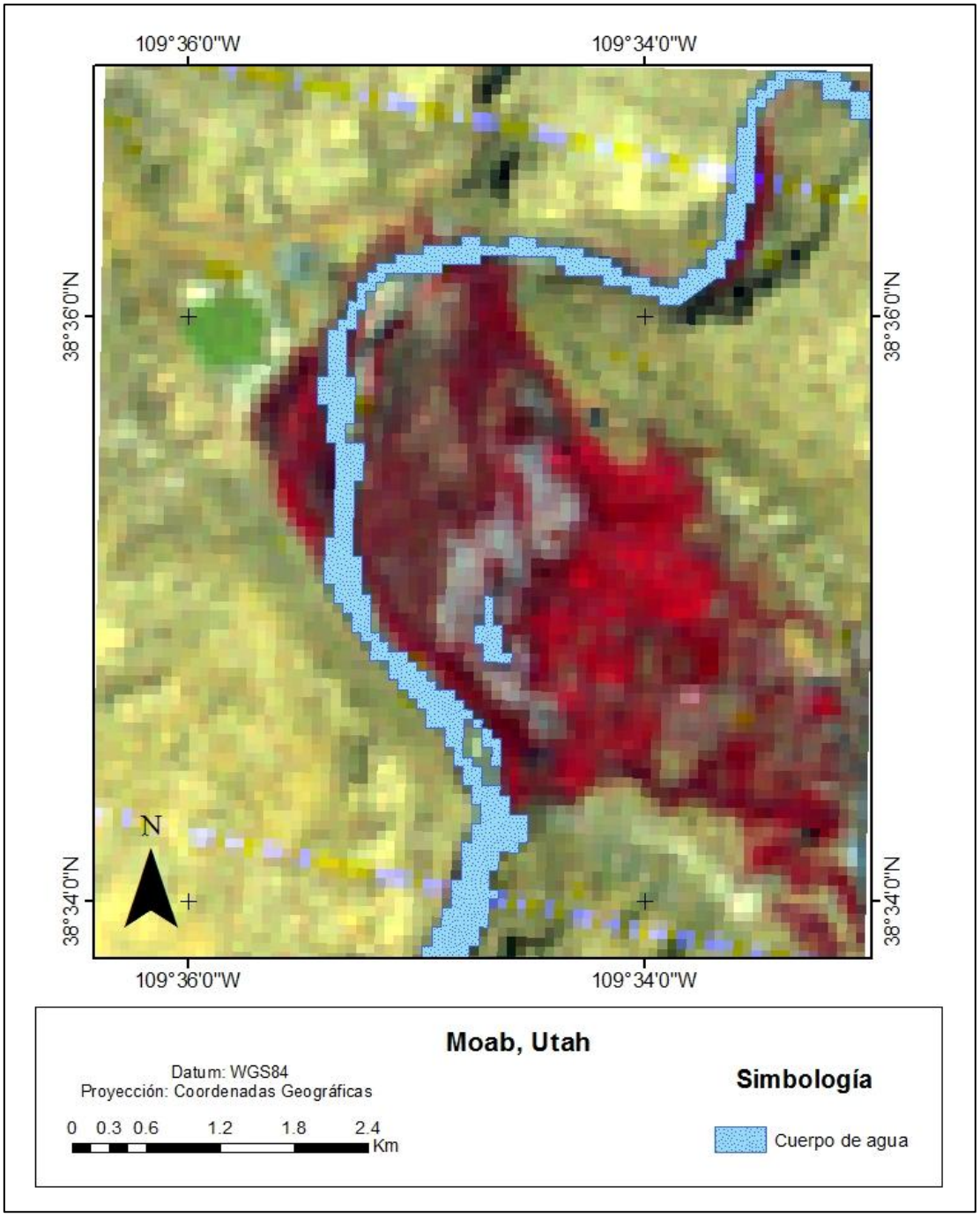


Figura A4.1 . Zona 3: Moab, Utah, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1972. La imagen en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 1 MSS se está usando como fondo.

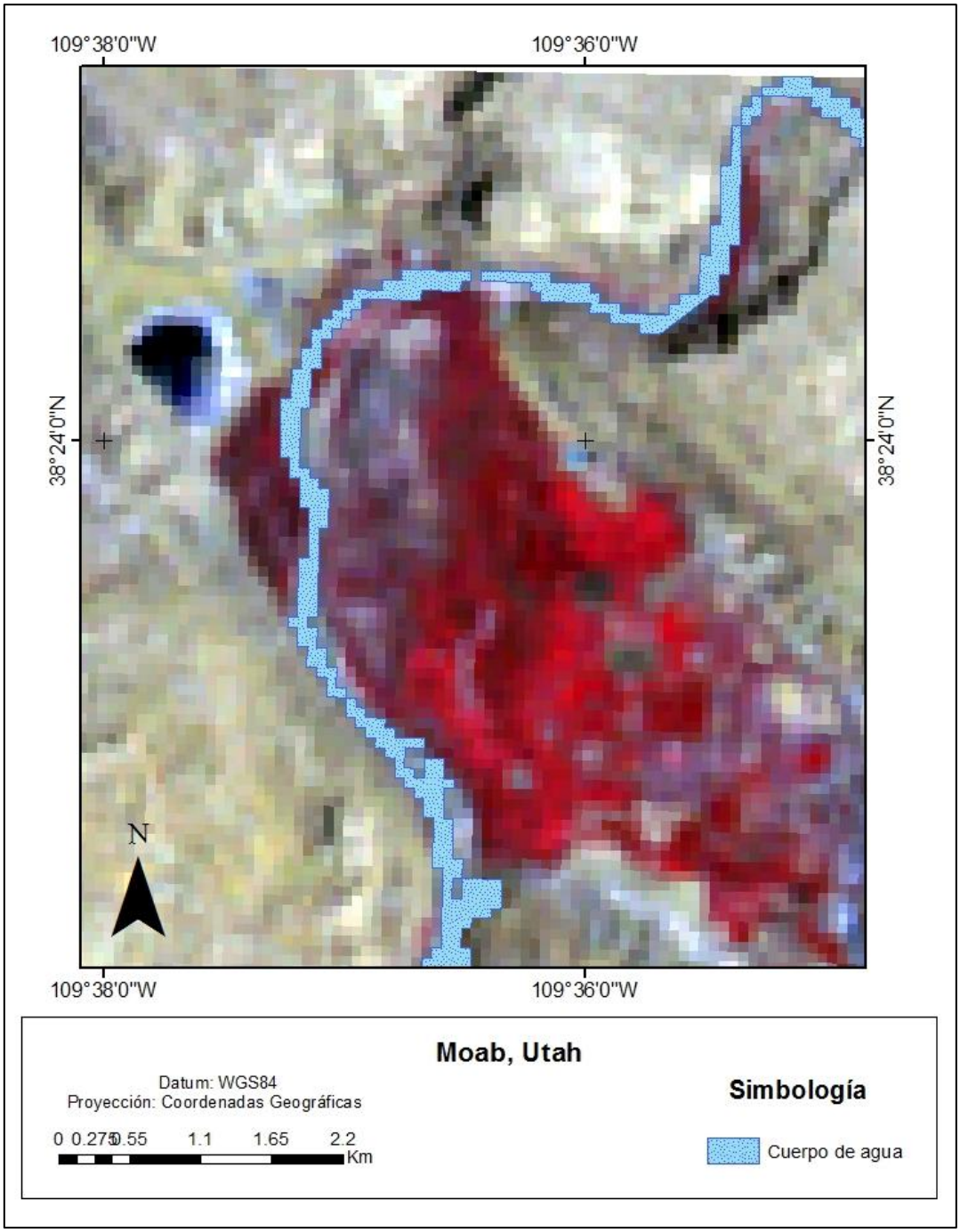


Figura A4.2 . Zona 3: Moab, Utah, EUA. Resu ltados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1977 . La imagen en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 1 MSS se está usando como fondo.

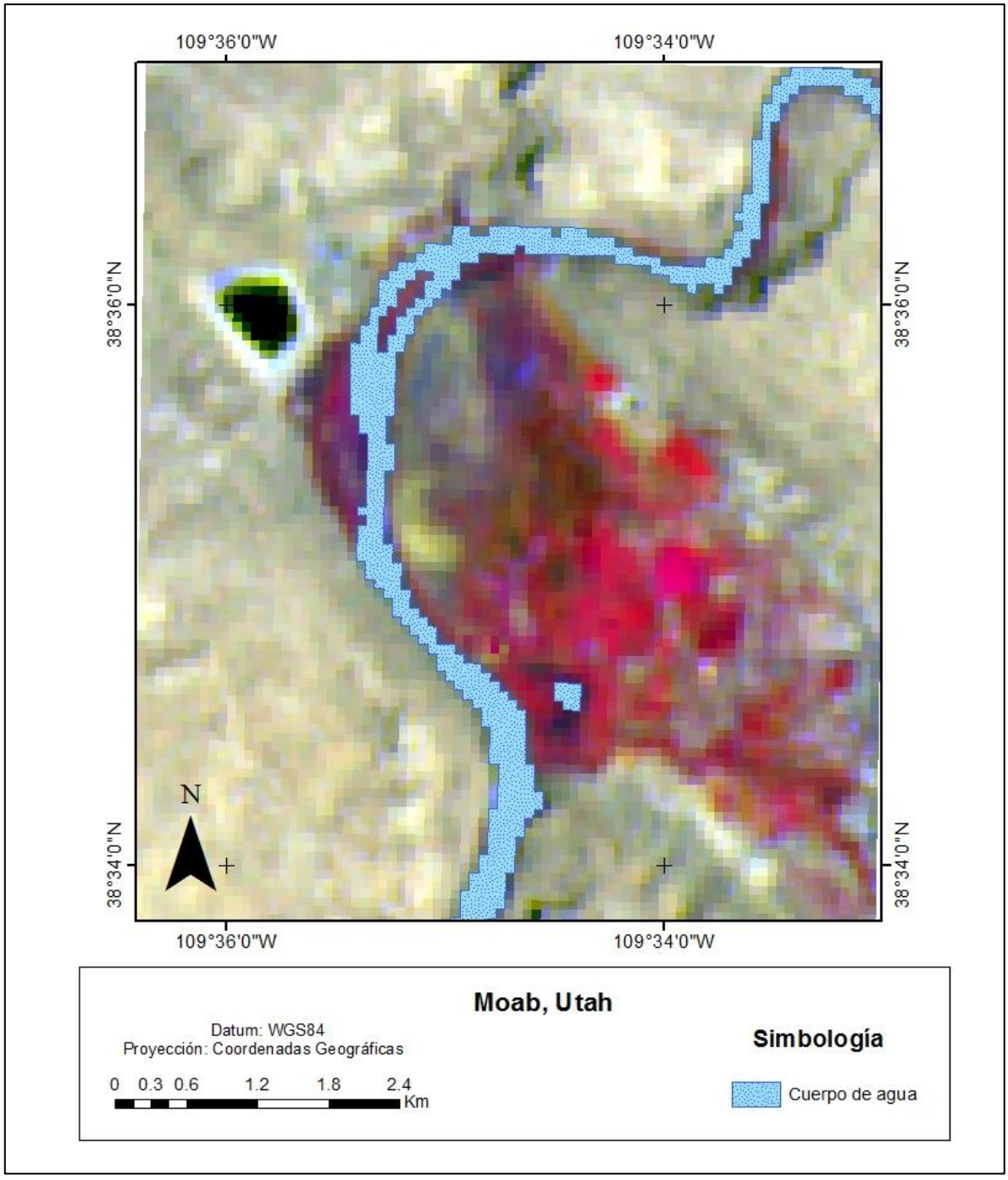


Figura A4.3 . Zona 3: Moab, Utah, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1982 . La imagen en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 3 MSS se está usando como fondo.

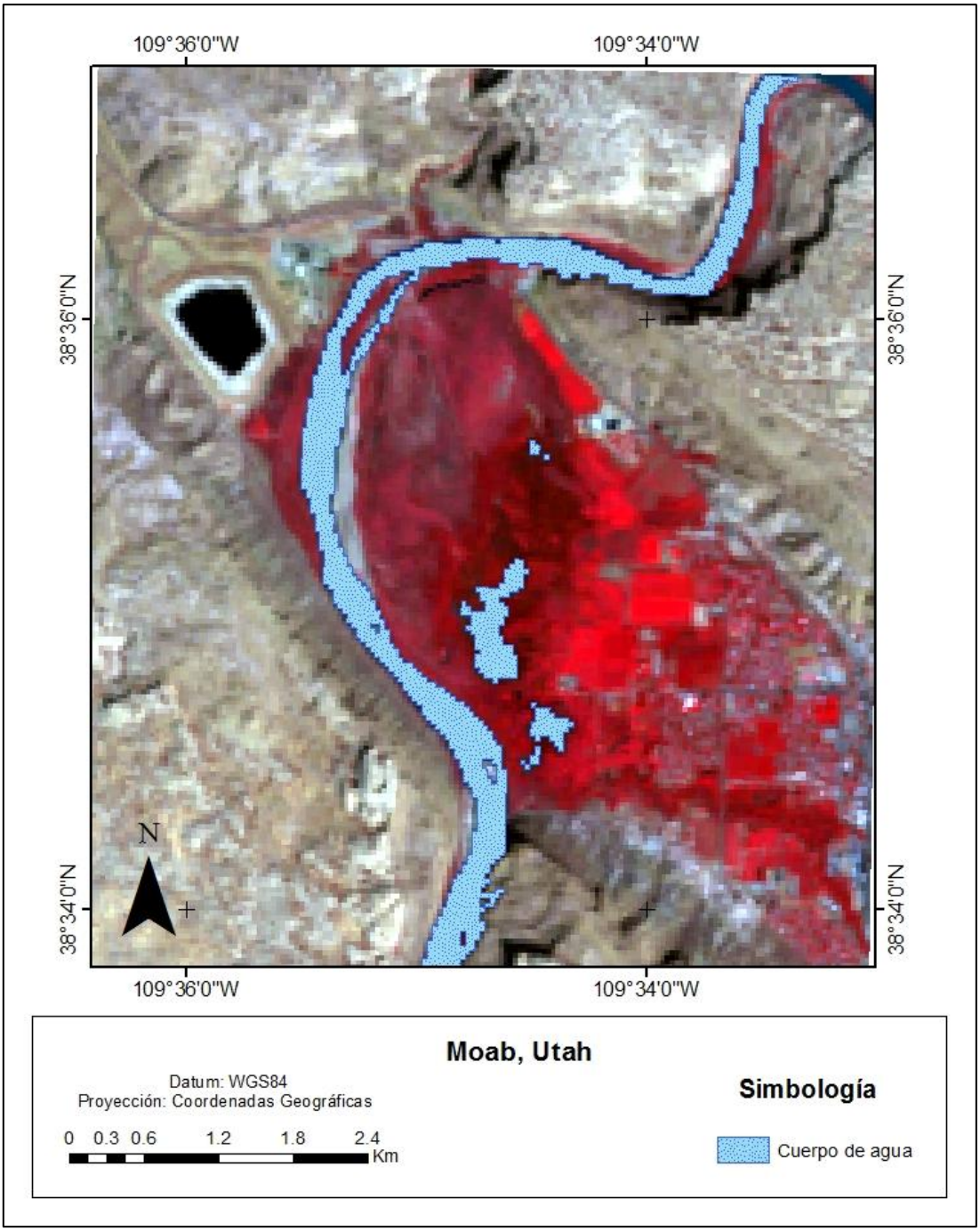


Figura A4.4 . Zona 3: Moab, Utah, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1987 . La imagen en falso color infrar rojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

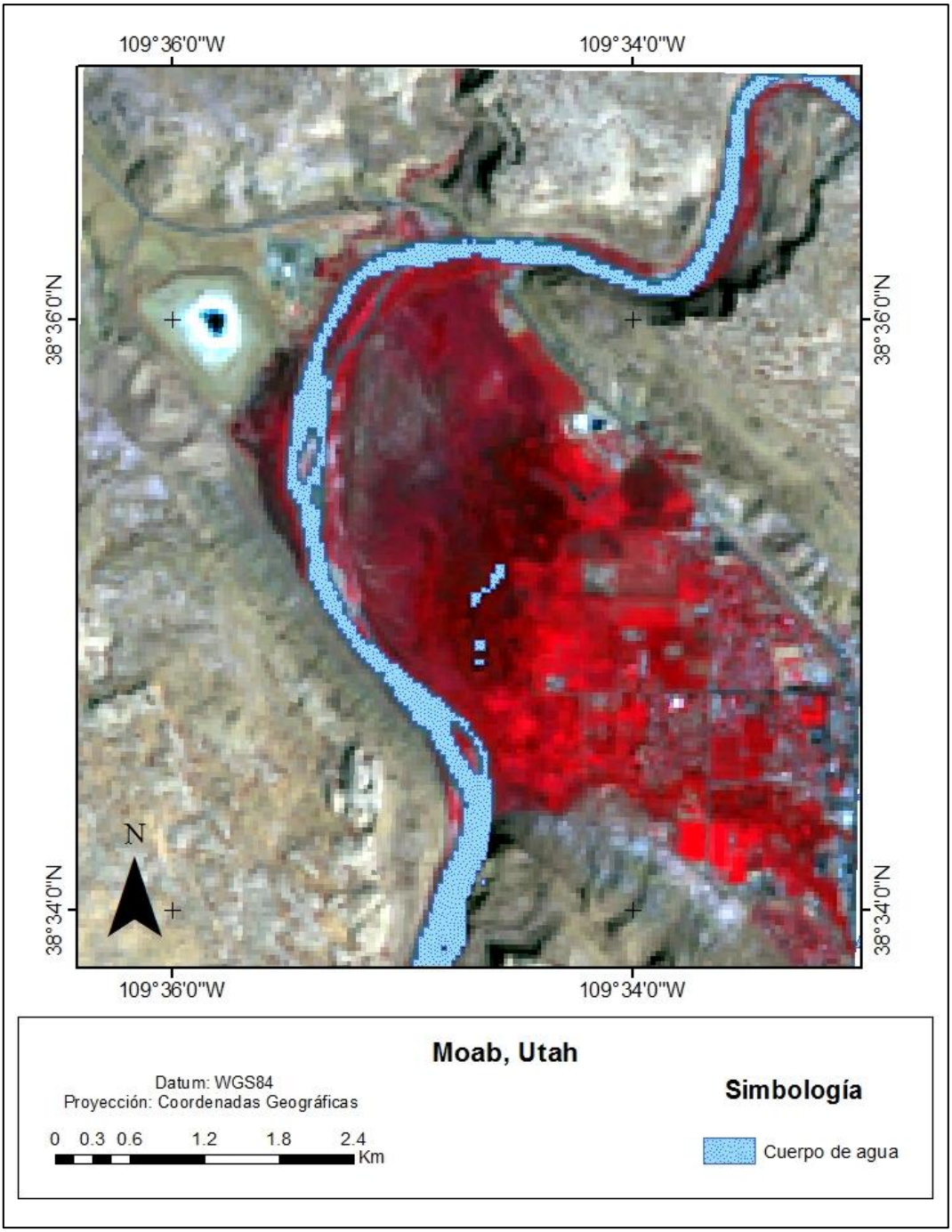


Figura A4.5 . Zona 3: Moab, Utah, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1992. La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

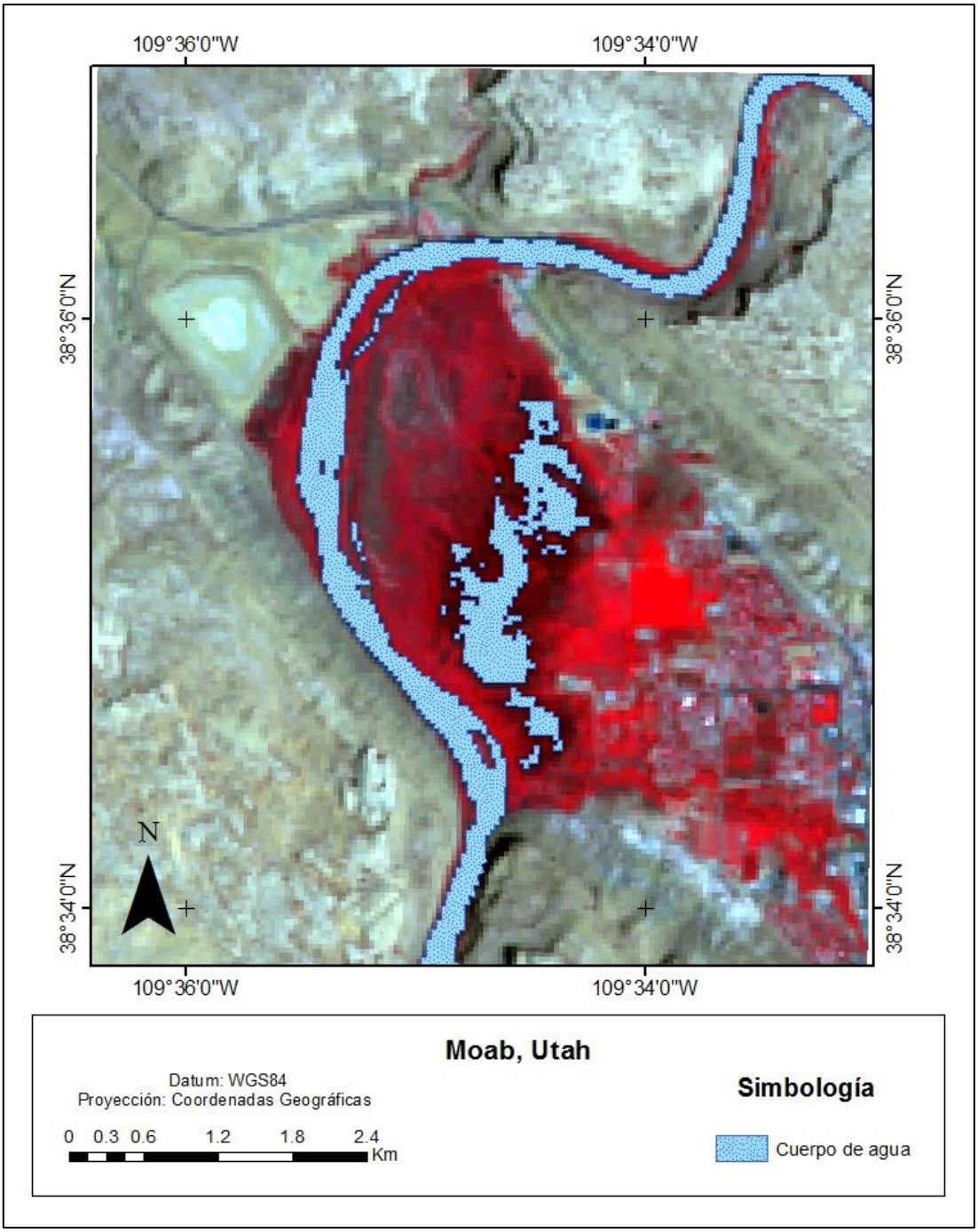


Figura A4.6 . Zona 3: Moab, Utah, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1997 . La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

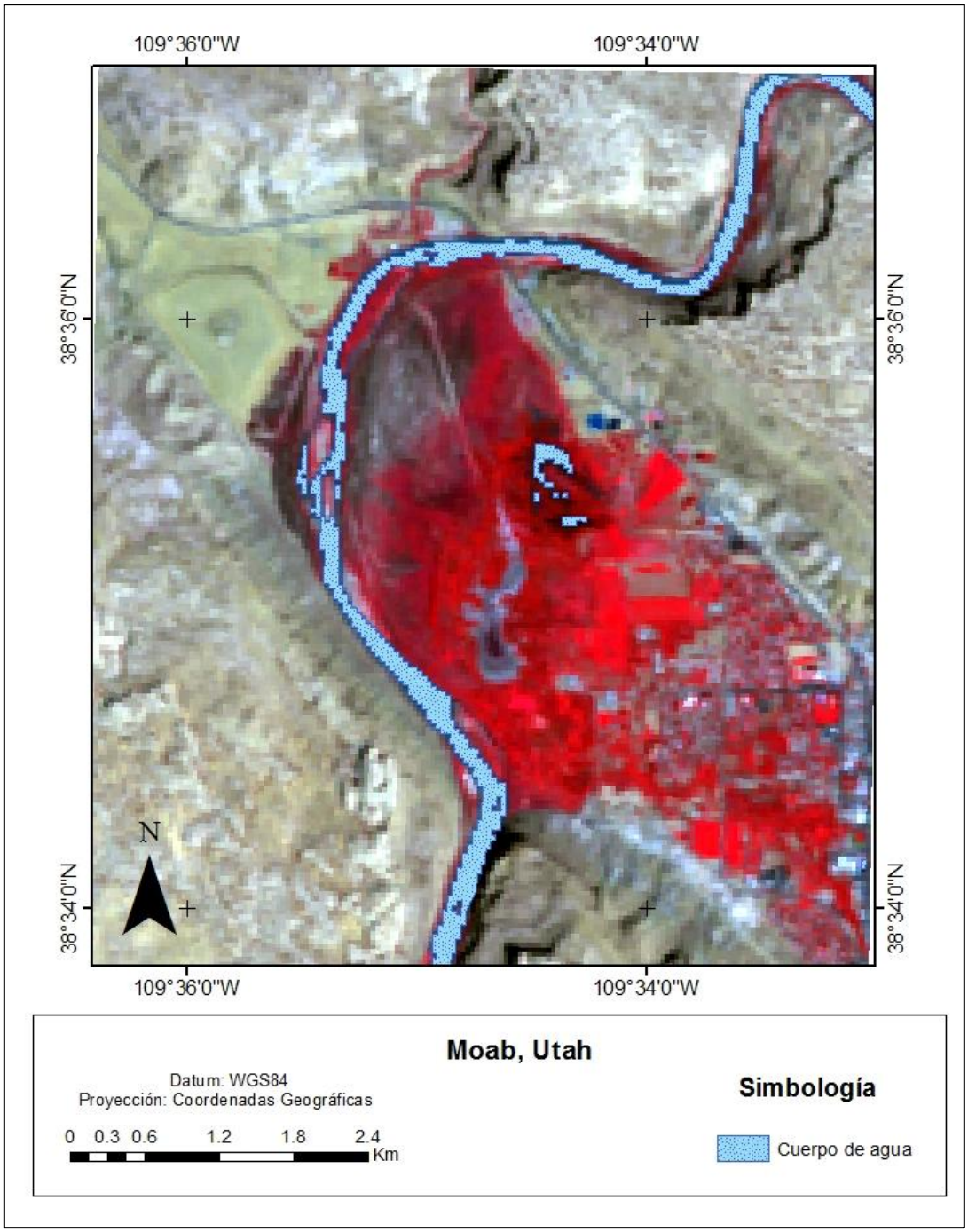


Figura A 4.7. Zona 3: Moab, Utah, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 2002. La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

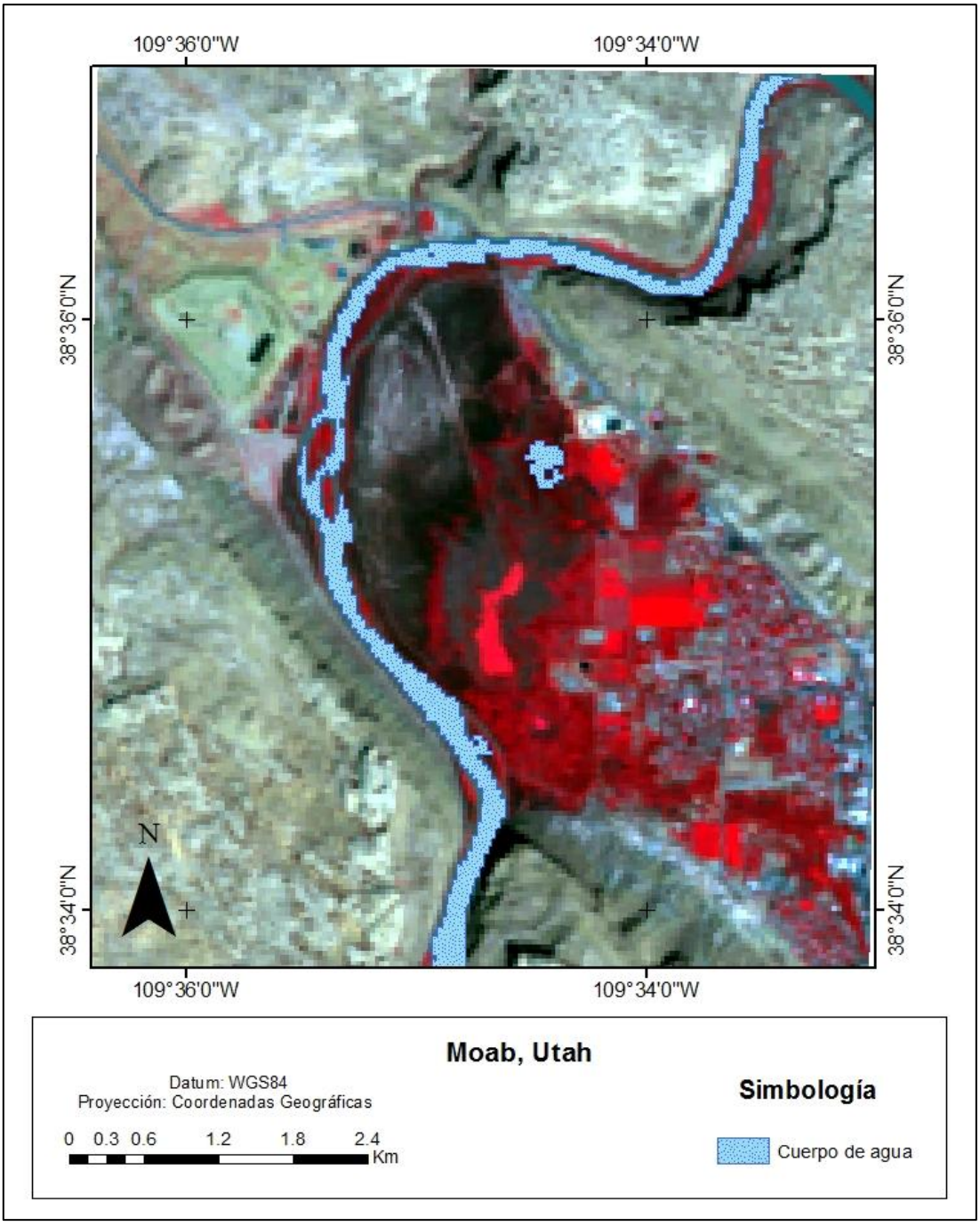


Figura A4.8 . Zona 3: Moab, Utah, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de a gua para el año 2007 . La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

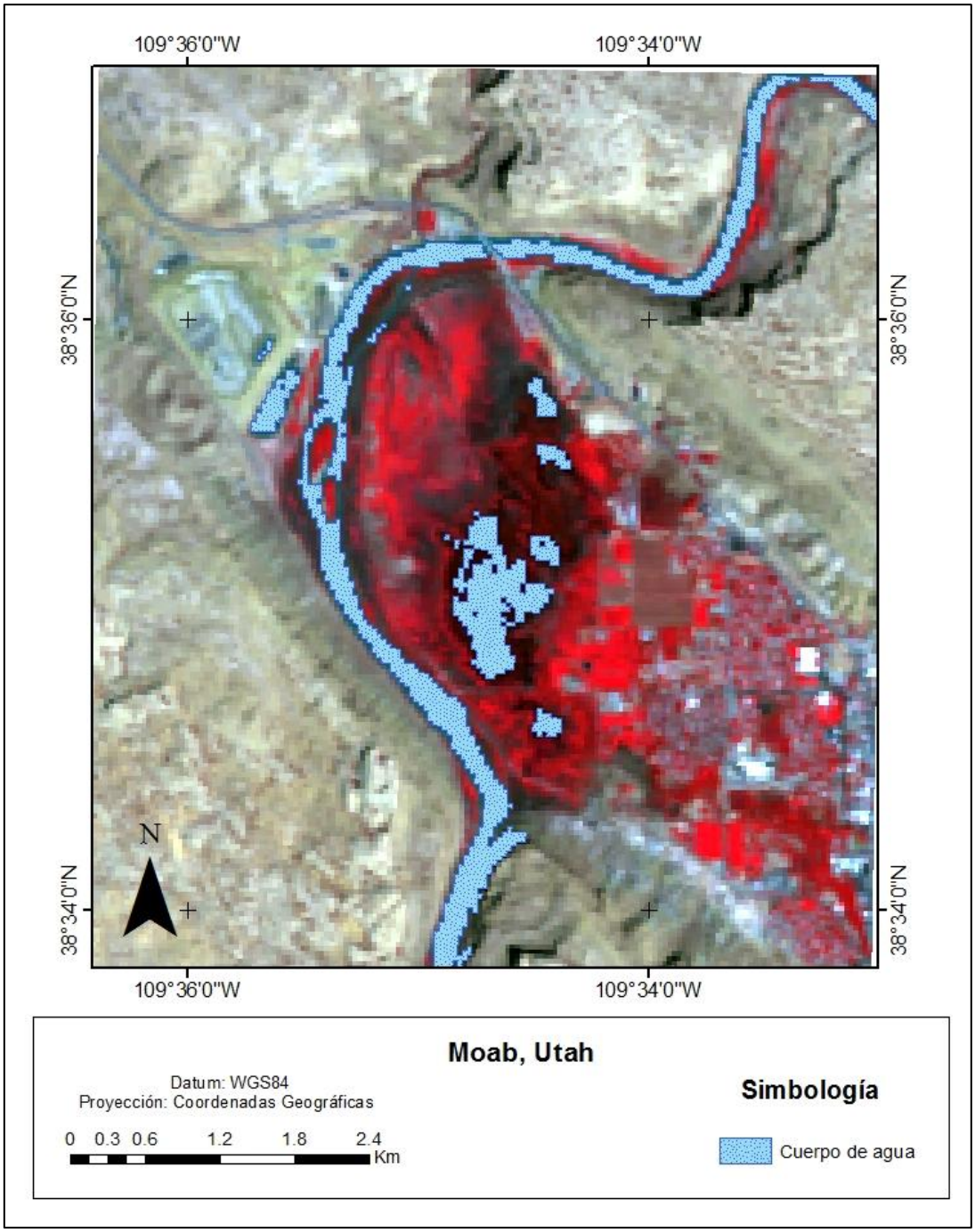


Figura A4.9 . Zona 3: Moab, Utah, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 2011 . La imagen en falso color infr arrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

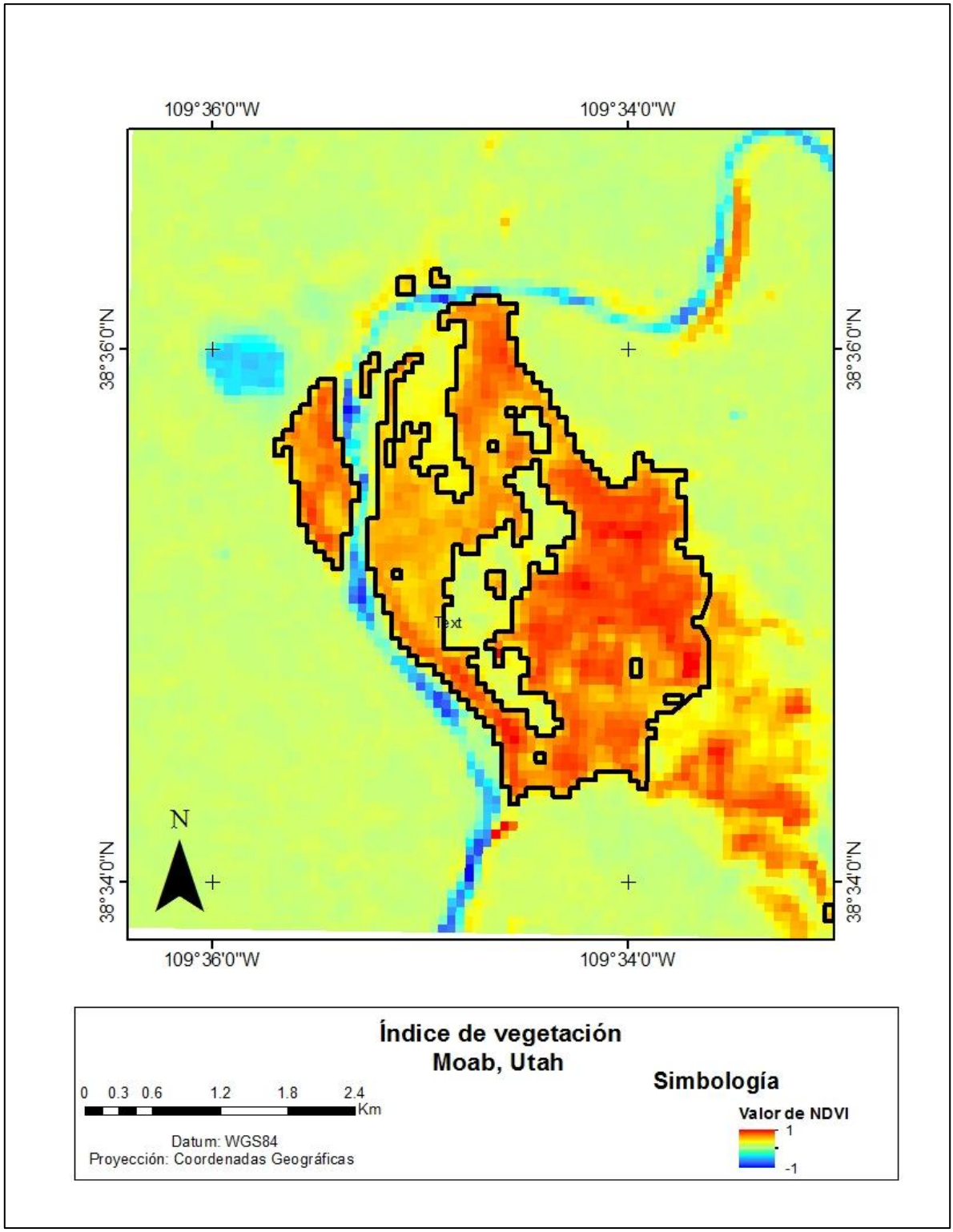


Figura A4.10 . Zona 3: Moab, Utah, EUA. Imagen de NDVI para el año 1972. Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales estan vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la image n de Landsat 1 MSS.

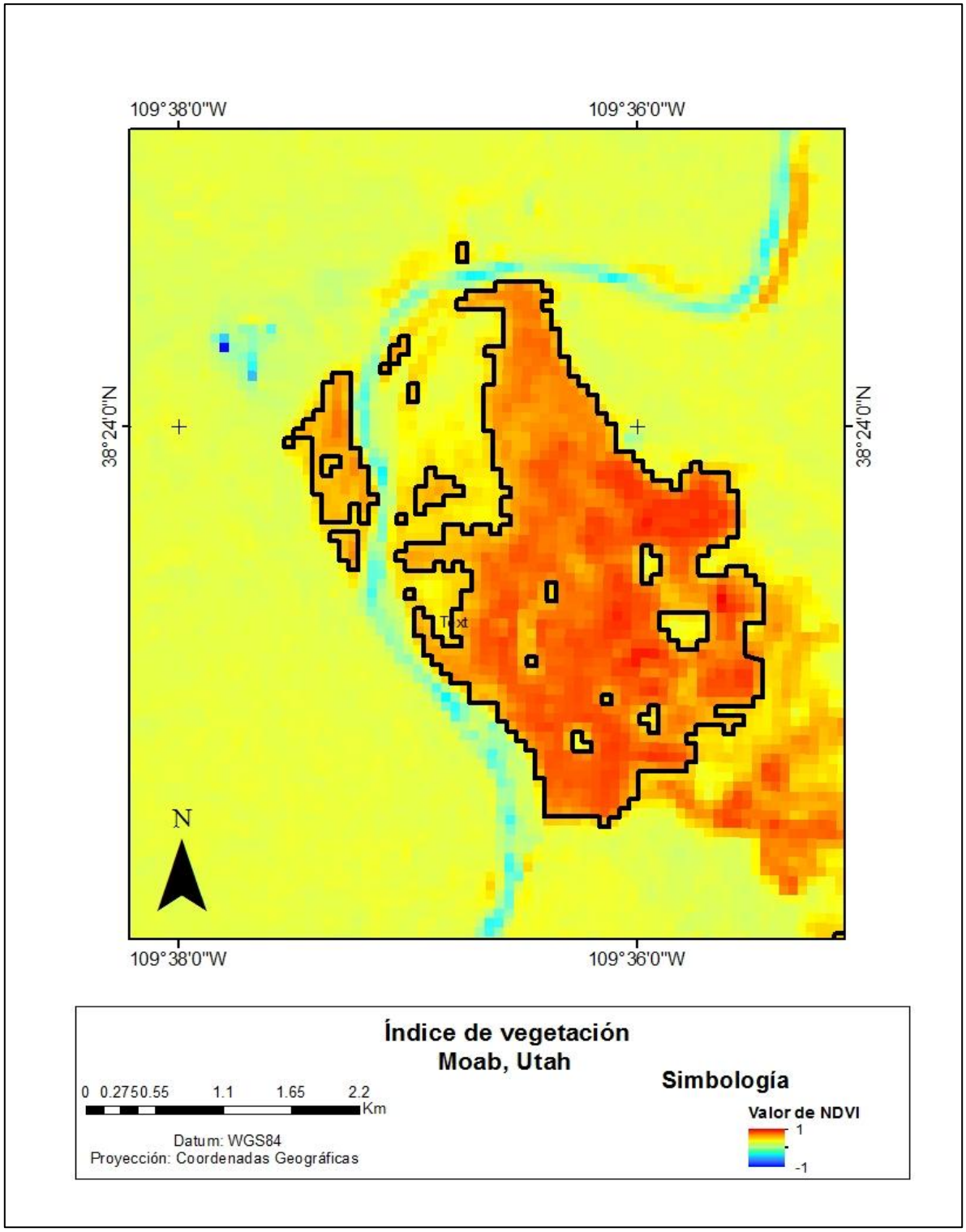


Figura A4.11 . Zona 3: Moab, Utah, EUA. Imagen de NDVI para el año 1977 . Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales estan vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 1 MSS.

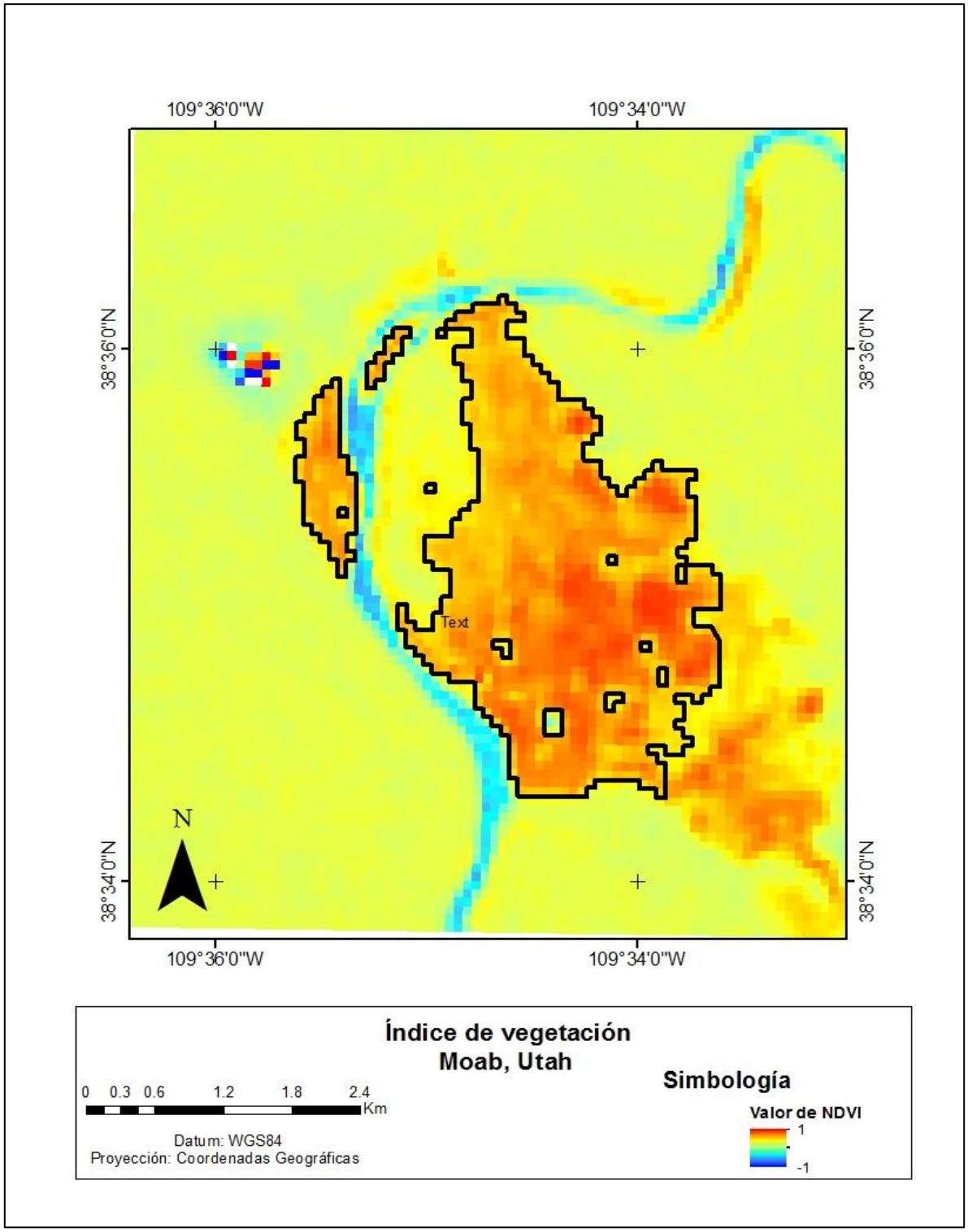


Figura A 4.12. Zona 3: Moab, Utah, EUA. Imagen de NDVI para el año 198 2. Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales estan vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 1 MSS.

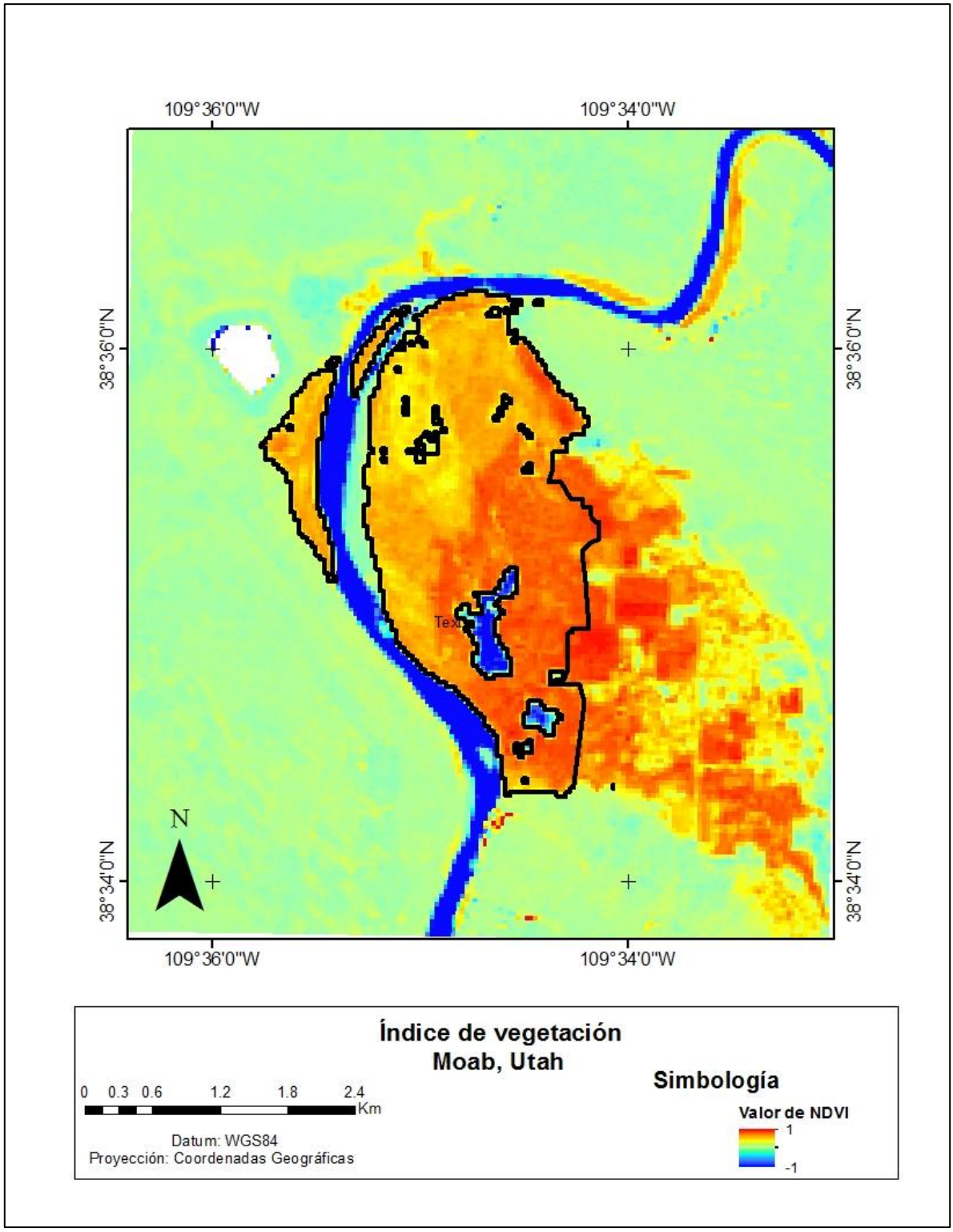


Figura A 4.13. Zona 3: Moab, Utah, EUA. Imagen de NDVI p ara el año 1987 . Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales estan vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 5 TM .

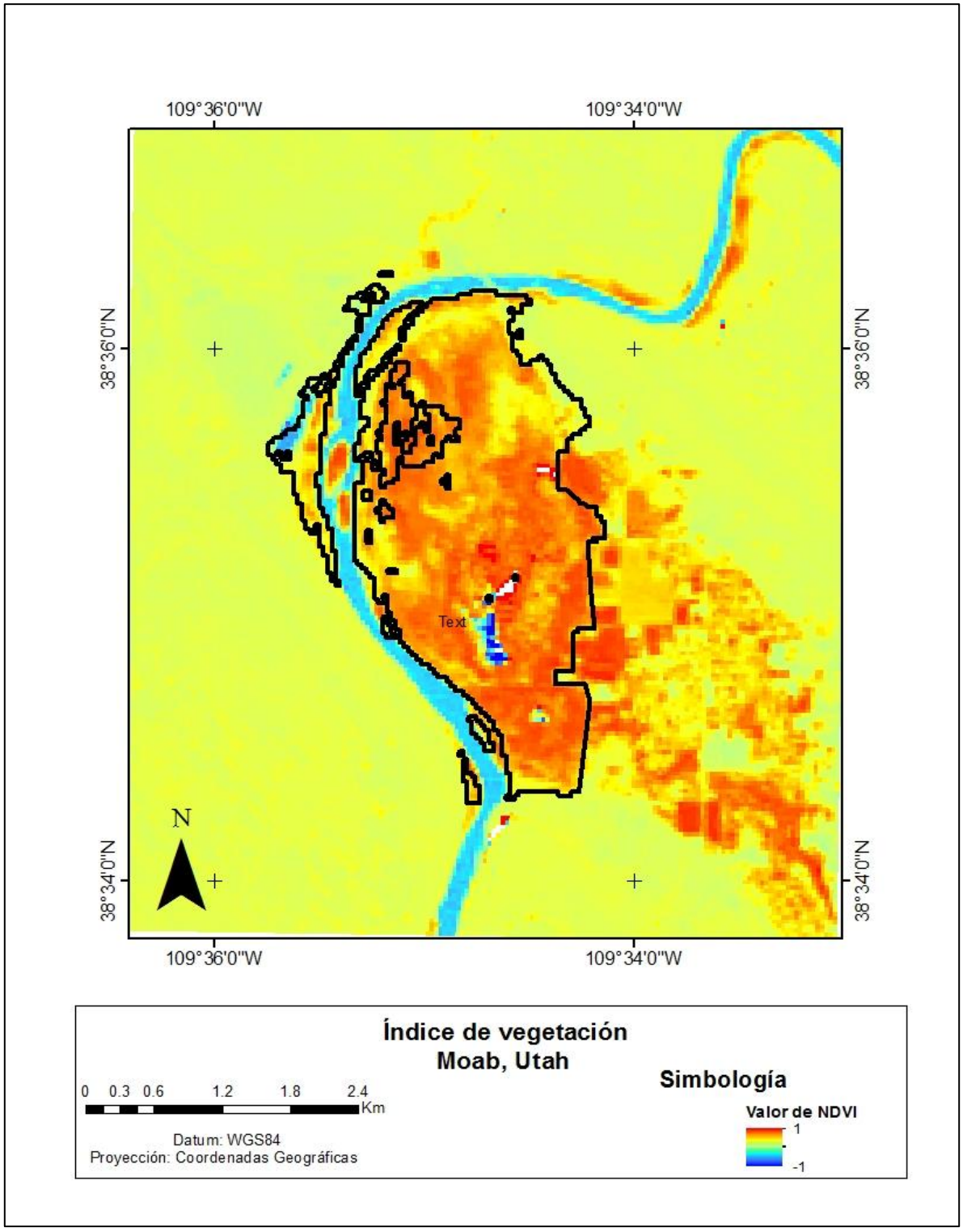


Figura A 4.14. Zona 3: Moab, Utah, EUA. Imagen de NDVI para el año 1992 . Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales estan vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 5 TM .

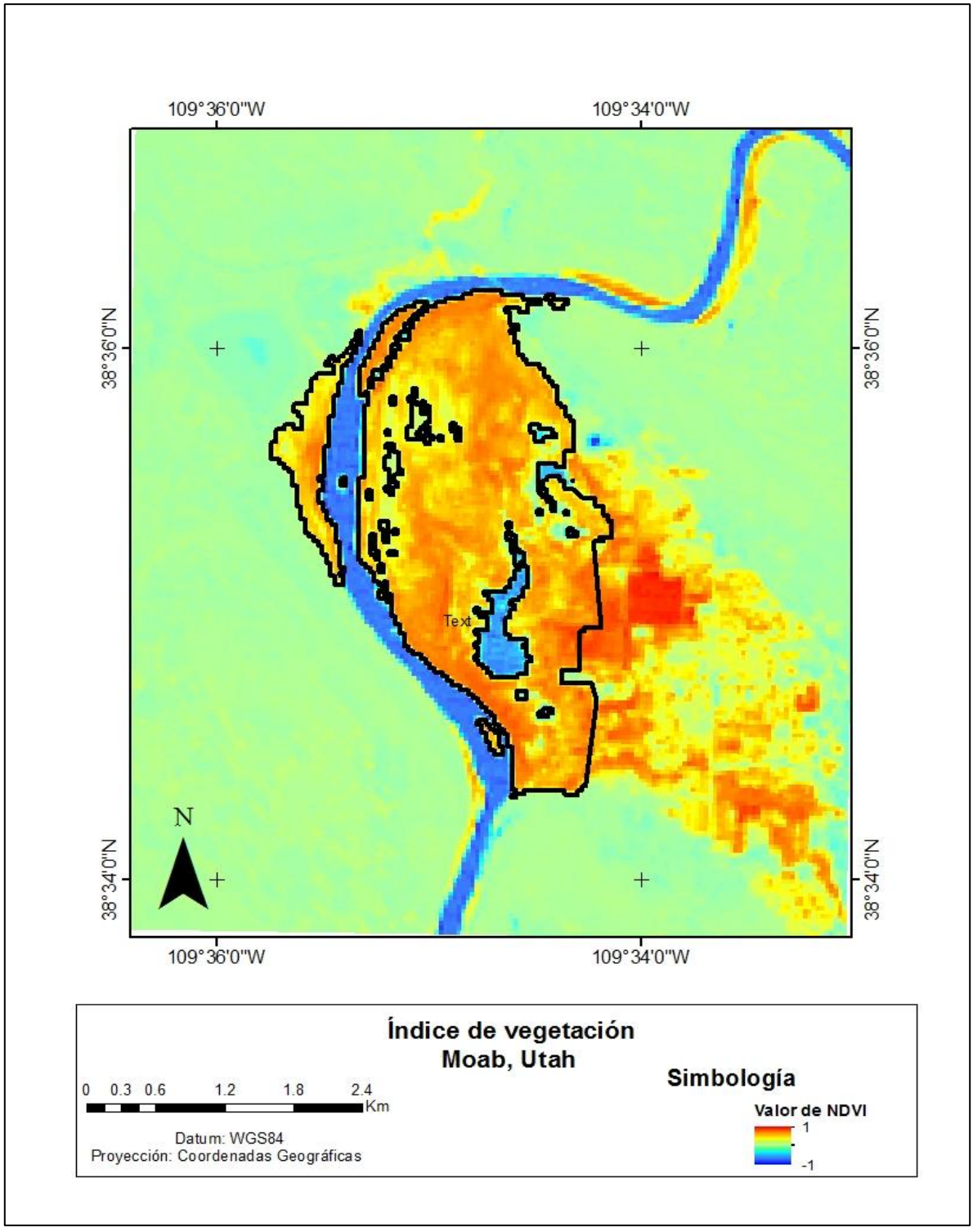


Figura A4.15 . Zona 3: Moab, Utah, EUA. Imagen de NDVI para el año 1997 . Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales estan vectoriza das. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 5 TM .

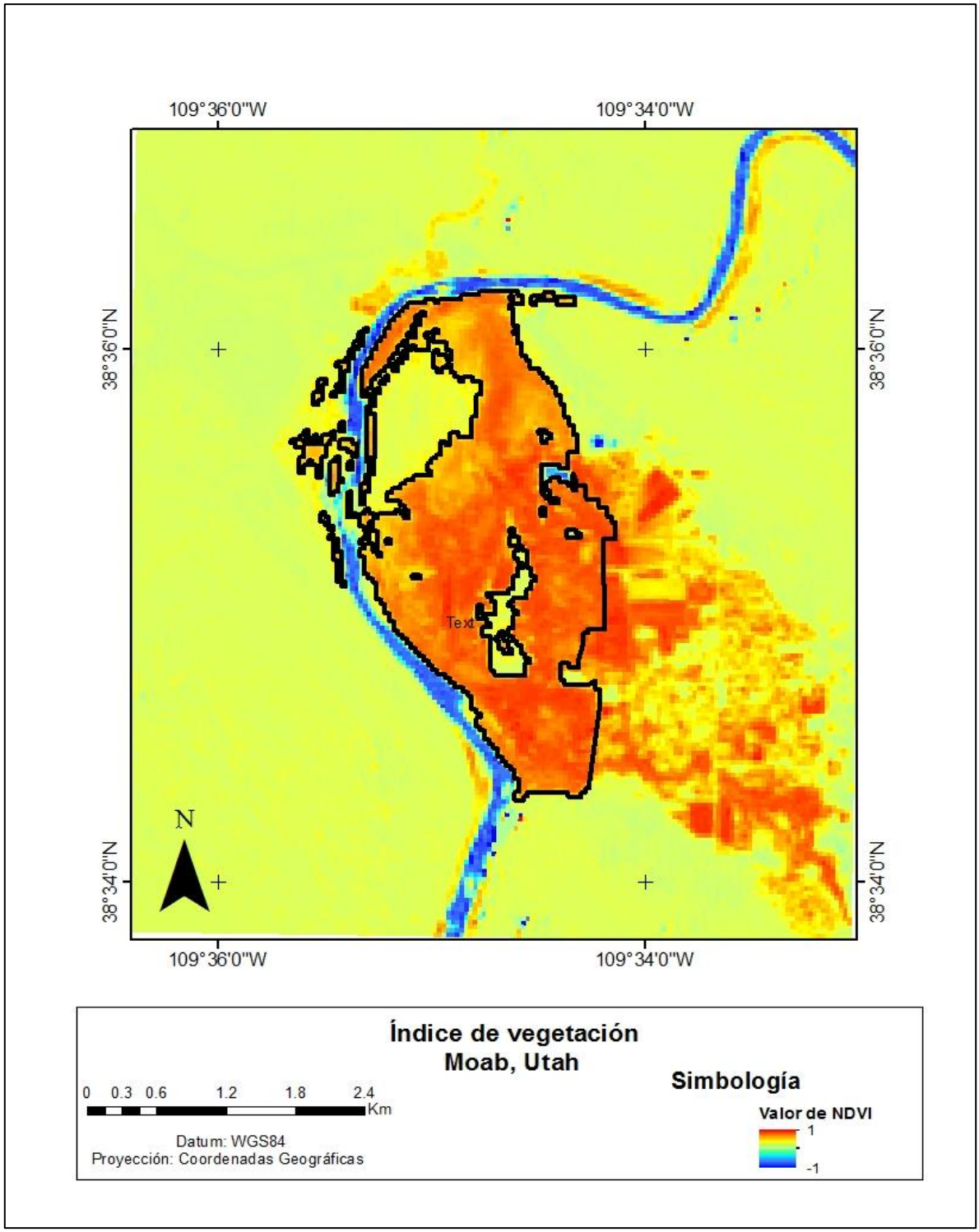


Figura A4.16 . Zona 3: Moab, Utah, EUA. Imagen de NDVI para el año 2002 . Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales estan vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a parti r de la imagen de Landsat 5 TM .

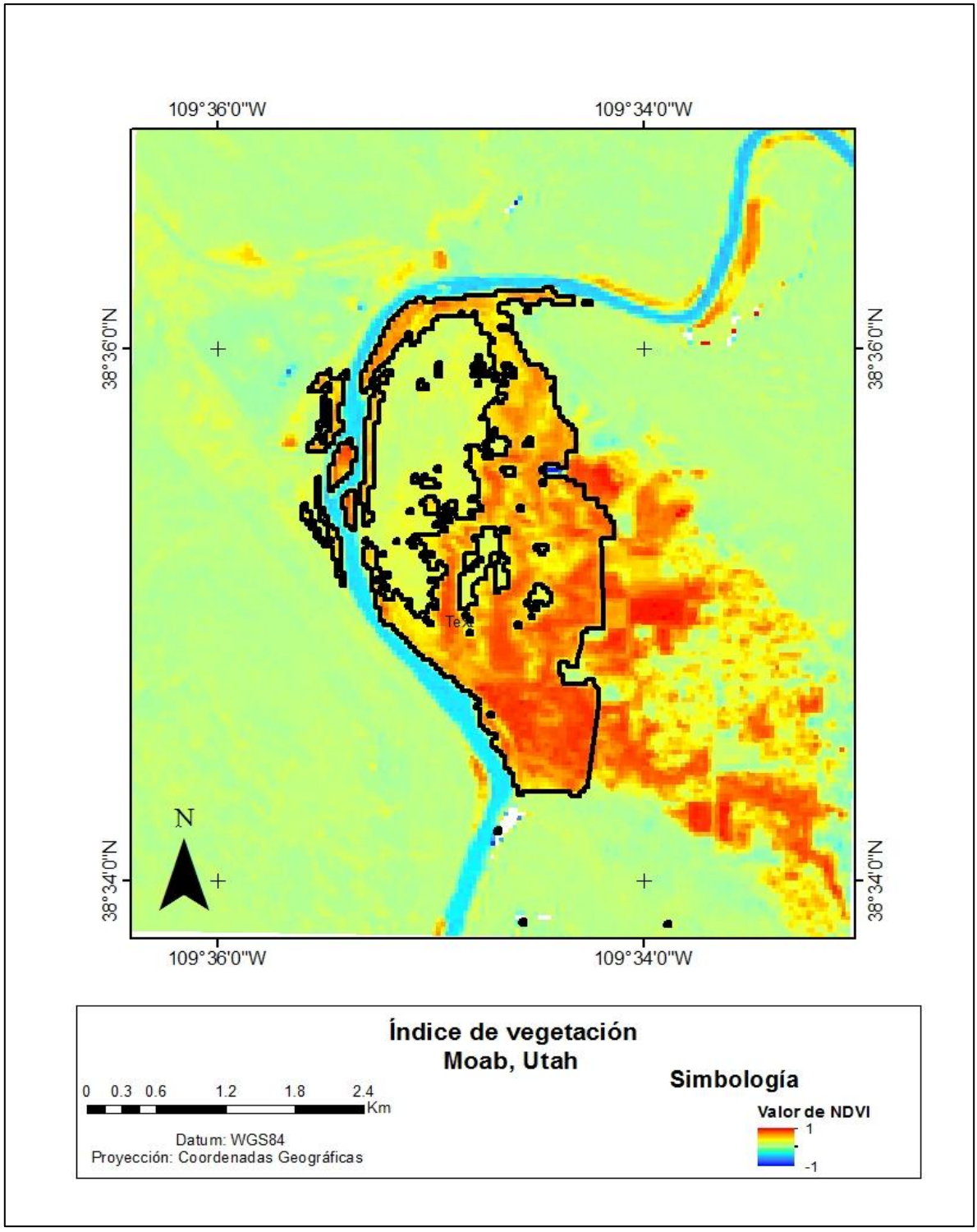


Figura A4.17 . Zona 3: Moab, Utah, EUA. Imagen de NDVI para el año 2007 . Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales estan vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 5 TM .

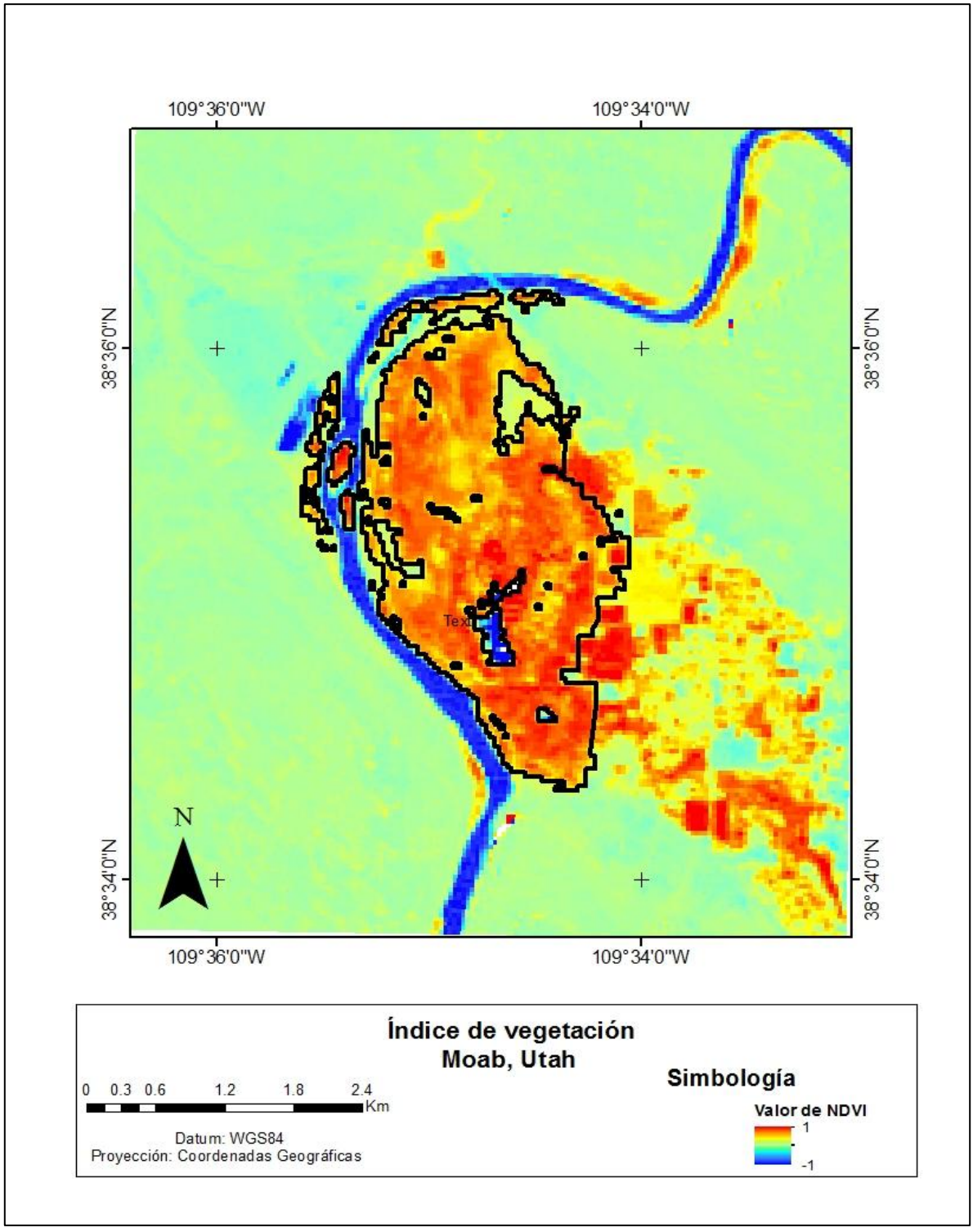


Figura A4.18. Zona 3: Moab, Utah, EUA. Imagen de NDVI para el año 2011 . Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales estan vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 5 TM .

ANEXO 5

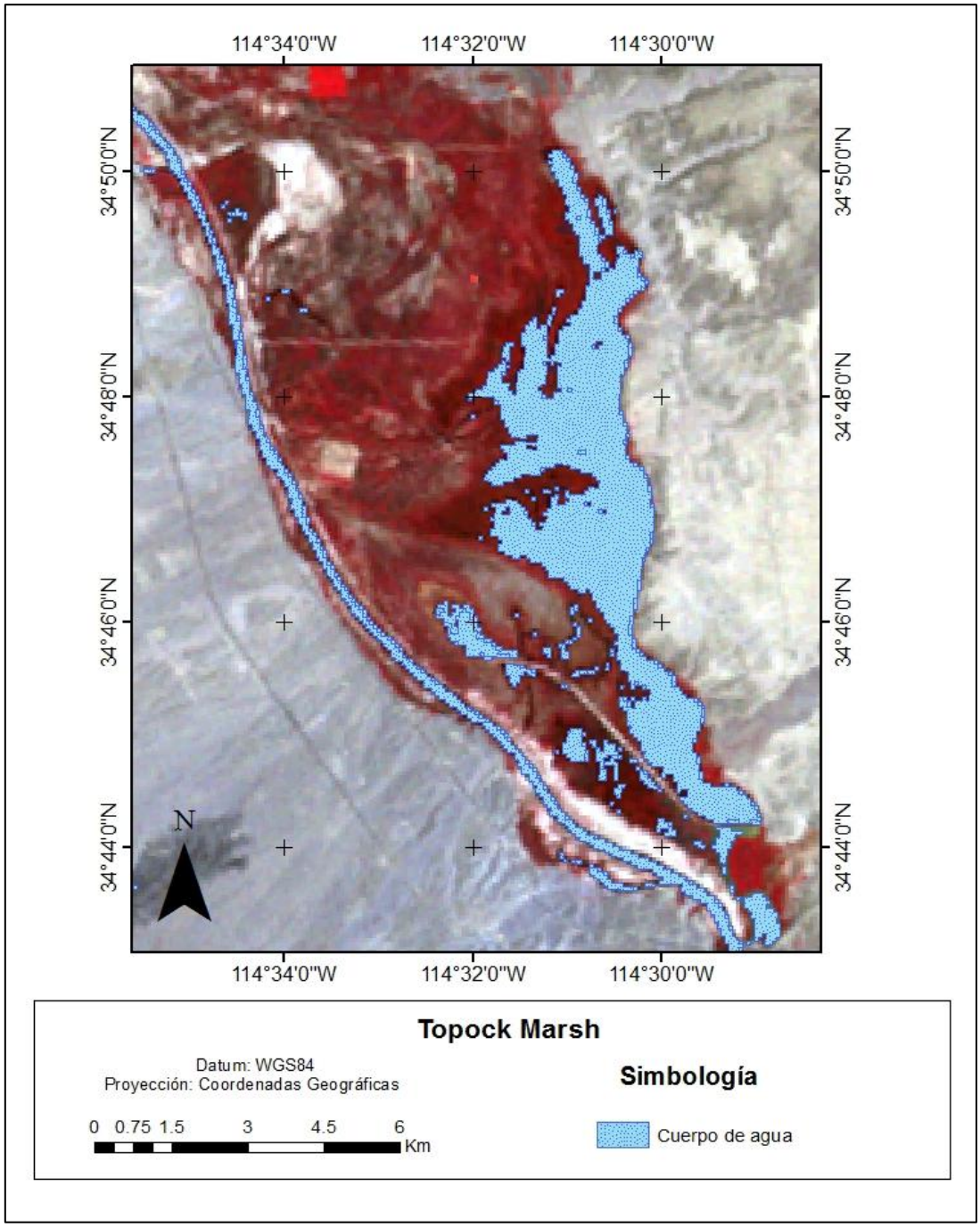


Figura A5.1 . Zona 4: Topock Marsh, Arizona, EUA . Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1972. La imagen en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 1 MSS se está usando como fondo.

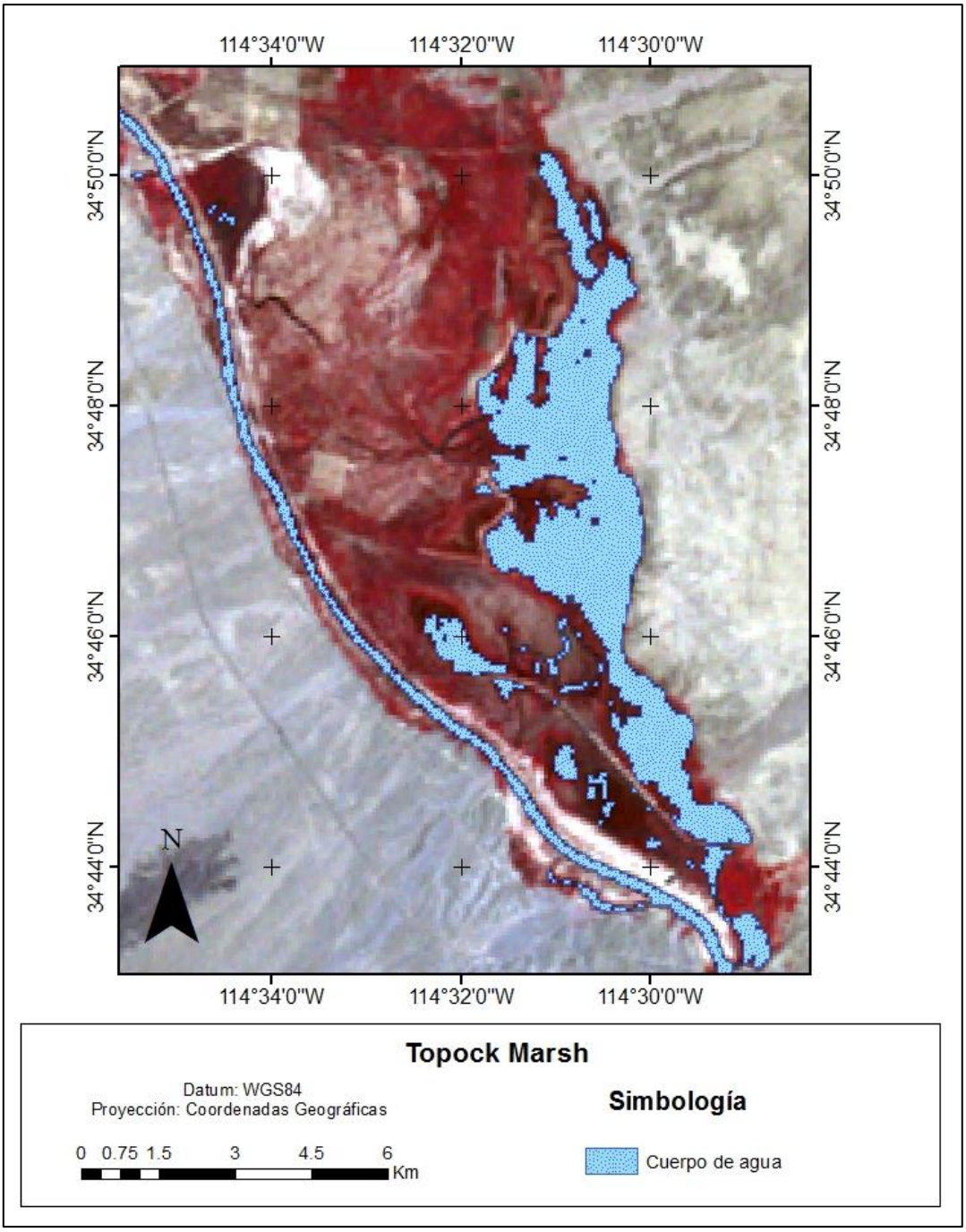


Figura A5.2. Zona 4: Topock Marsh, Arizona, EUA. Resultados de la identif icación de los cuerpos de agua para el año 1977. La imagen en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 2 MSS se está usando como fondo.

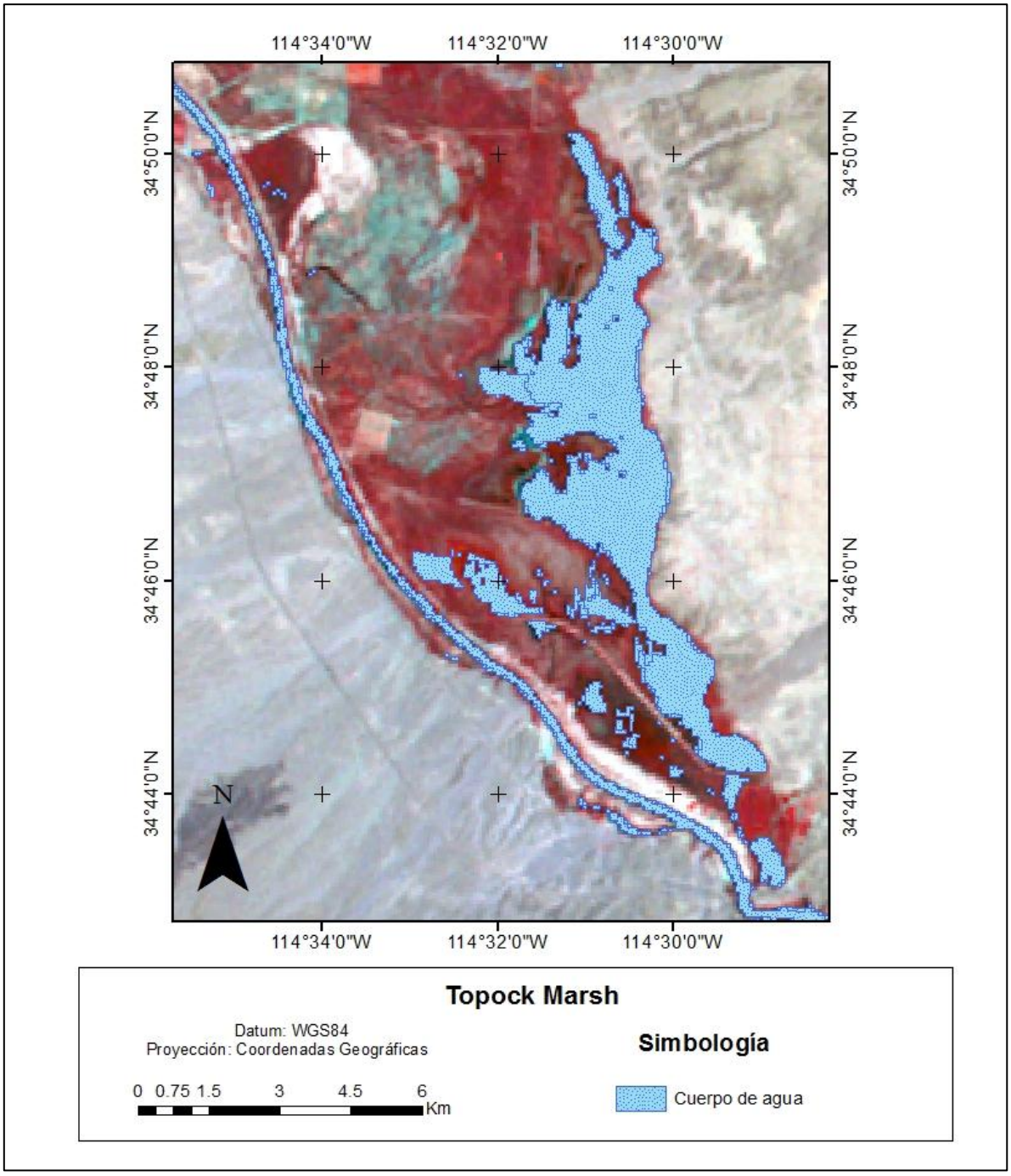


Figura A5.3. Zona 4: Topock Marsh, Arizona, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1982. La imagen en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 3 MSS se está usando como fondo.

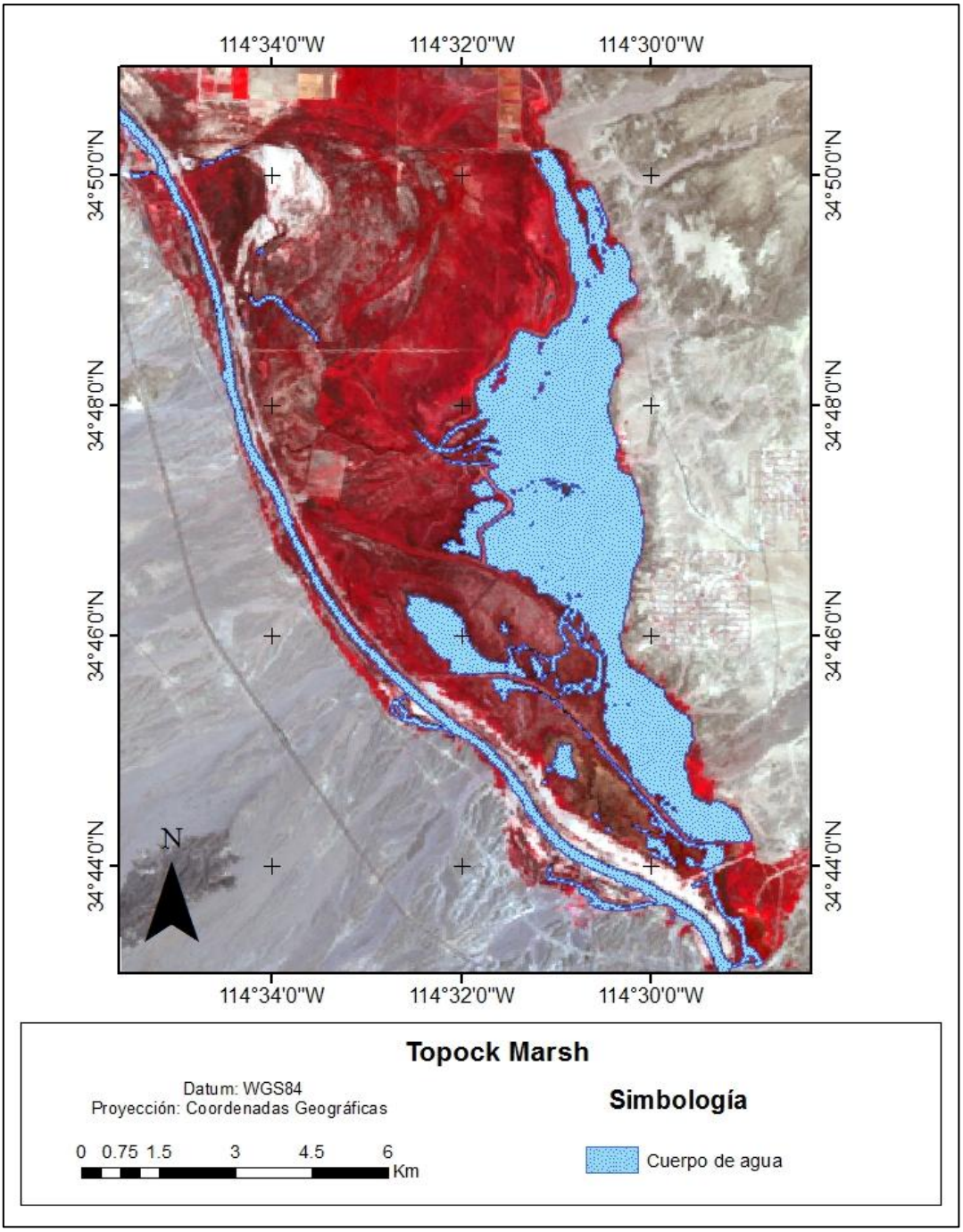


Figura A5.4 . Zona 4: Topock Marsh, Arizona, EUA . Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 19 87. La imagen en falso color infr arrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

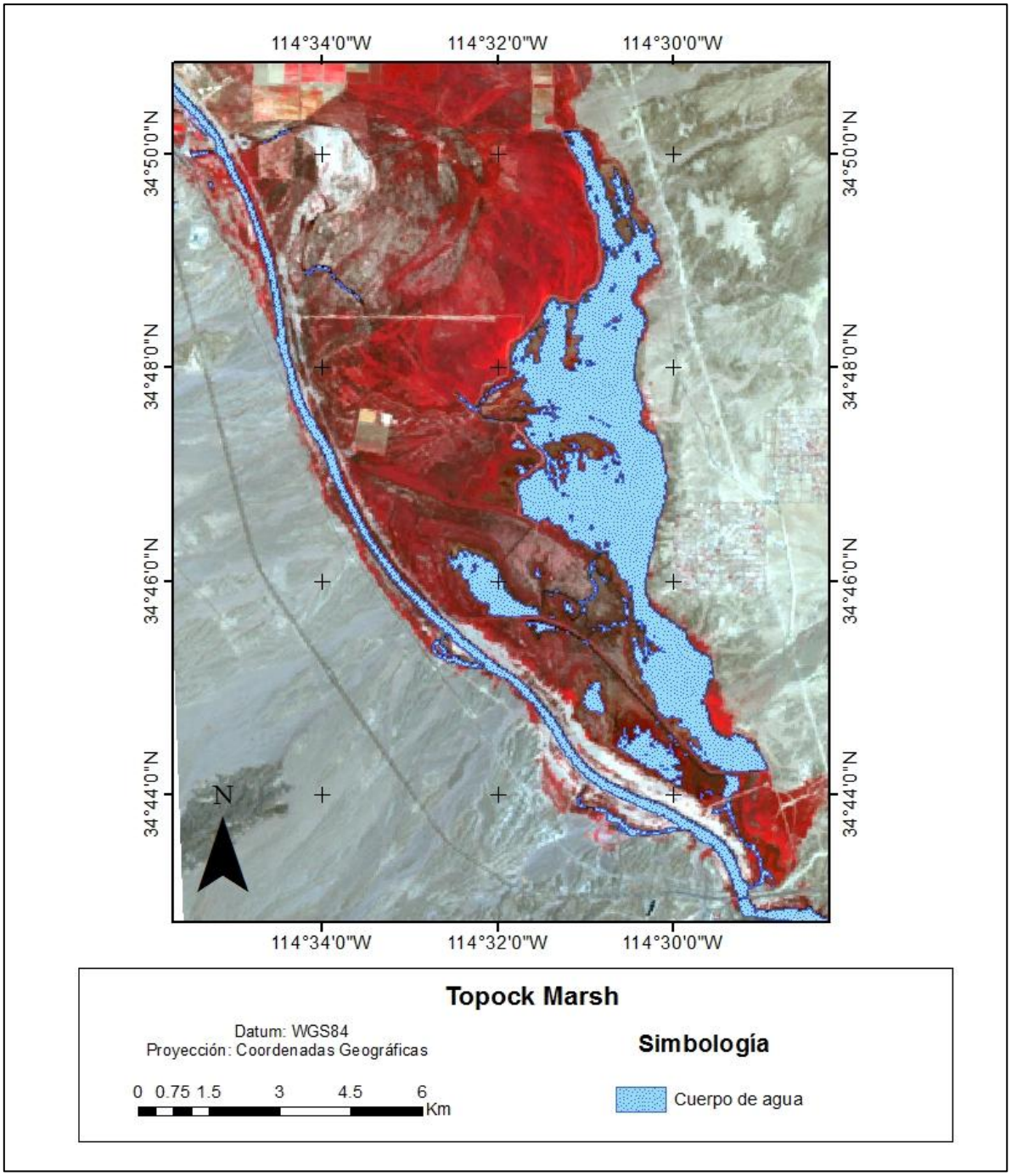


Figura A5.5 . Zona 4: Topock Marsh, Arizona, EUA . Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 19 92. La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

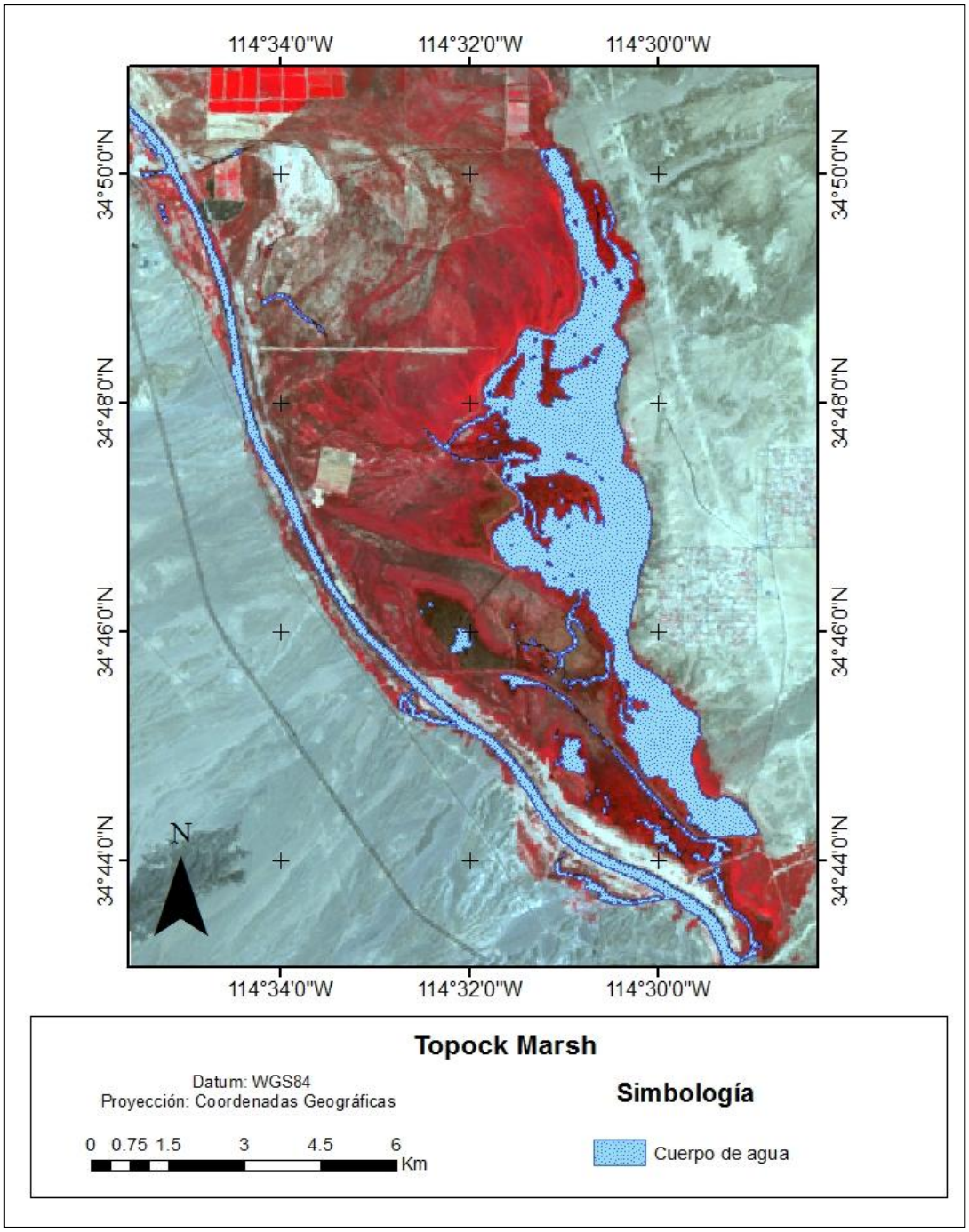


Figura A5.6 . Zona 4: Topock Marsh, Arizona, EUA . Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 19 97. La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

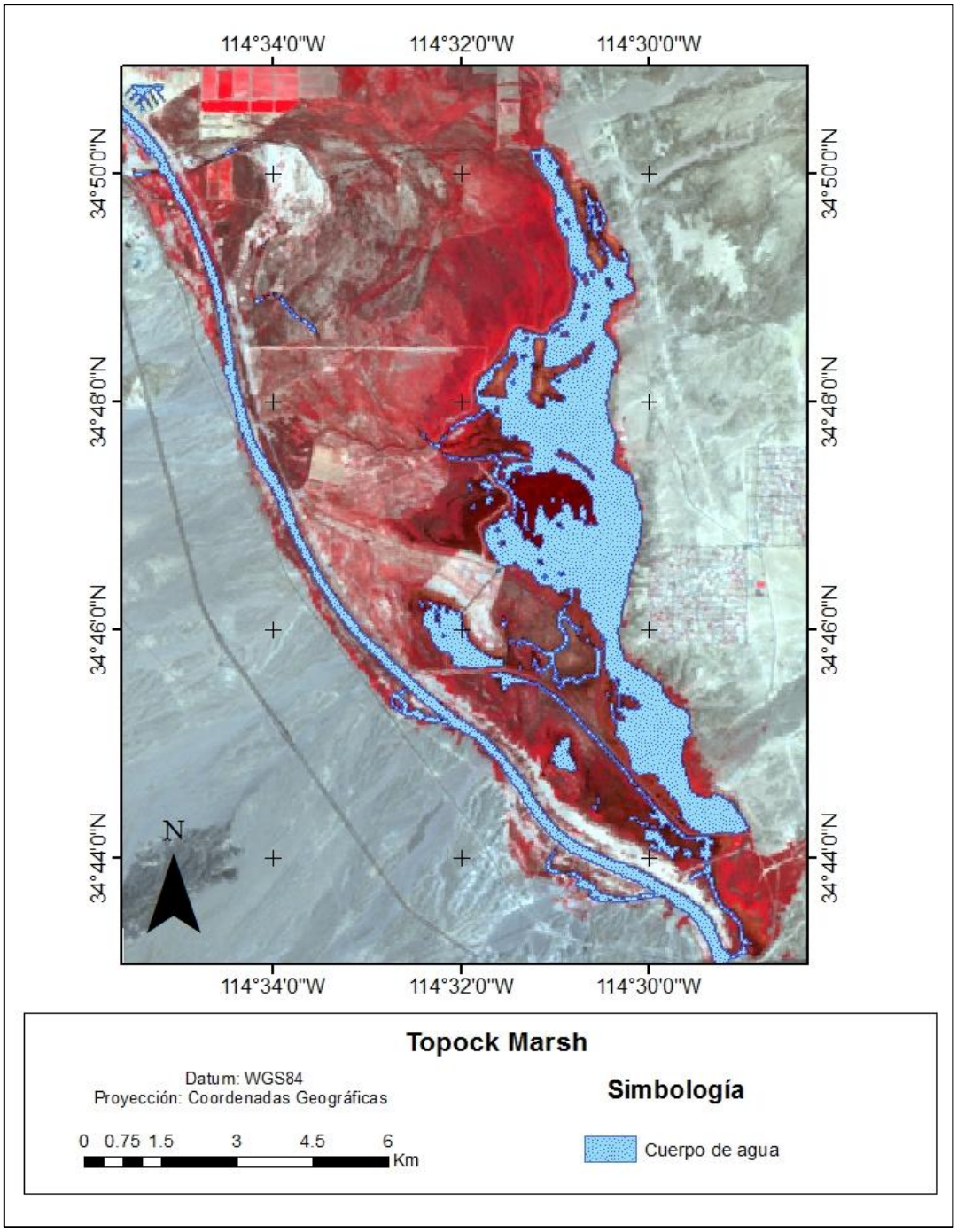


Figura A5.7. Zona 4: Topock Marsh, Arizona, EUA . Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 2002. La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

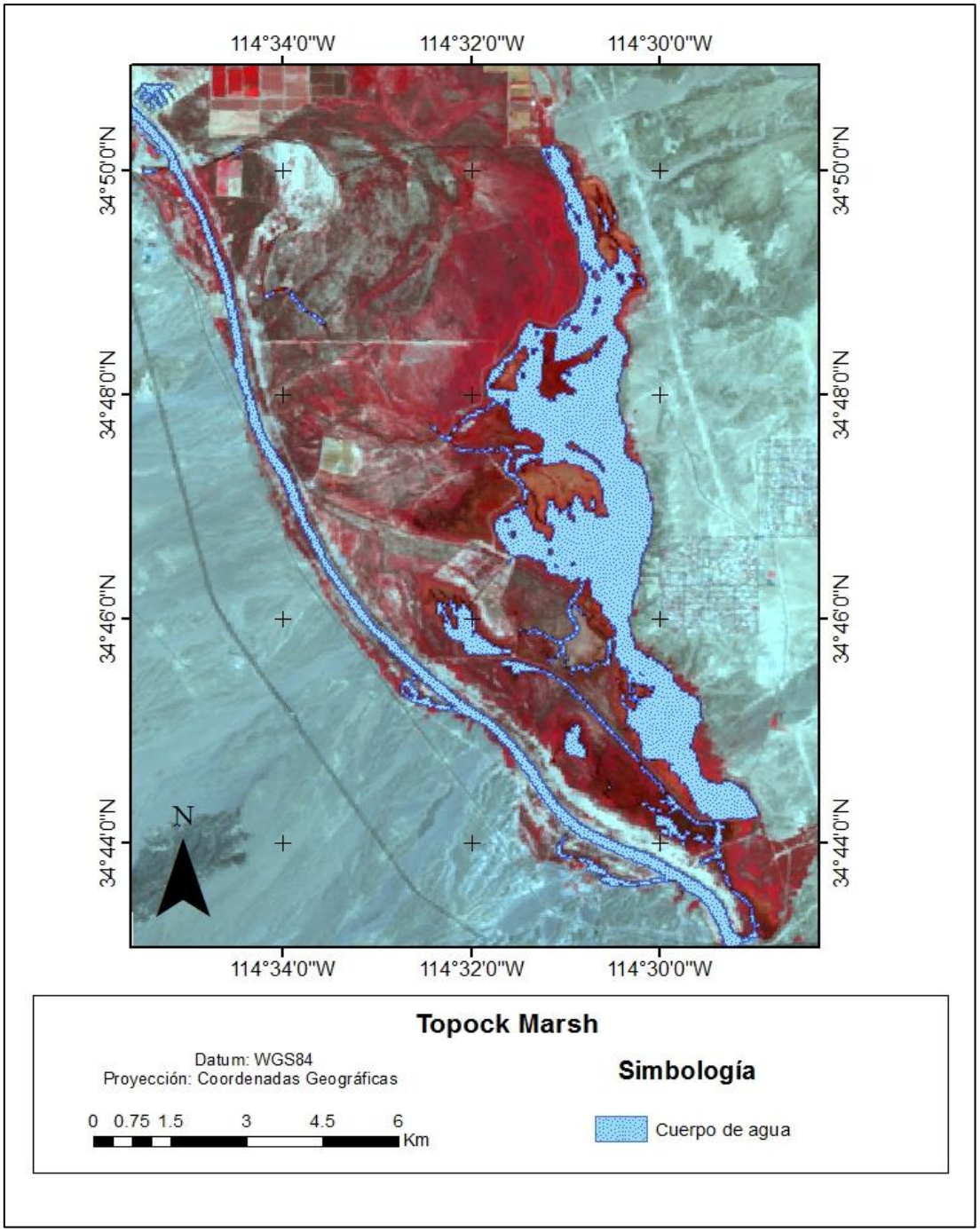


Figura A5.8 . Zona 4: Topock Marsh, Arizona, EUA . Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 200 7. La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

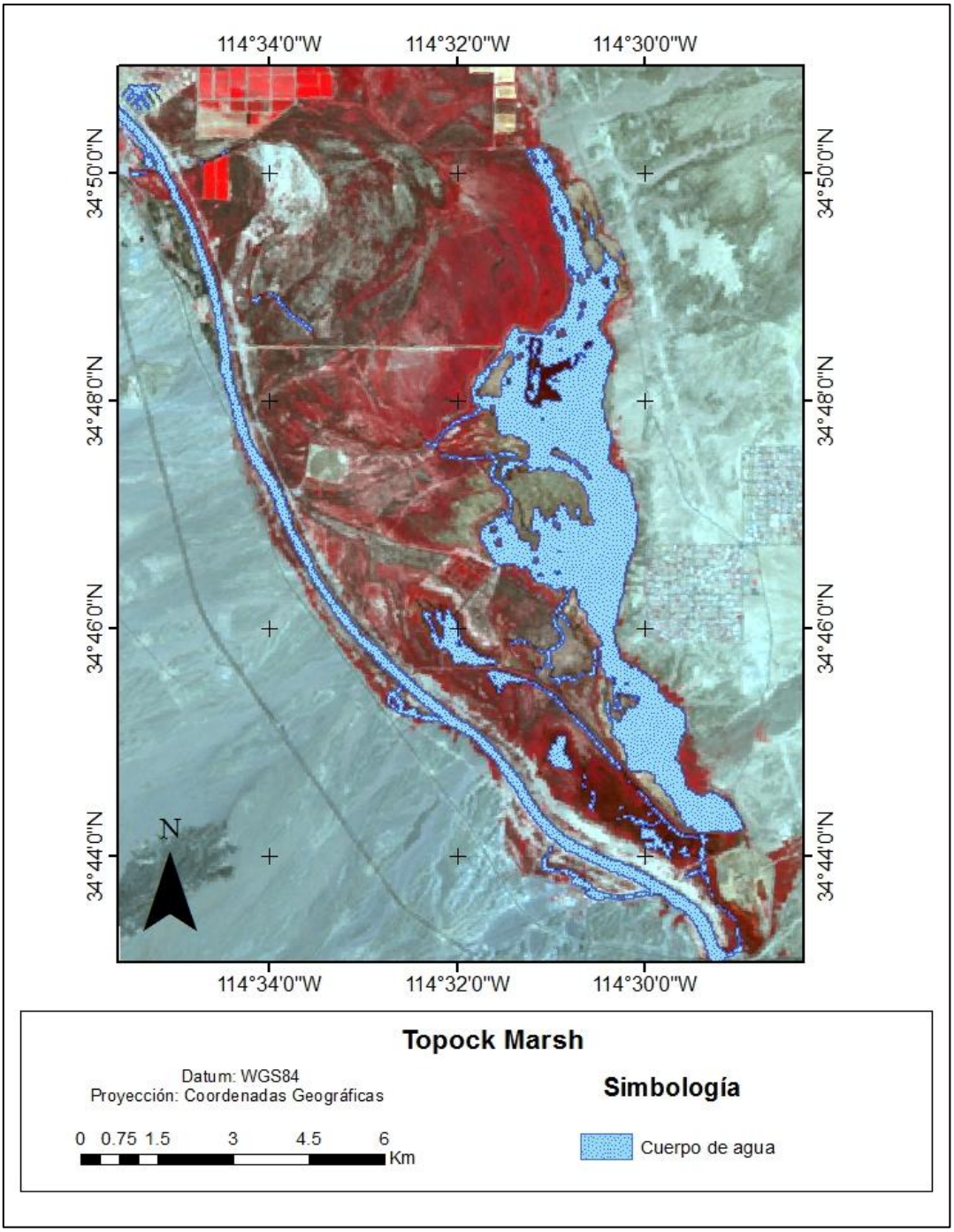


Figura A5.9. Zona 4: Topock Marsh, Arizona, EUA . Resultados de la identificación de los cuer pos de agua para el año 2011. La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

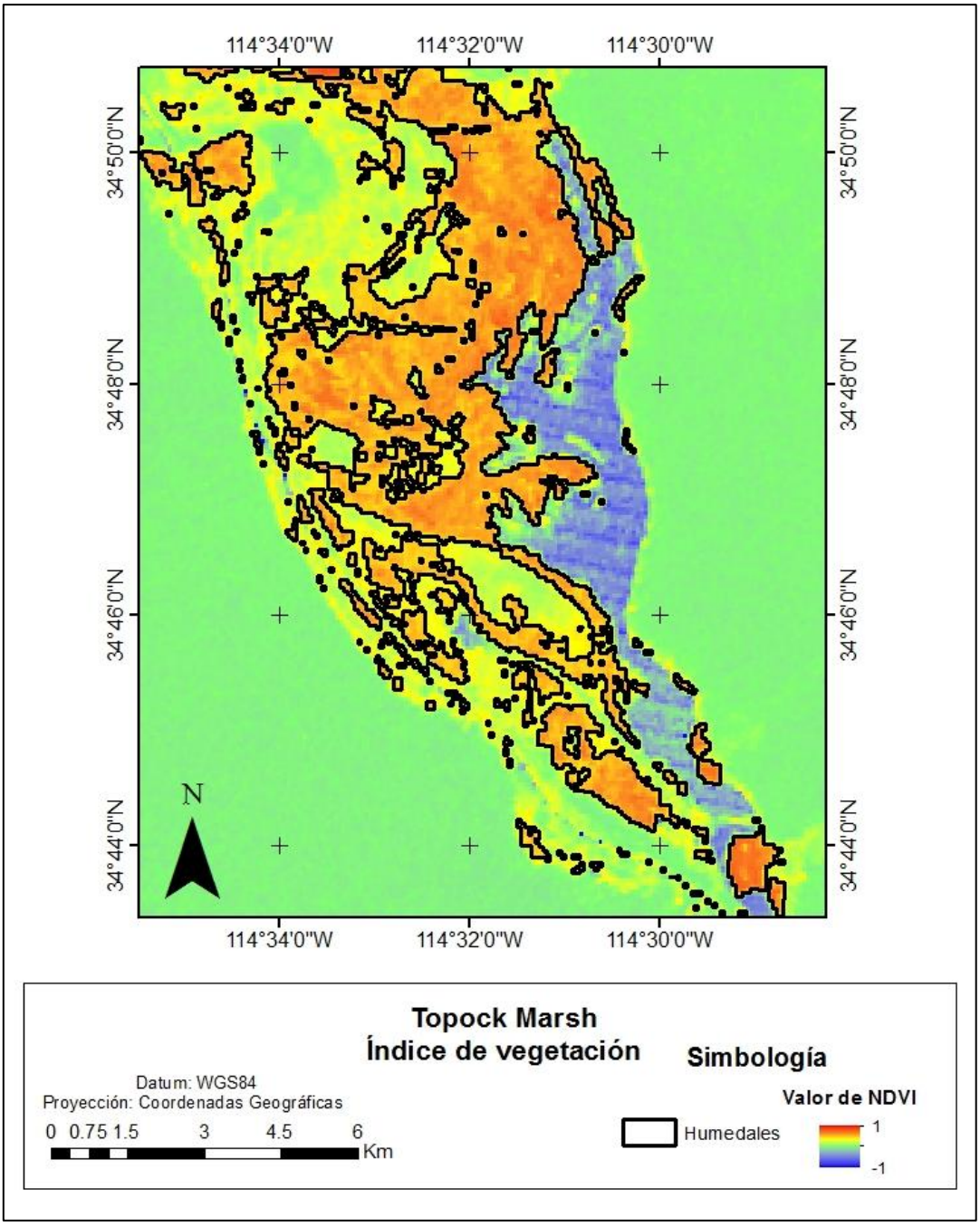


Figura A5.10 . Zona 4: Topock Marsh, Arizona, EUA . Imagen de NDVI para el año 1972. Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales estan vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 1 MSS.

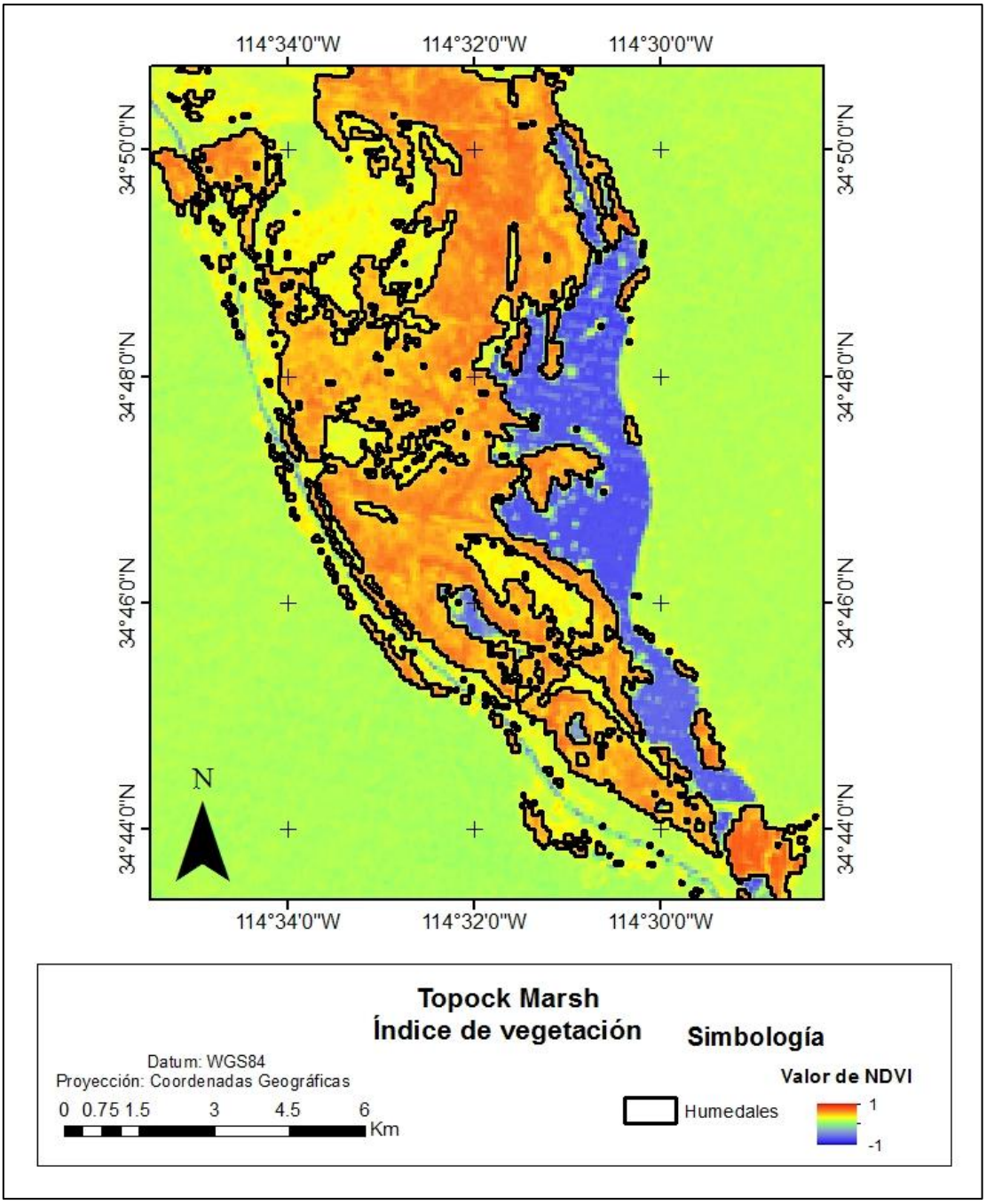


Figura A5.11 . Zona 4: Topock Marsh, Arizona, EUA . Imagen de NDVI para el año 1977. Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales estan vectorizadas. El índic e de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 2 MSS.

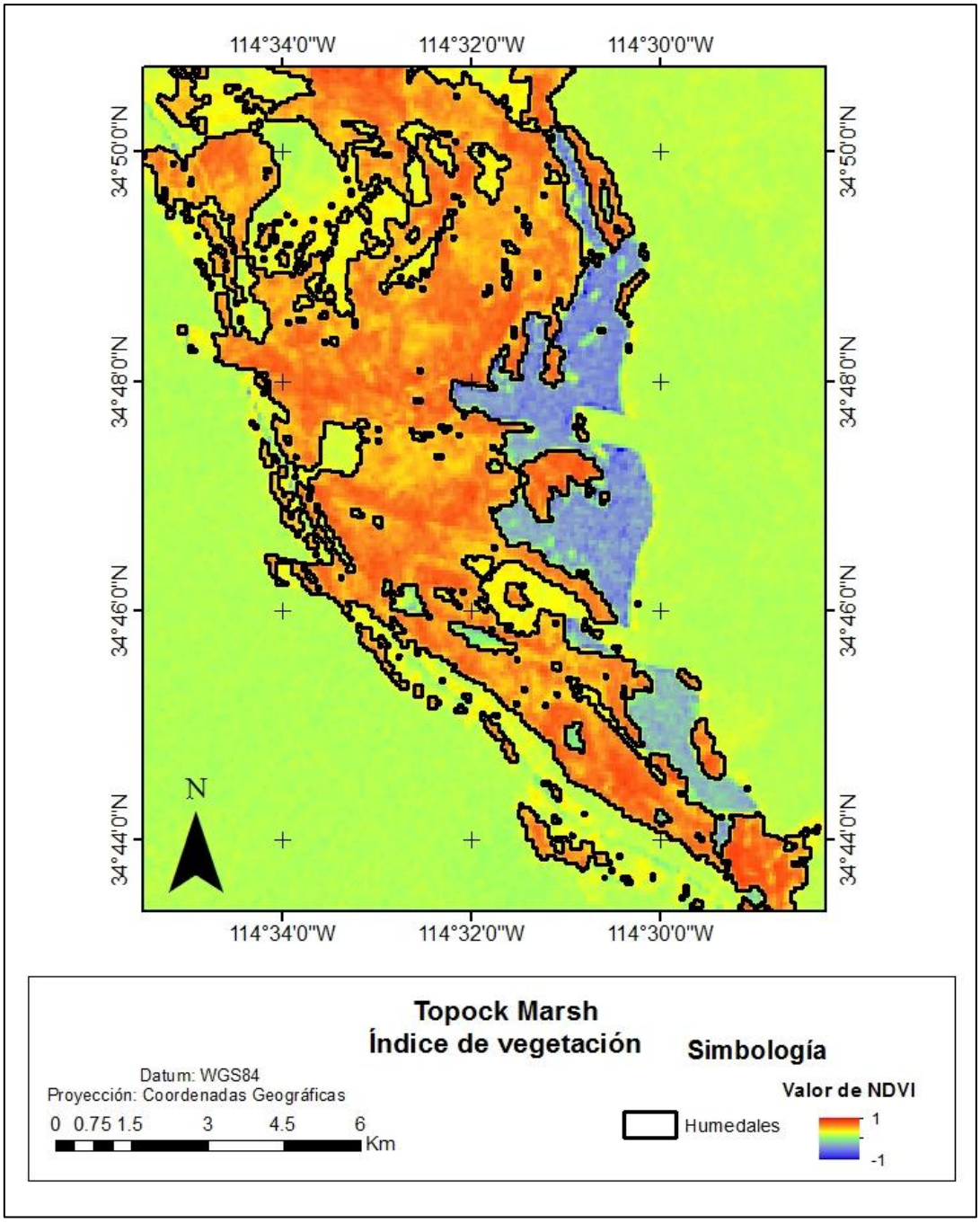


Figura A5.12. Zona 4: Topock Marsh, Arizona, EUA . Imagen de NDVI para el año 1982. Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales estan vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 3 MSS.

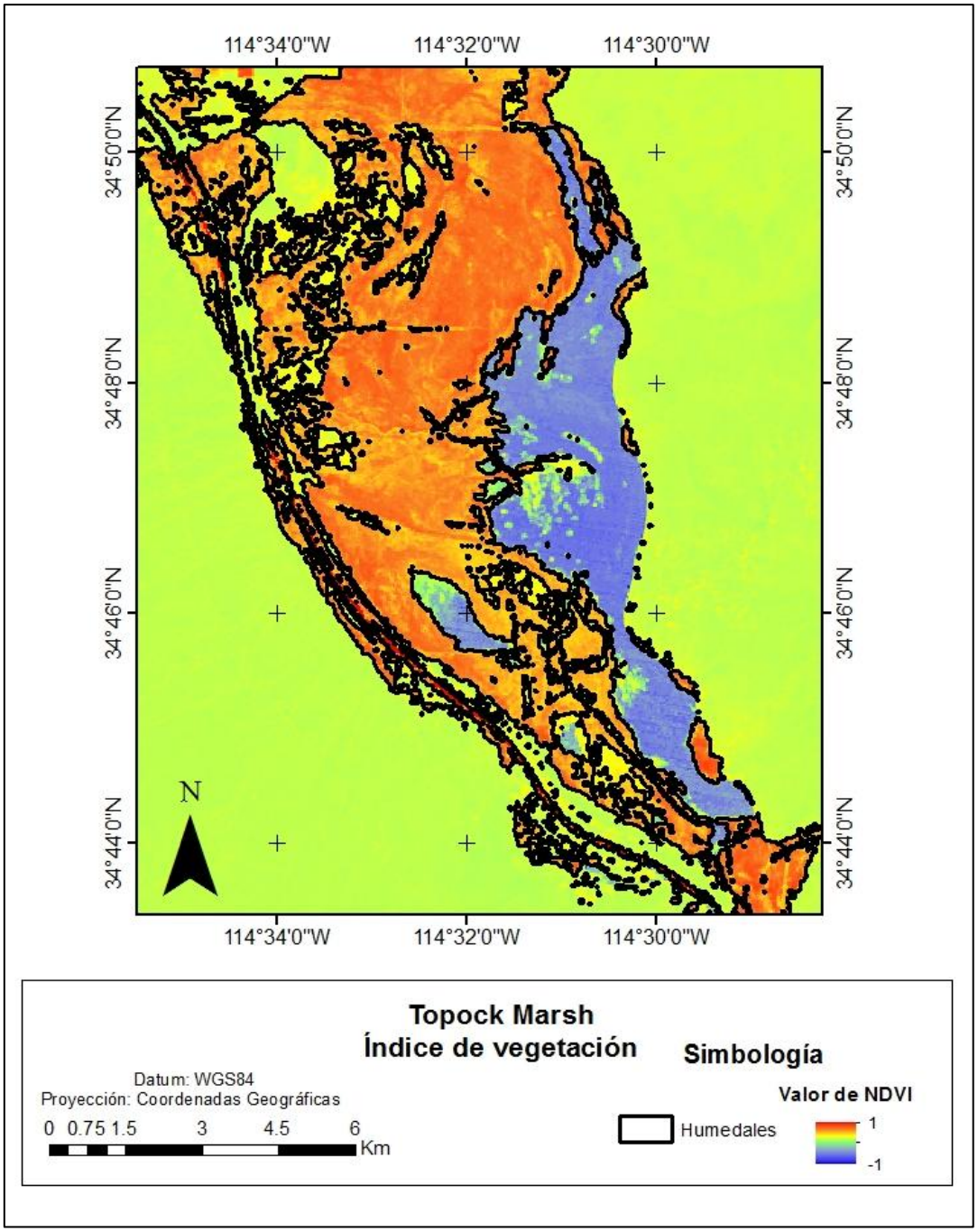


Figura A5.13. Zona 4: Topock Marsh, Arizona, EUA . Imagen de NDVI para el año 1987. Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales estan vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 5 TM.

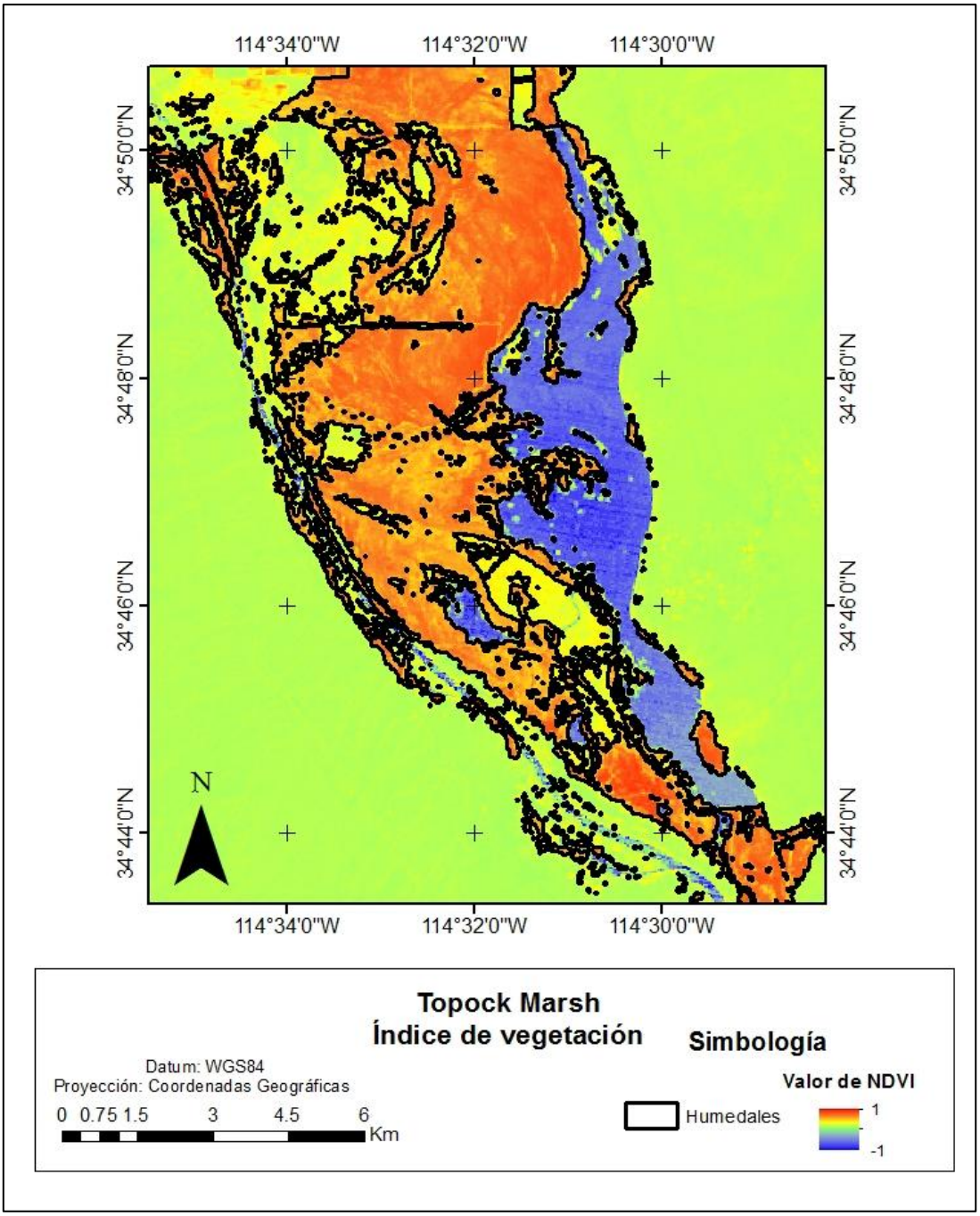


Figura A5.14. Zona 4: Topock Marsh, Arizona, EUA . Imagen de NDVI para el año 1992. Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales estan vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 5 TM.

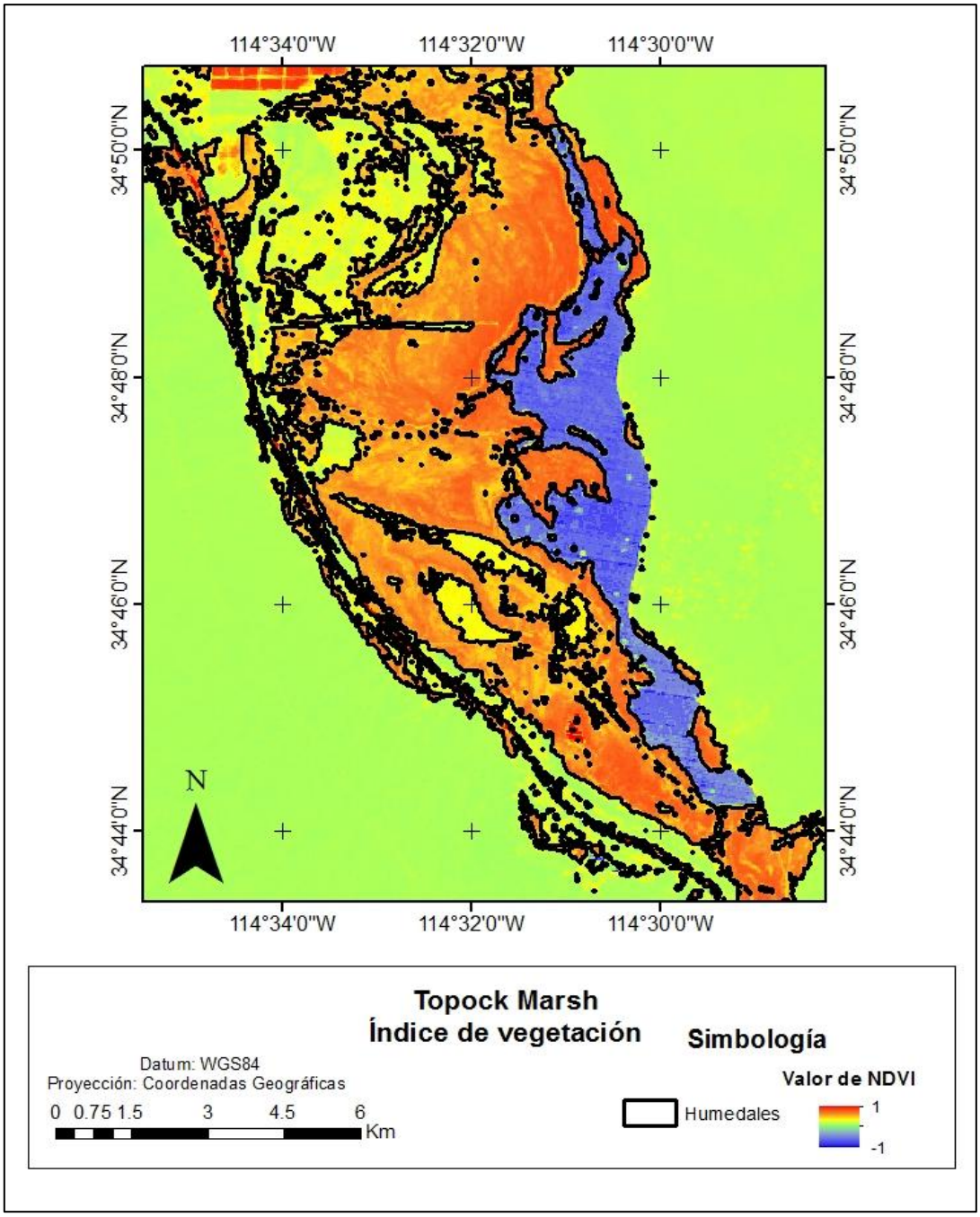


Figura A5.15. Zona 4: Topock Marsh, Arizona, EUA . Imagen de NDVI para el año 1997. Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales estan vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 5 TM.

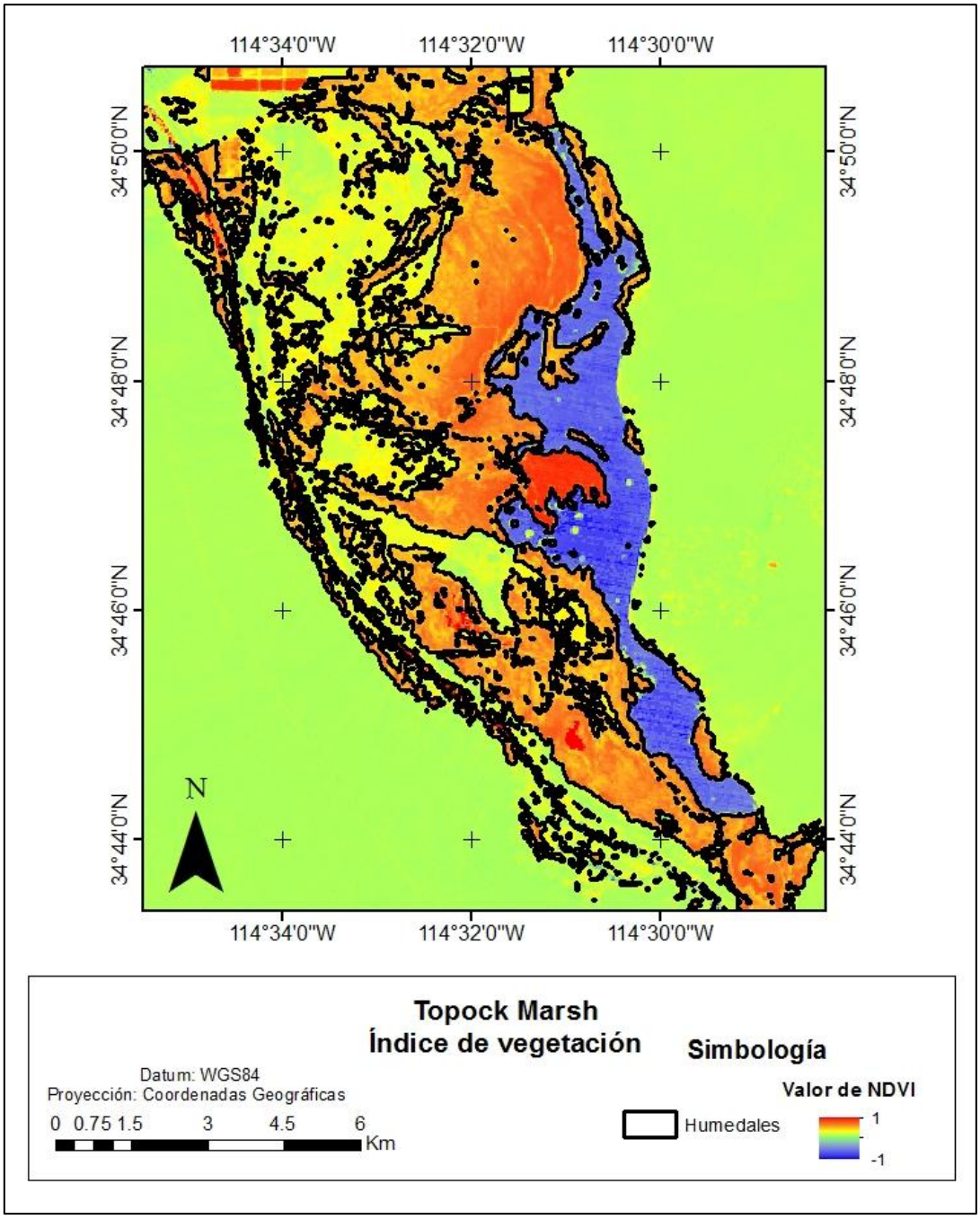


Figura A5.16 . Zona 4: Topock Marsh, Arizona, EUA . Imagen de NDVI para el año 2002. Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales estan vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 5 TM.

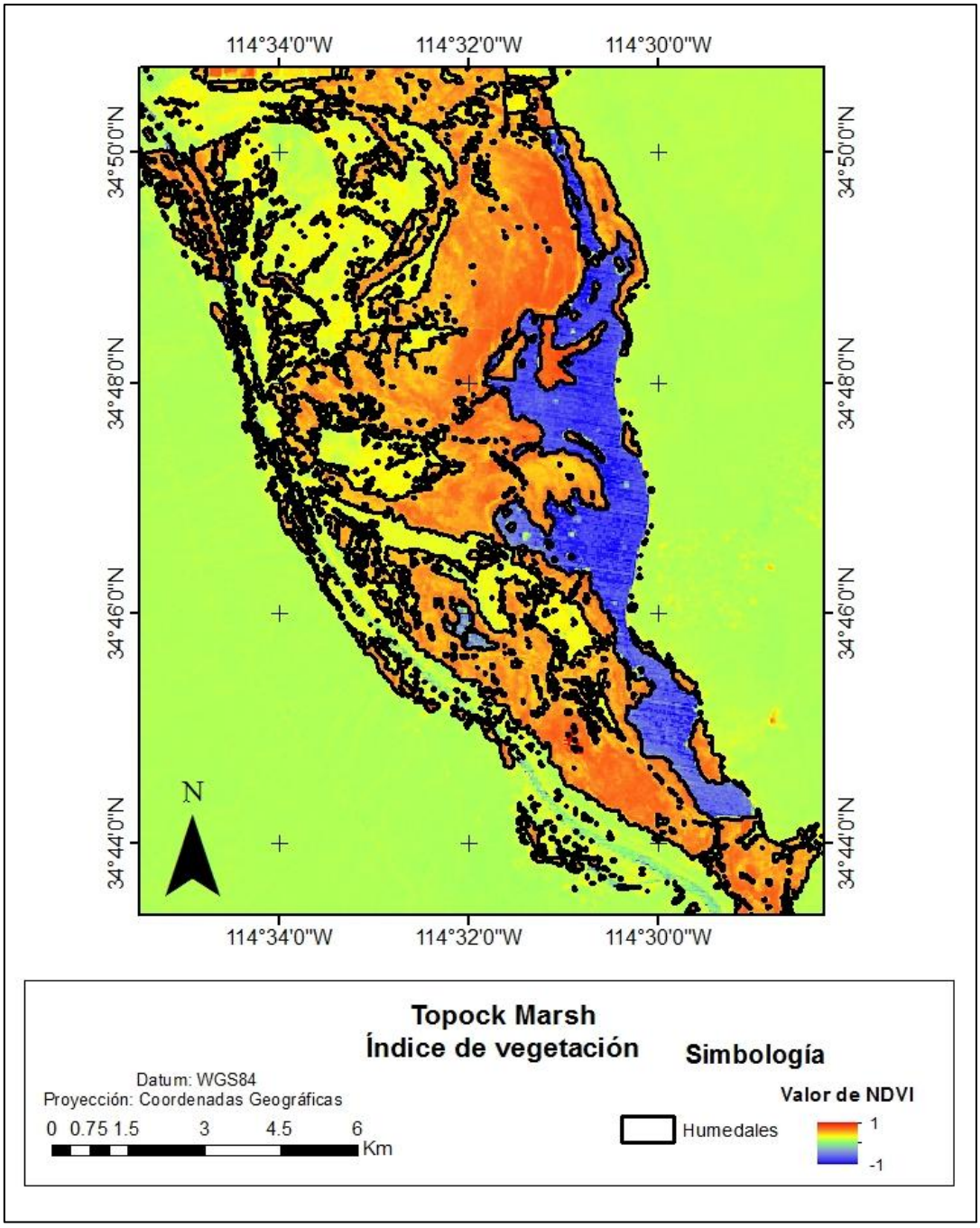


Figura A5.17 . Zona 4: Topock Marsh, Arizona, EUA . Imagen de NDVI para el año 2007. Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales estan vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 5 TM.

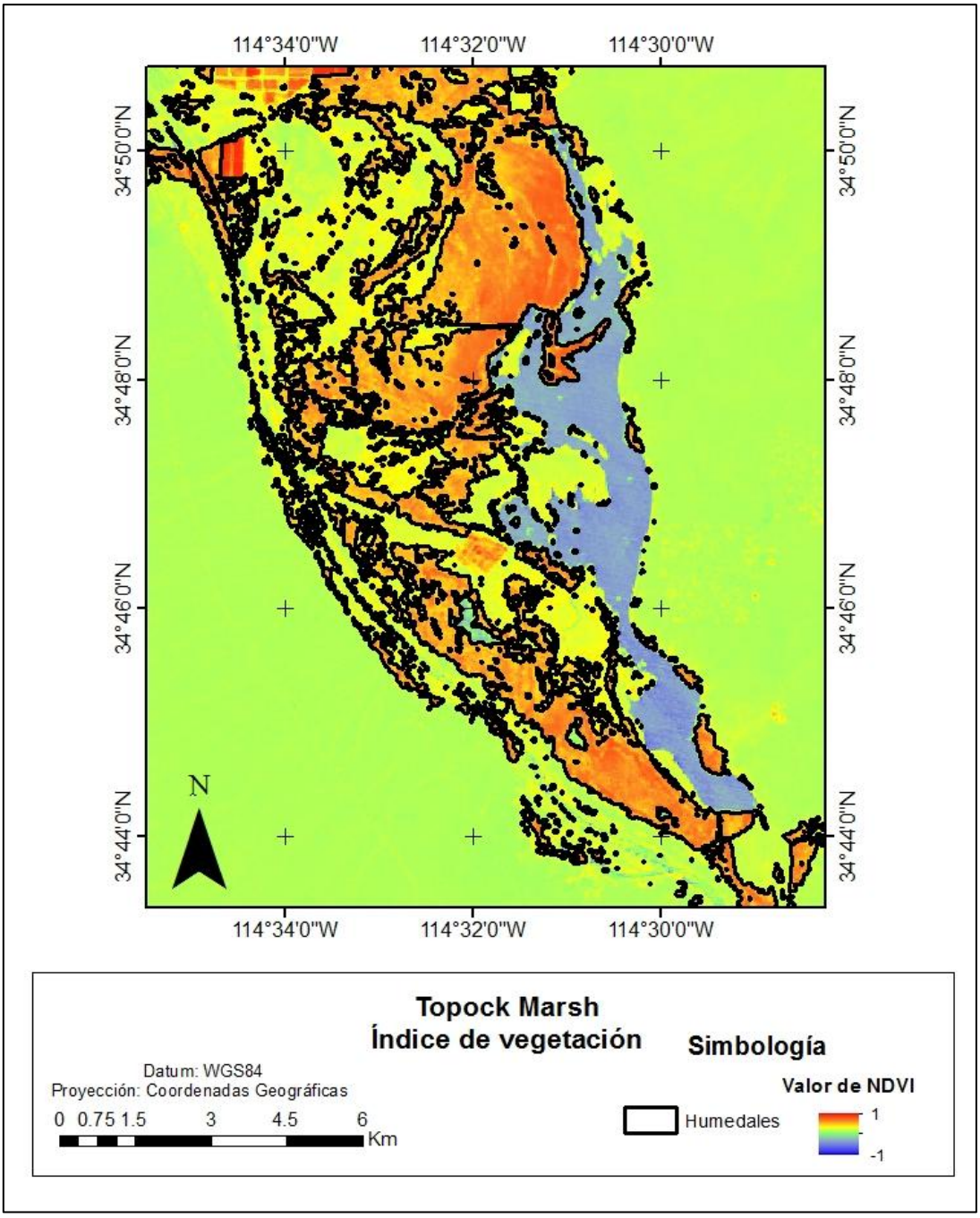


Figura A5.18 . Zona 4: Topock Marsh, Arizona, EUA . Imagen de NDVI para el año 2011. Las áreas de la cubierta veget al de los humedales estan vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 5 TM.

ANEXO 6

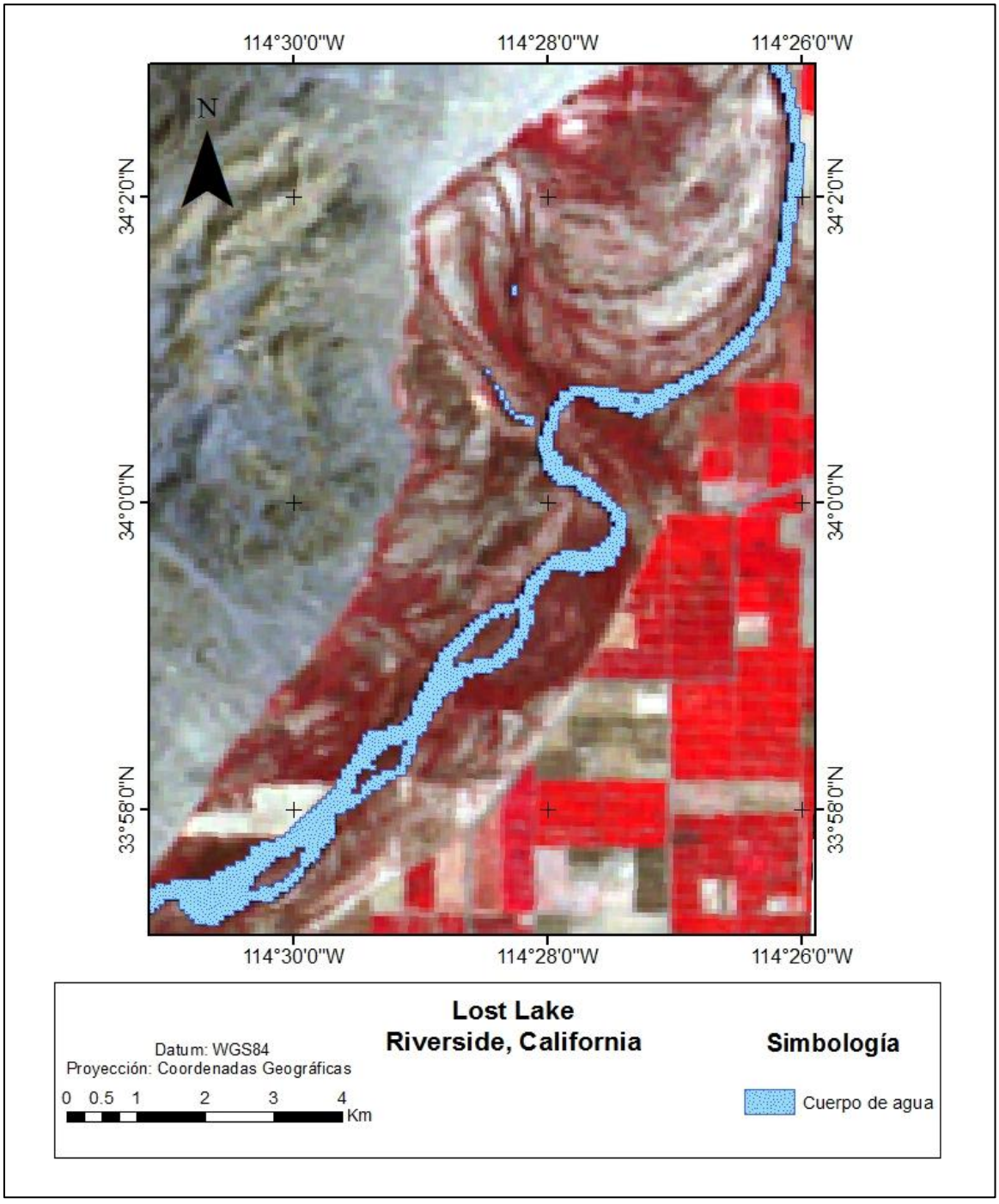


Figura A6.1. Zona 5: Lost Lake, California, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1972. La imagen en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 1 MSS se está usando como fondo.

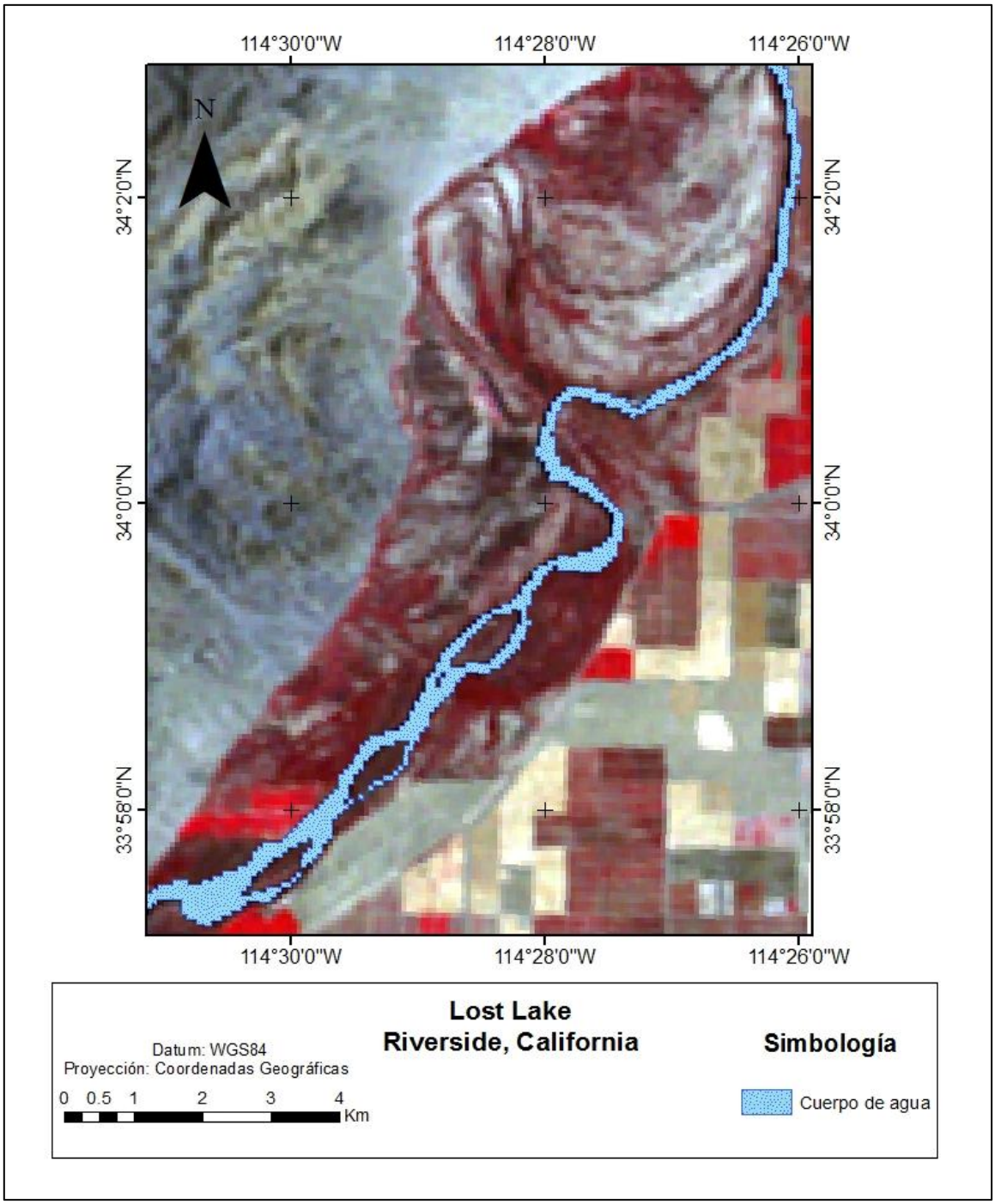


Figura A6.2 . Zona 5: Lost Lake, California, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 197 7. La imagen en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 d e Landsat 2 MSS se está usando como fondo.

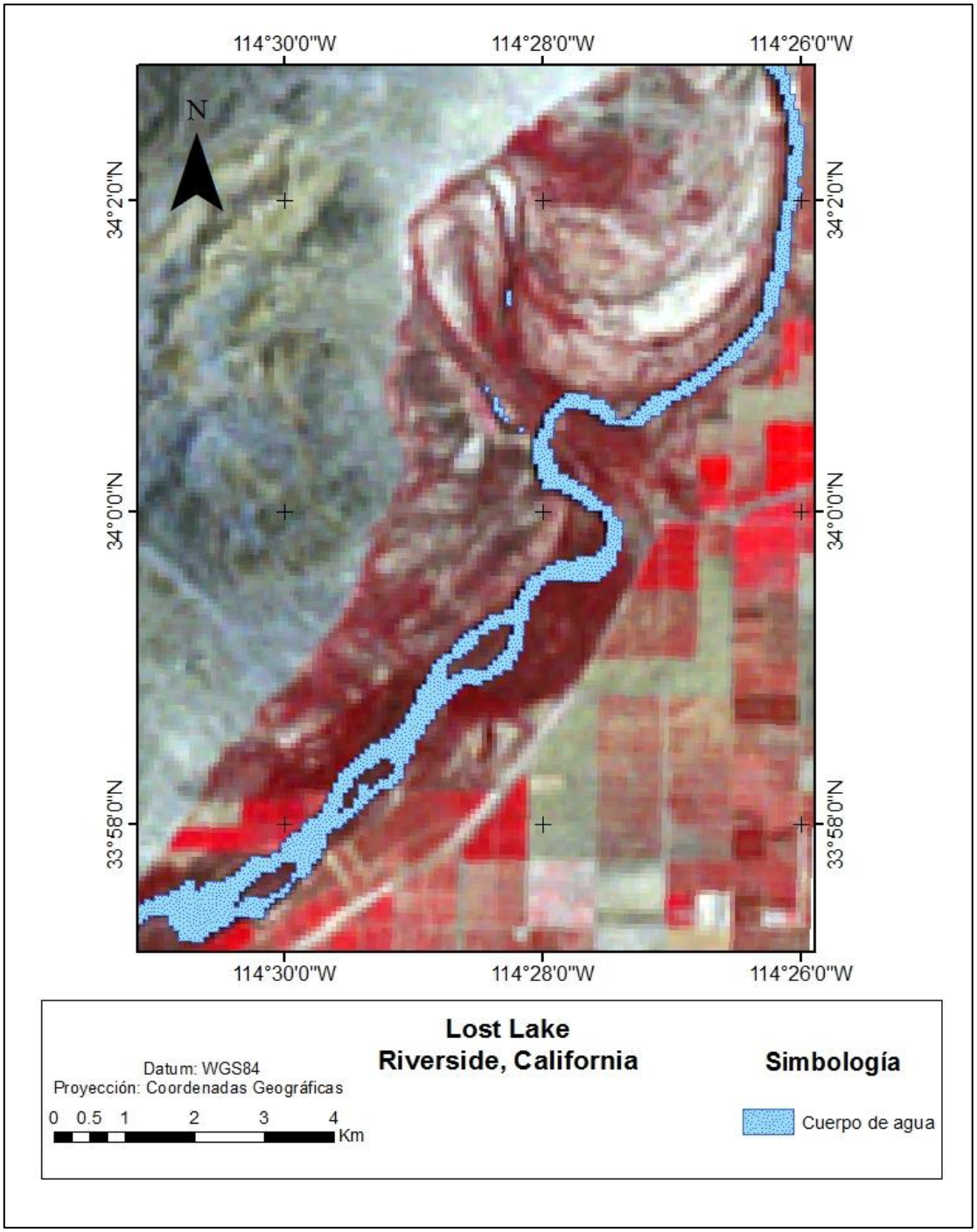


Figura A6.3 . Zona 5: Lost Lake, California, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 198 2. La imagen en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 3 MSS se está usando como fo ndo.

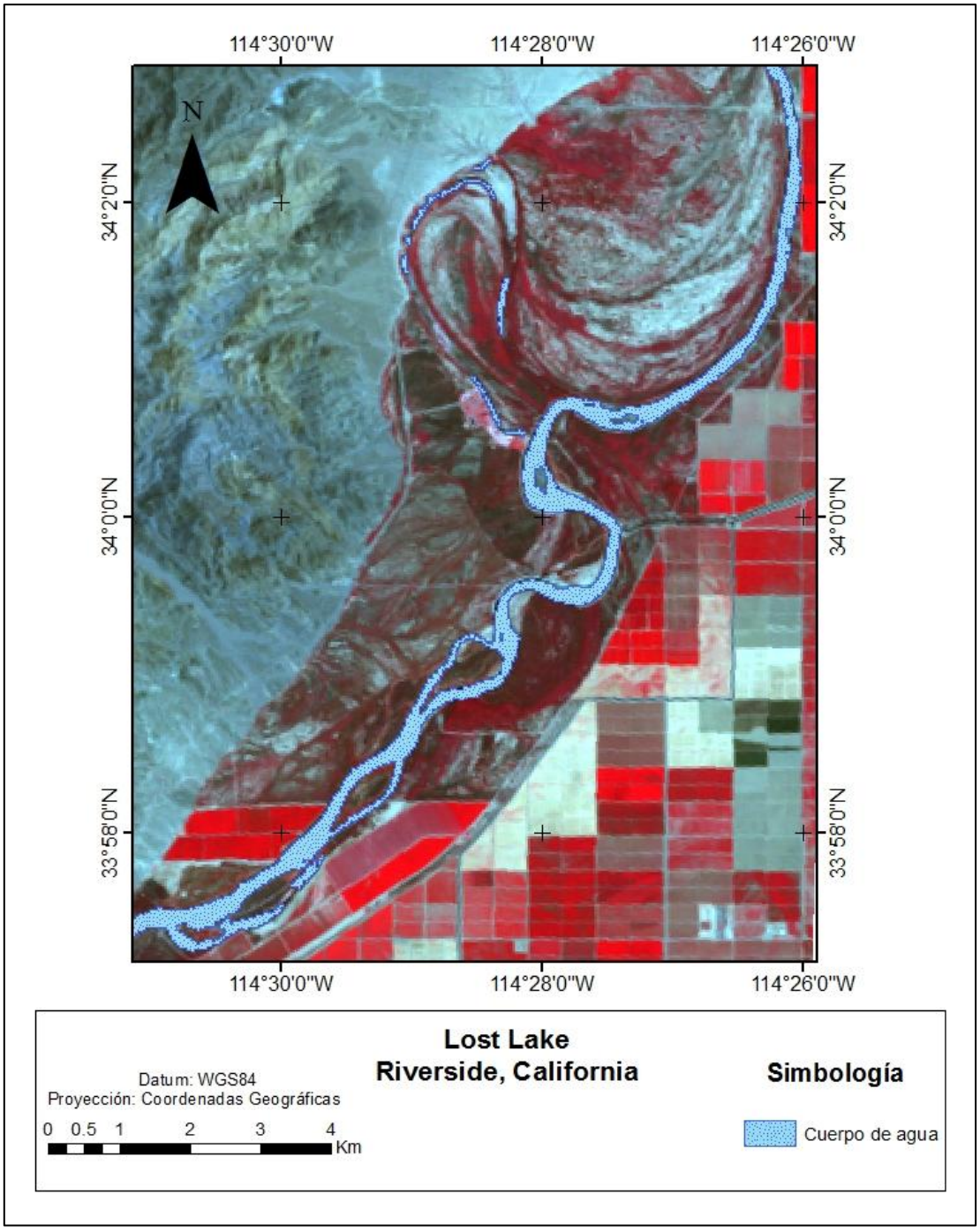


Figura A6.4 . Zona 5: Lost Lake, California, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1987 . La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

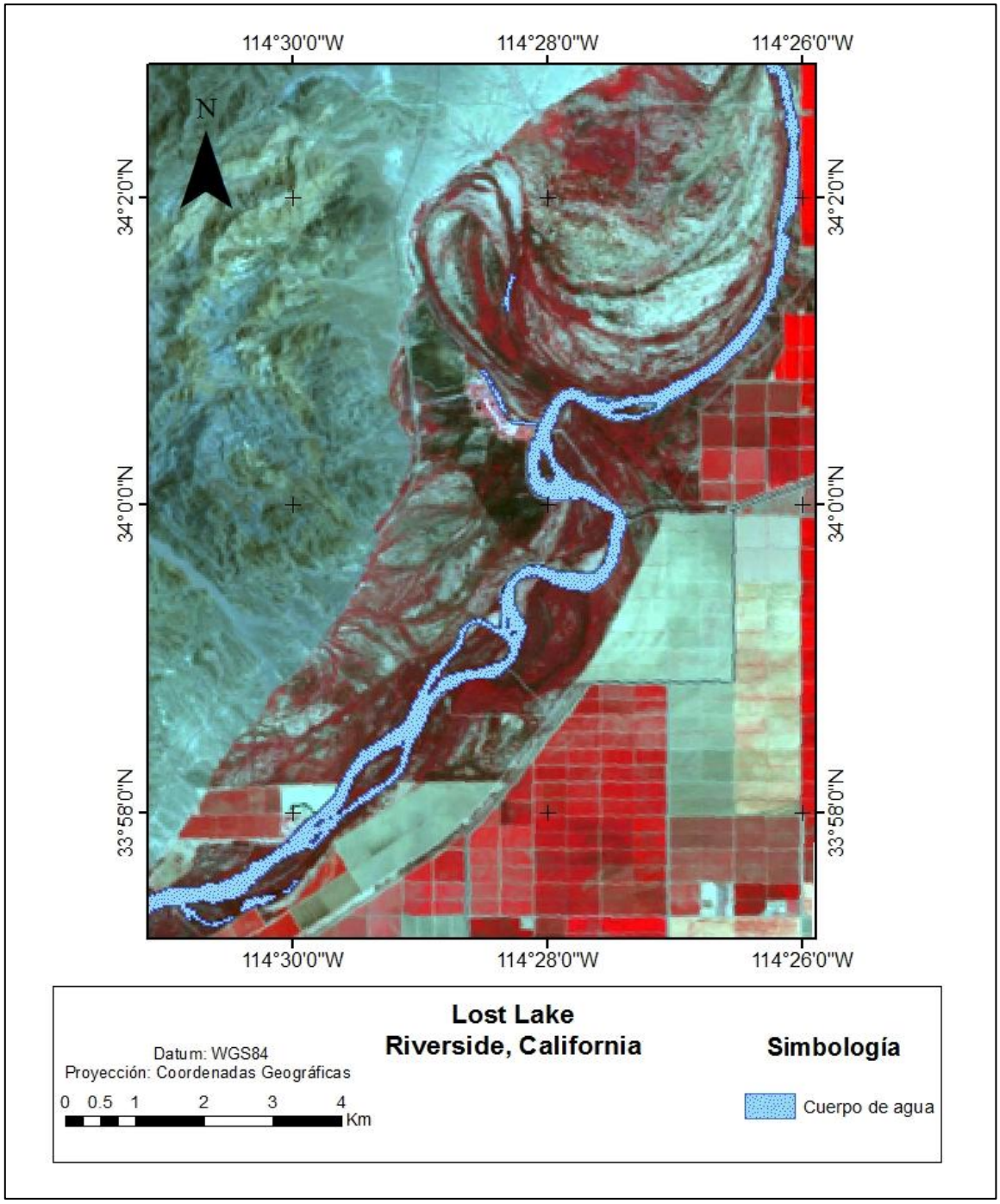


Figura A6.5. Zona 5: Lost Lake, California, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1992. La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

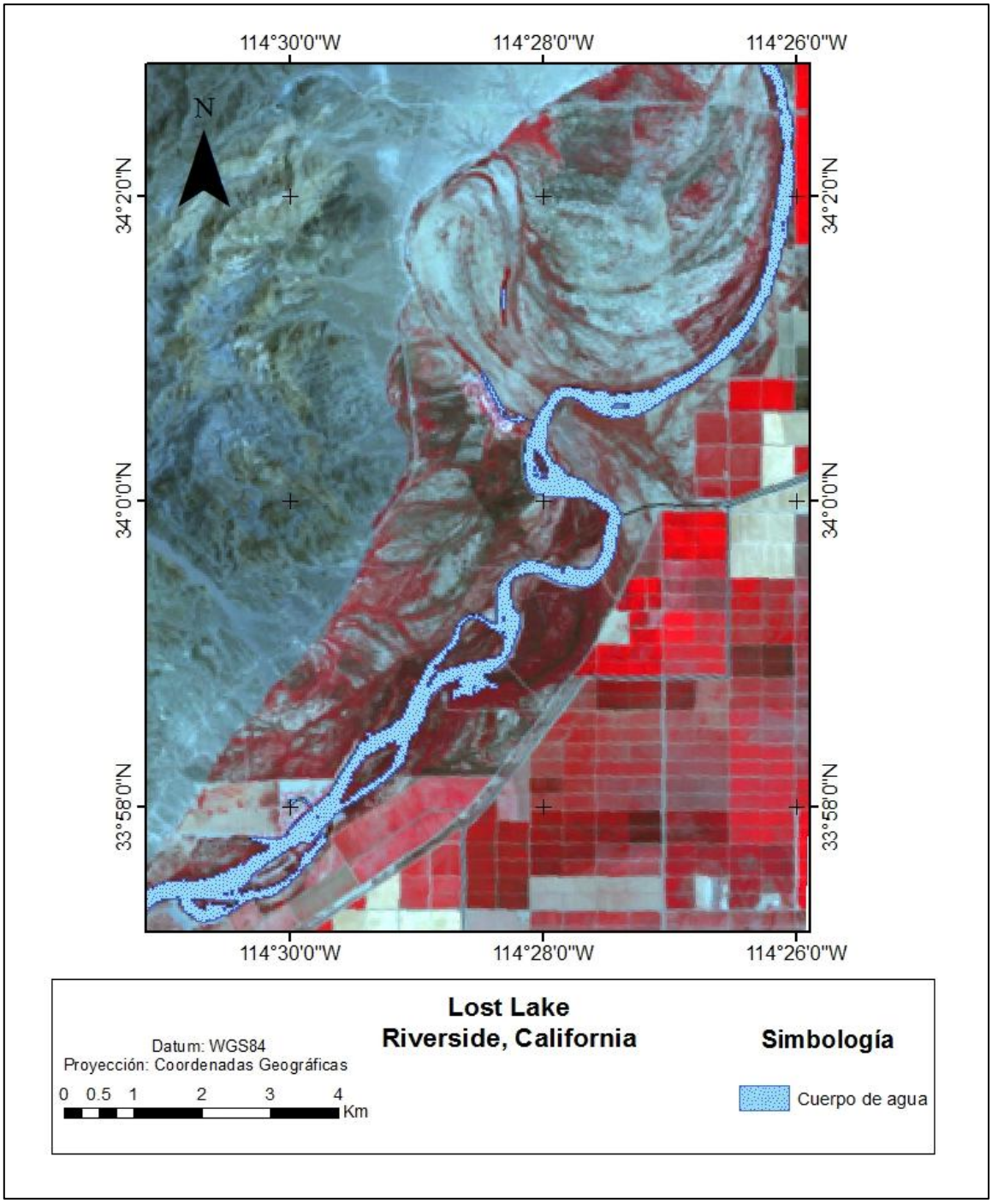


Figura A6.6. Zona 5: Lost Lake, California, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1997. La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

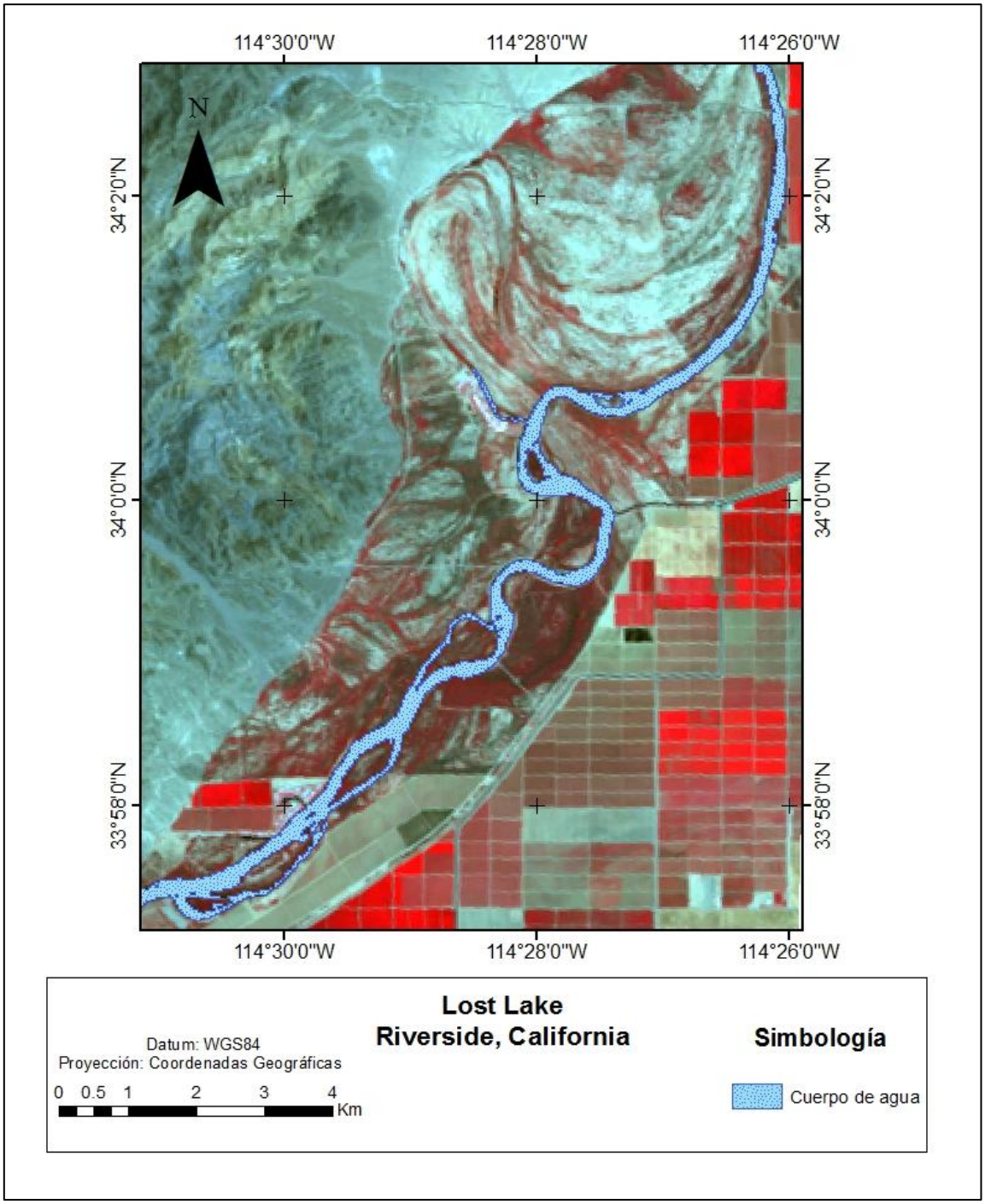


Figura A6.7. Zona 5: Lost Lake, California, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 2002. La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

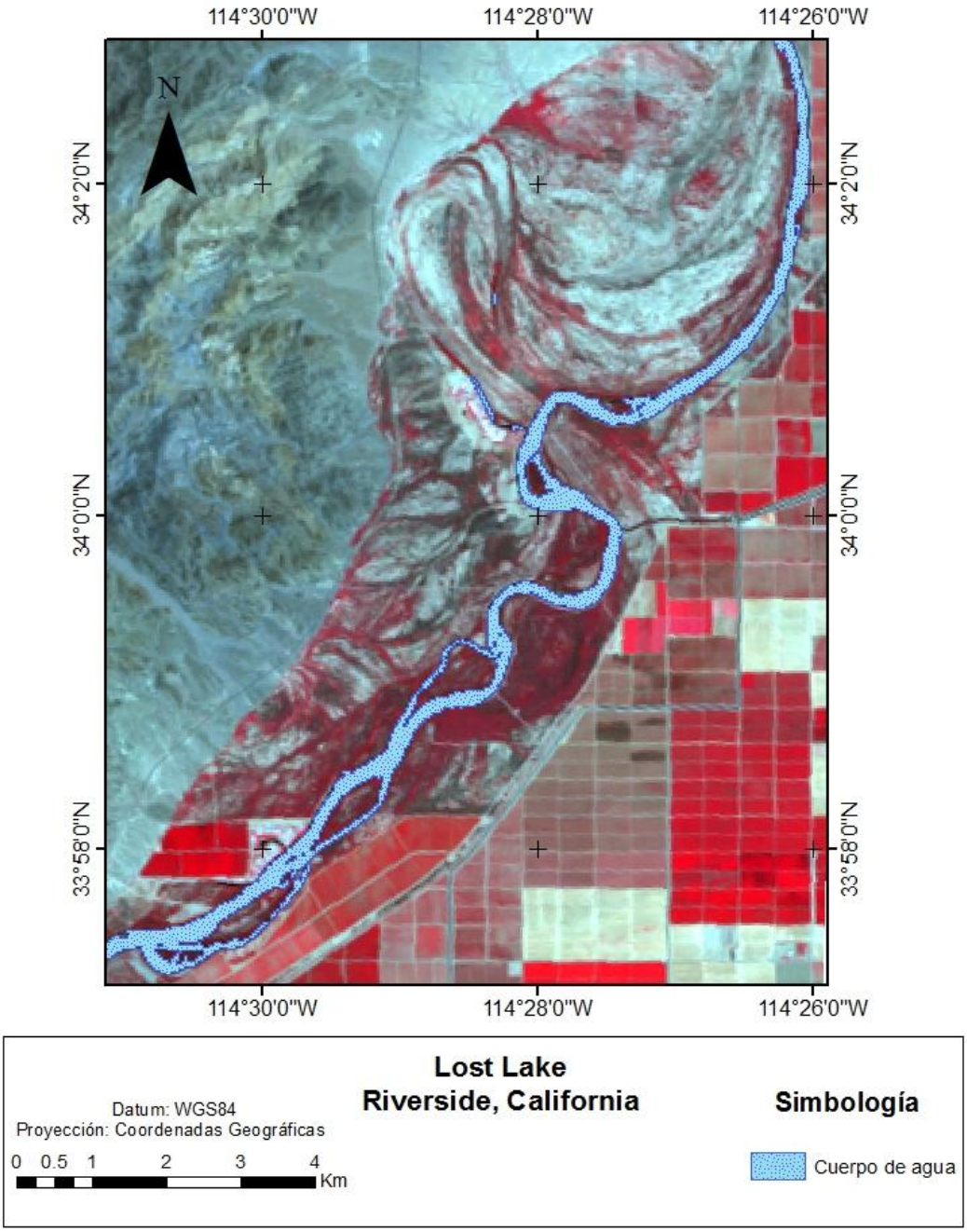


Figura A6.8 . Zona 5: Lost Lake, California, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 2007 . La imagen en falso color in frarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

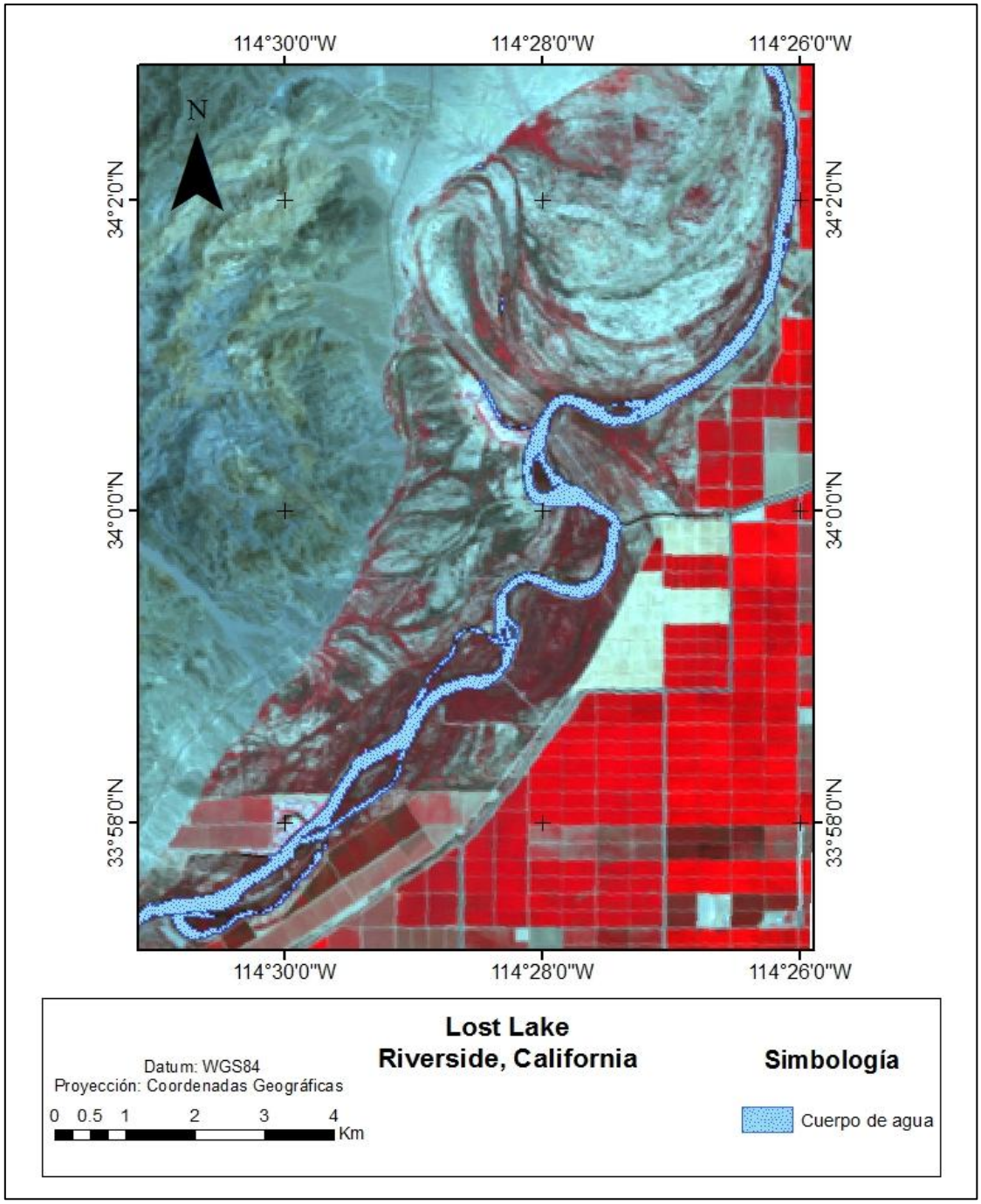


Figura A6.9. Zona 5: Lost Lake, California, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 2011. La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

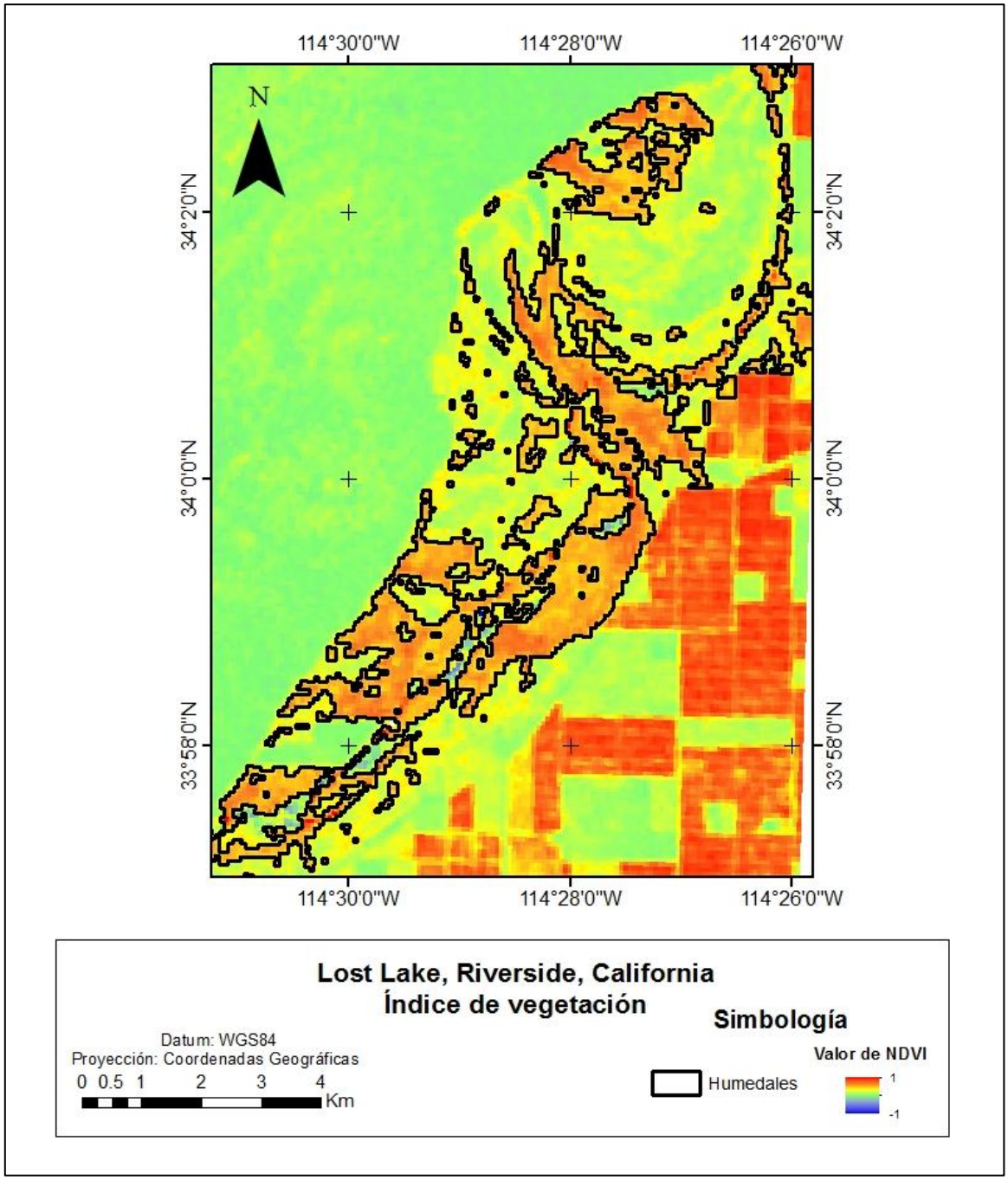


Figura A6.10 . Zona 5: Lost Lake, California, EUA. Imagen de NDVI para el año 1972. Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales estan vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 1 MSS.

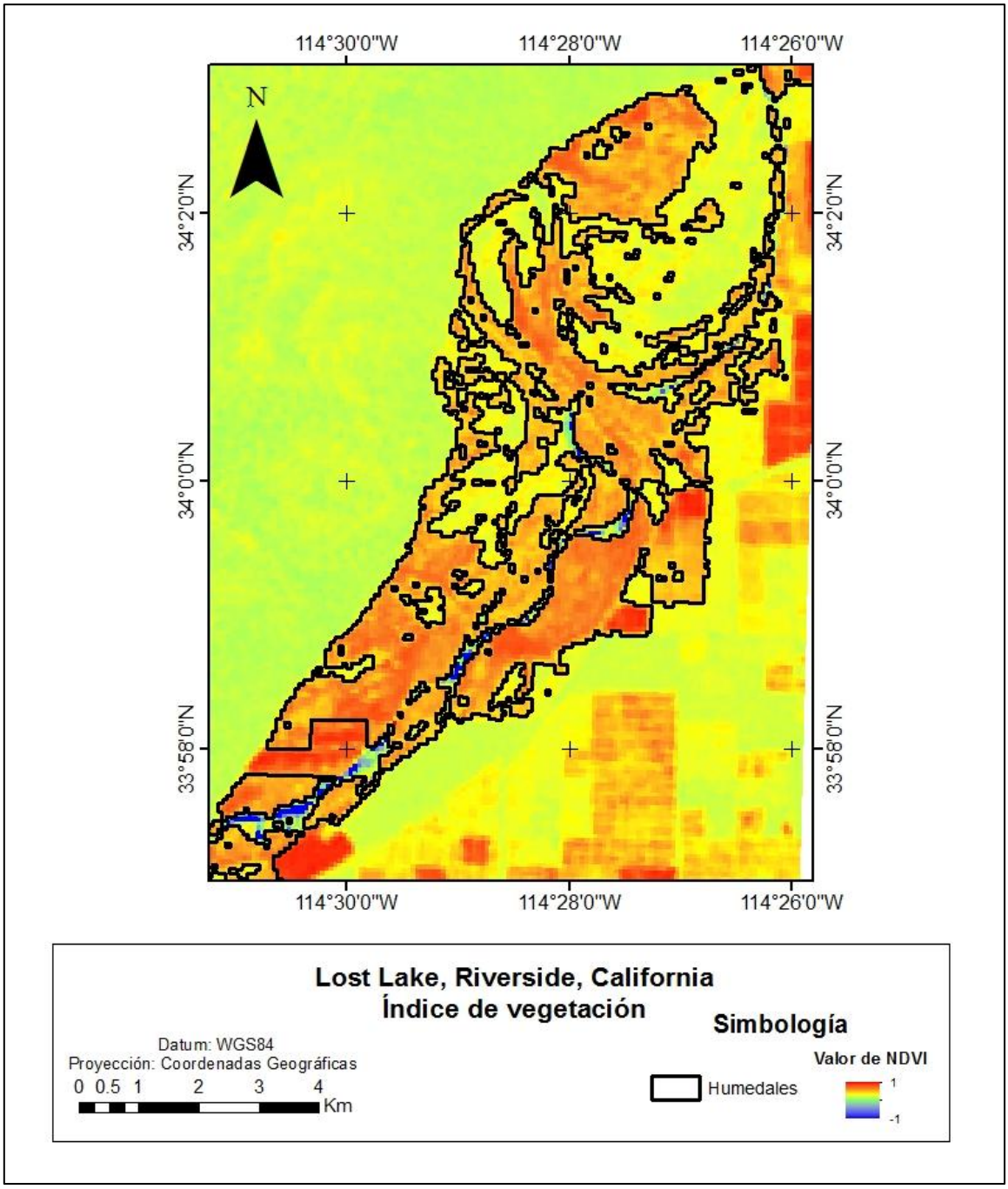


Figura A6.11 . Zona 5: Lost Lake, California, EUA. Imagen de NDVI para el año 1977. Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales estan vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 2 MSS.

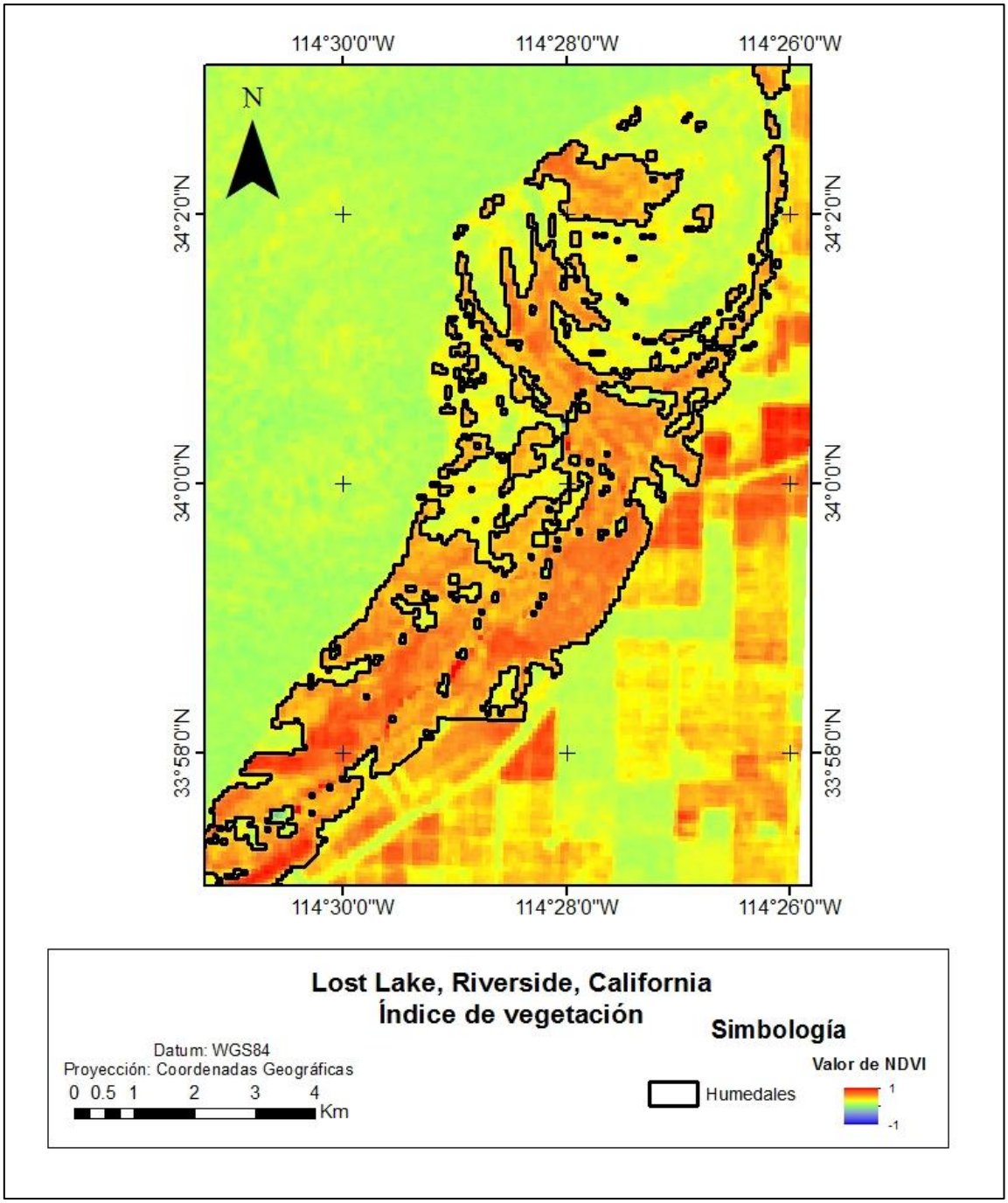


Figura A6.12. Zona 5: Lost Lake , California, EUA. Imagen de NDVI para el año 1982. Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales estan vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 3 MSS.

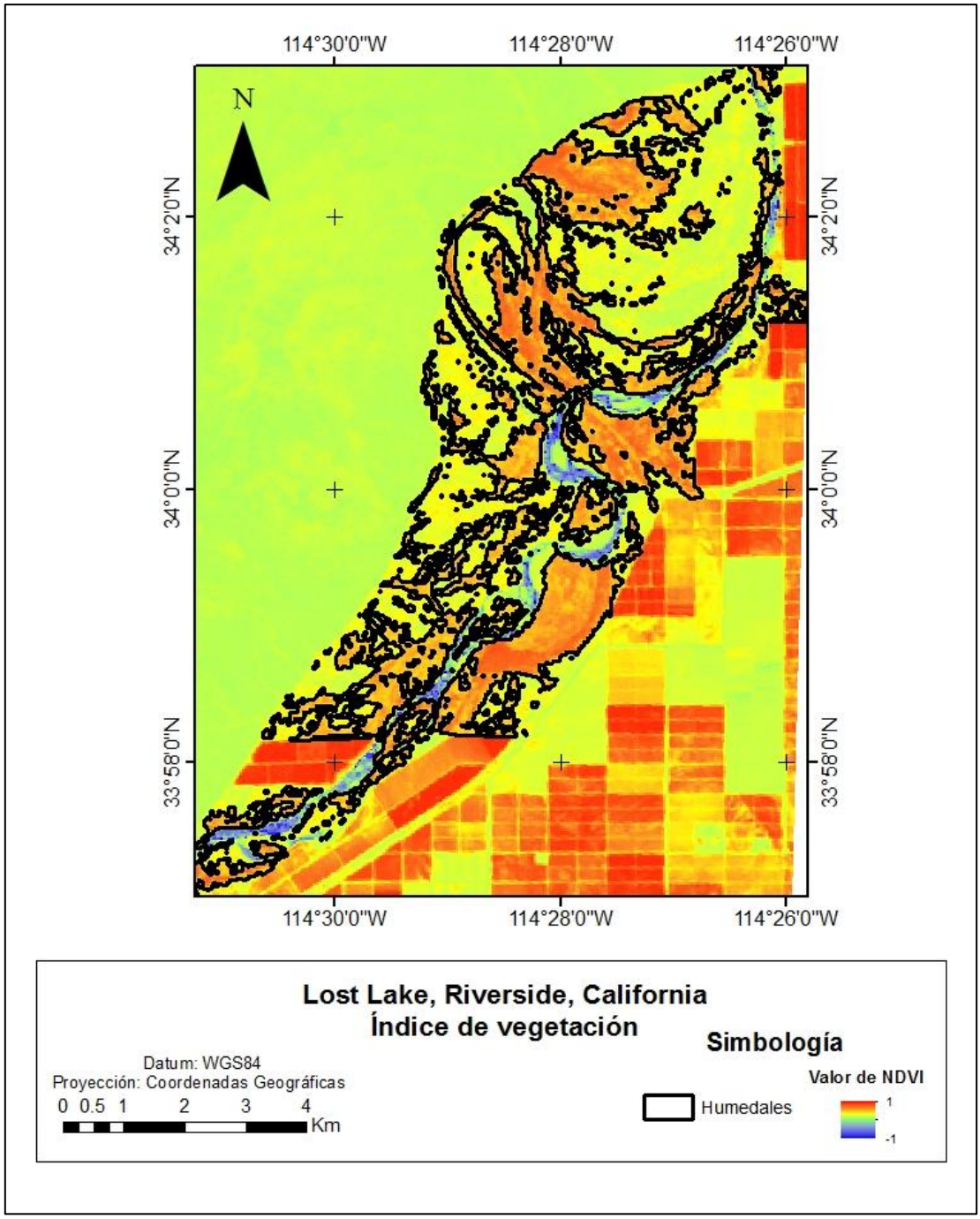


Figura A6.13. Zona 5: Lost Lake, California, EUA. Imagen de NDVI para el año 1987. Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales estan vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a part ir de la imagen de Landsat 5 TM.

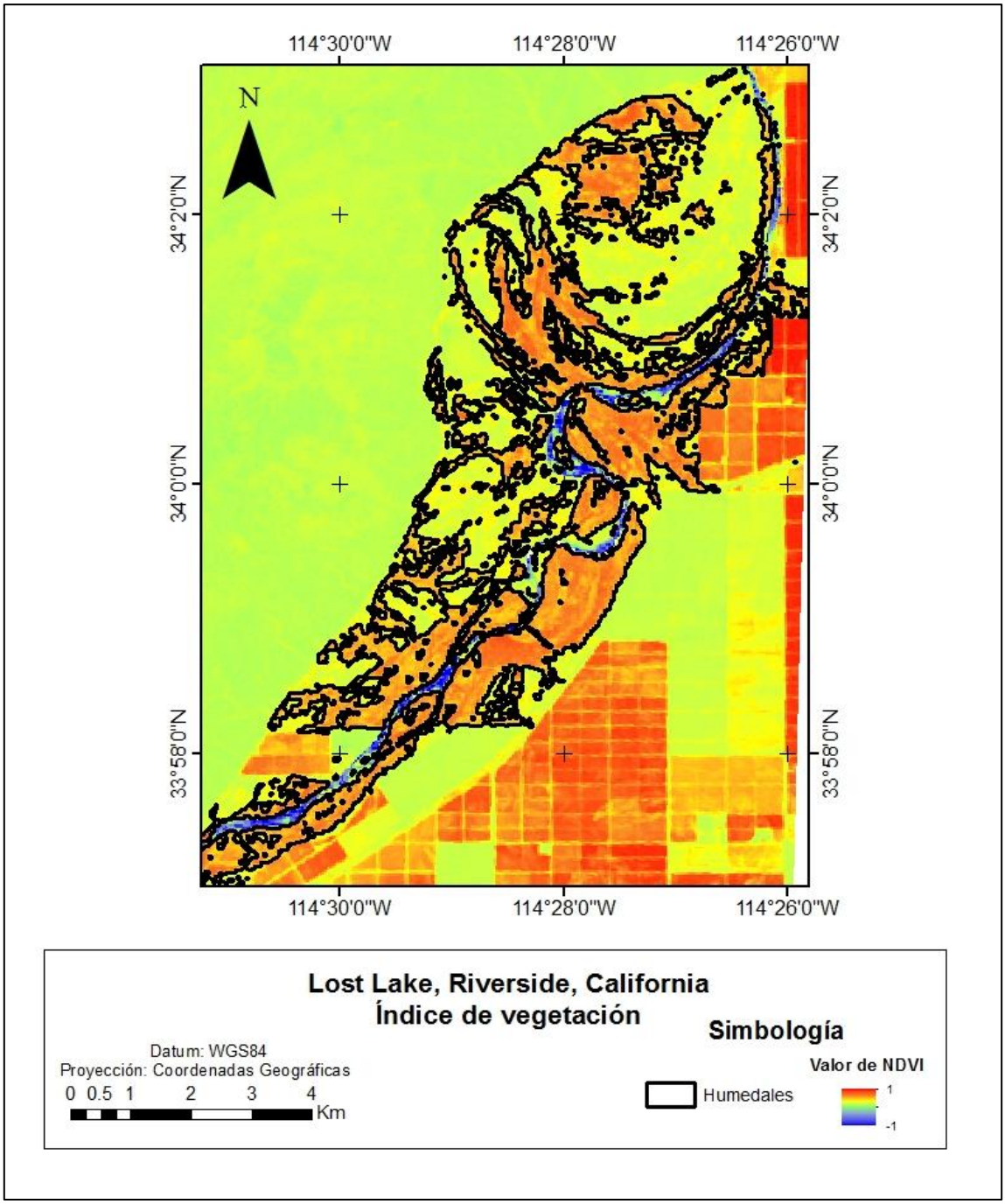


Figura A6.14. Zona 5: Lost Lake, California, EUA. Imagen de NDVI para el año 1992. Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales estan vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 5 TM.

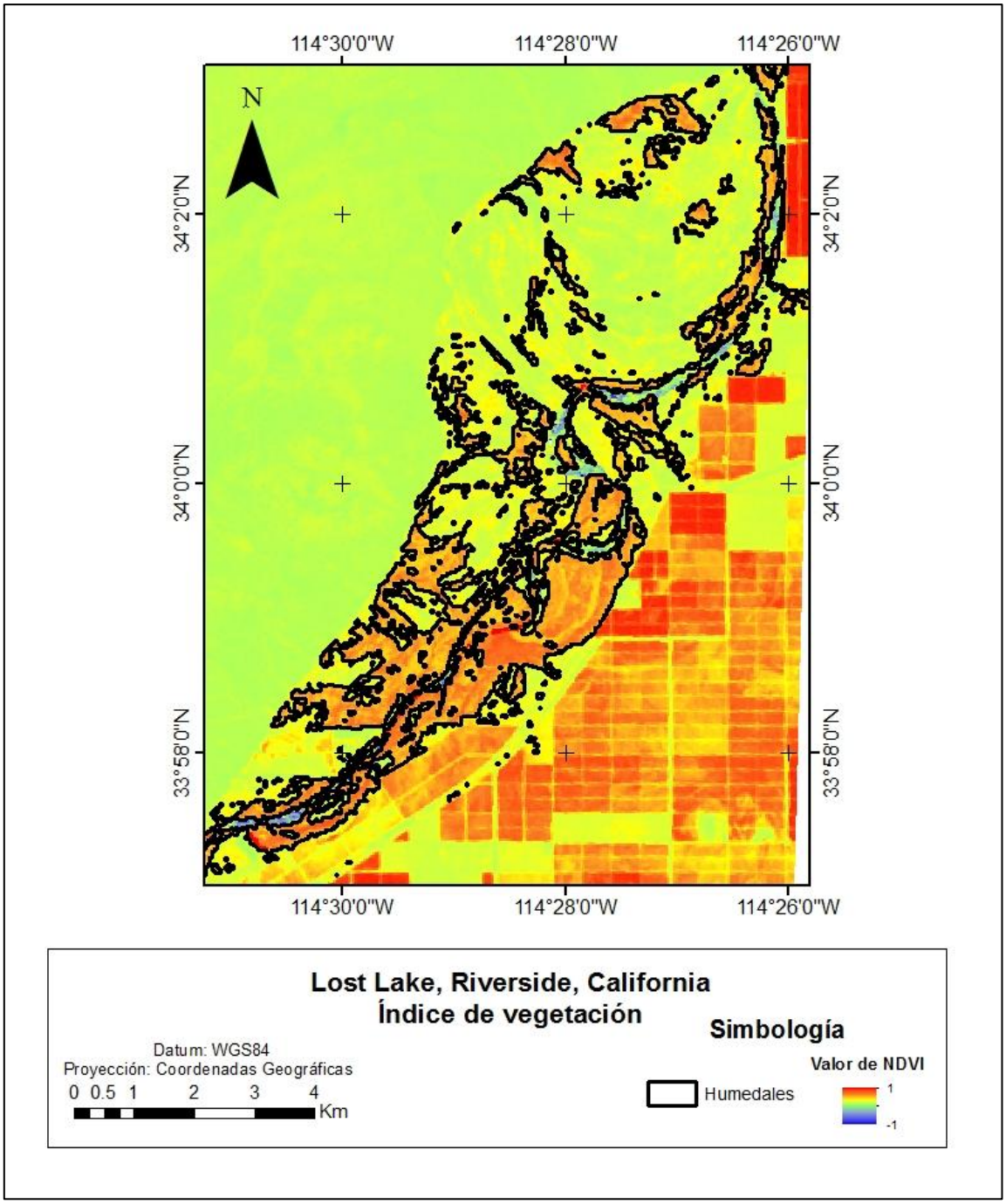


Figura A6.15 . Zona 5: Lost Lake, California, EUA. Imagen de NDVI para el año 1997. Las áreas de la cubierta vegetal de l os humedales estan vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a part ir de la imagen de Landsat 5 TM.

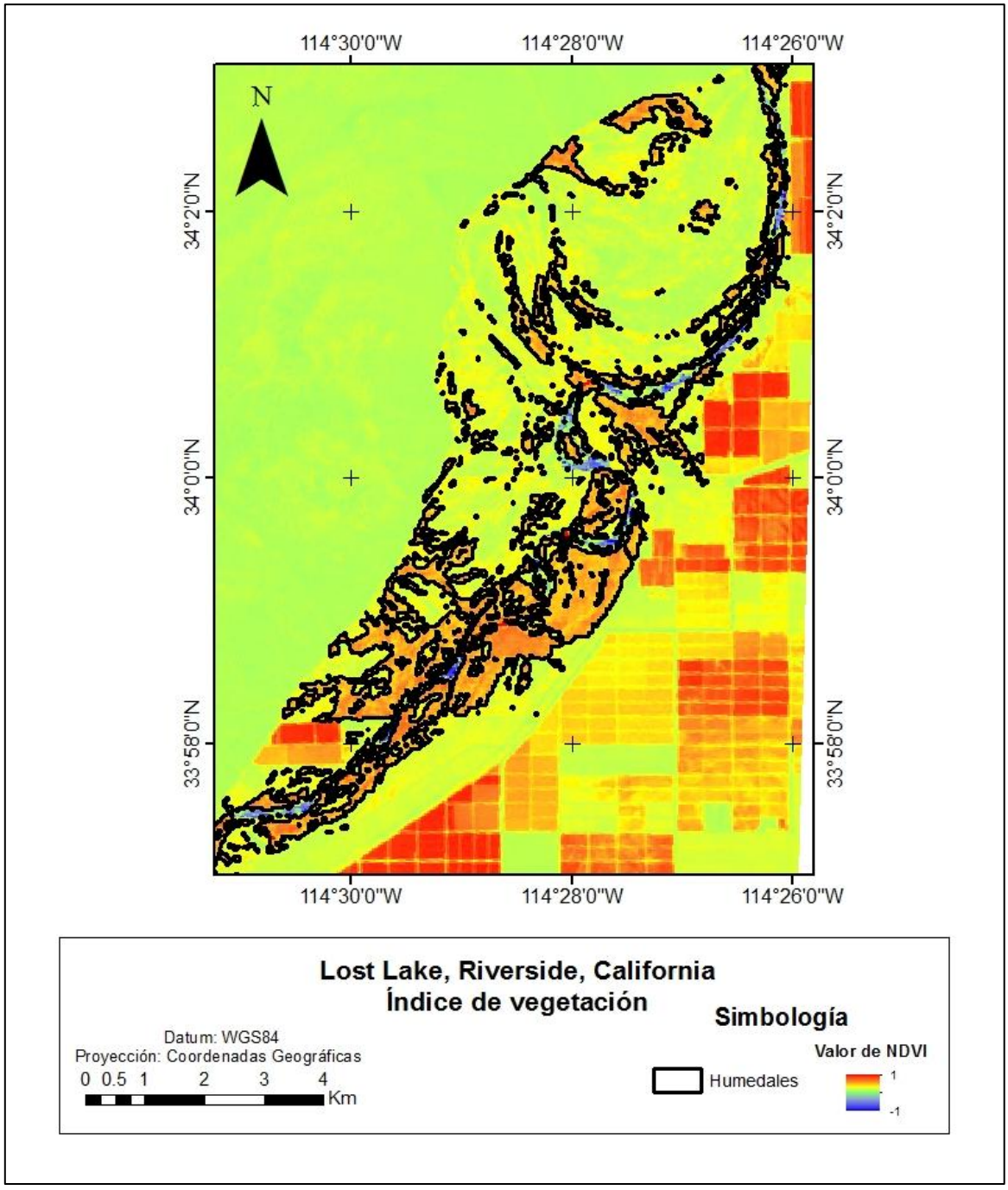


Figura A6.16 . Zona 5: Lost Lake, California, EUA. Imagen de NDVI para el año 2002. Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales estan vectorizada s. El índice de NDVI se calculó a part ir de la imagen de Landsat 5 TM.

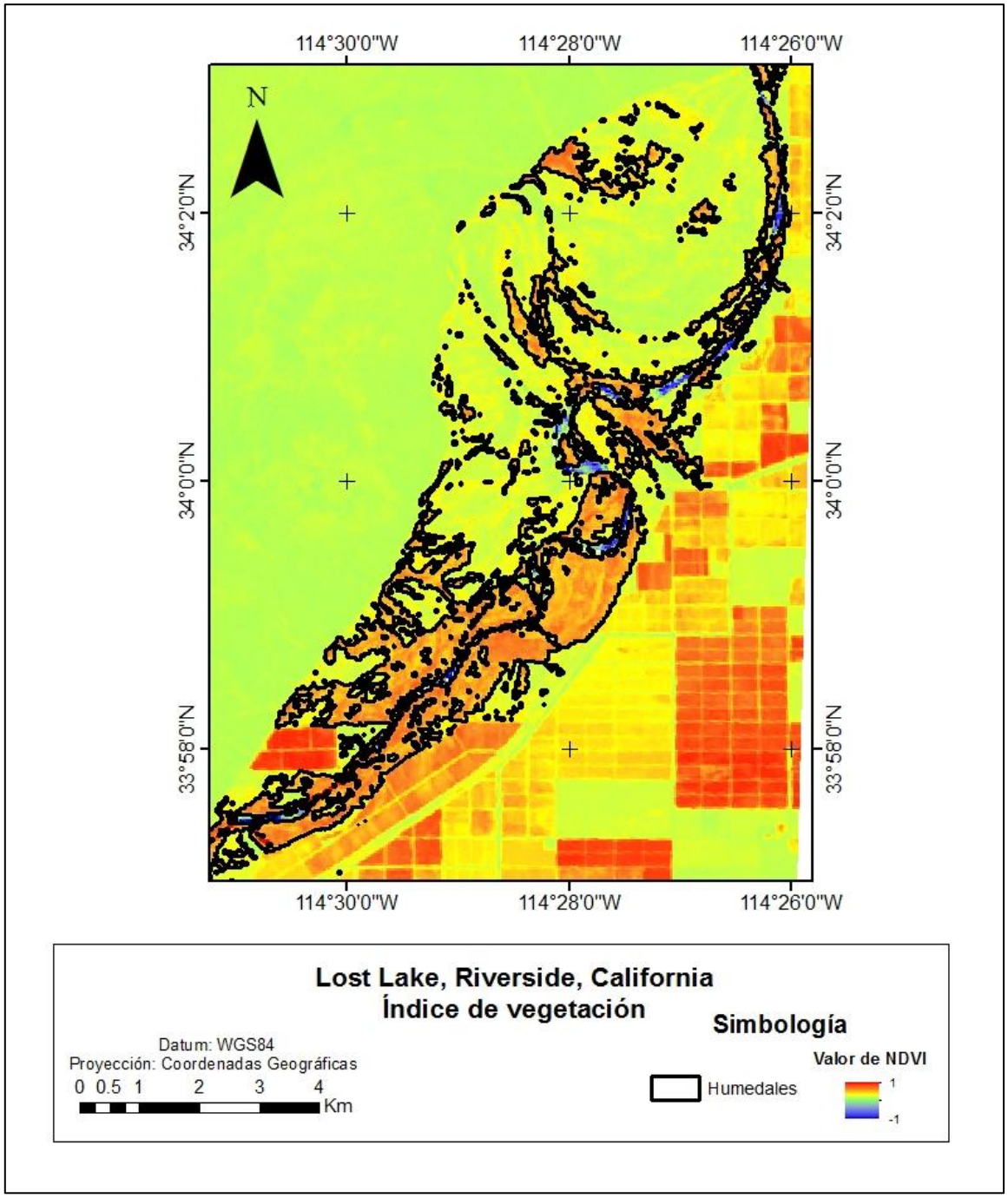


Figura A6.17 . Zona 5: Lost Lake, California, EUA. Imagen de NDVI para el año 2007. Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales estan vectorizadas. El índice de NDVI se calcul ó a part ir de la imagen de Landsat 5 TM.

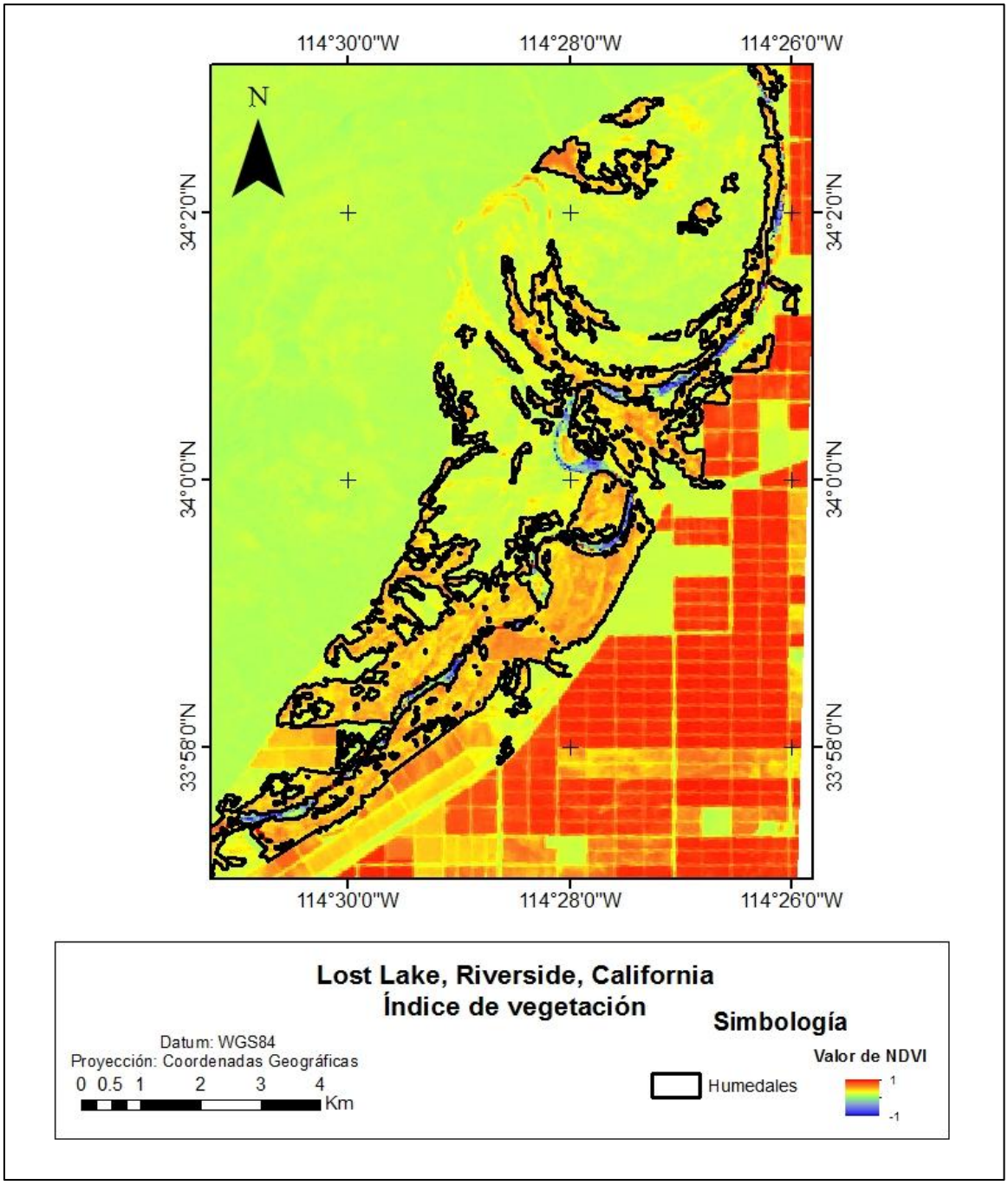


Figura A6.18 . Zona 5: Lost Lake, California, EUA. Imagen de NDVI para el año 2011. Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales estan vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a part ir de la imagen de Lan dsat 5 TM.

ANEXO 7

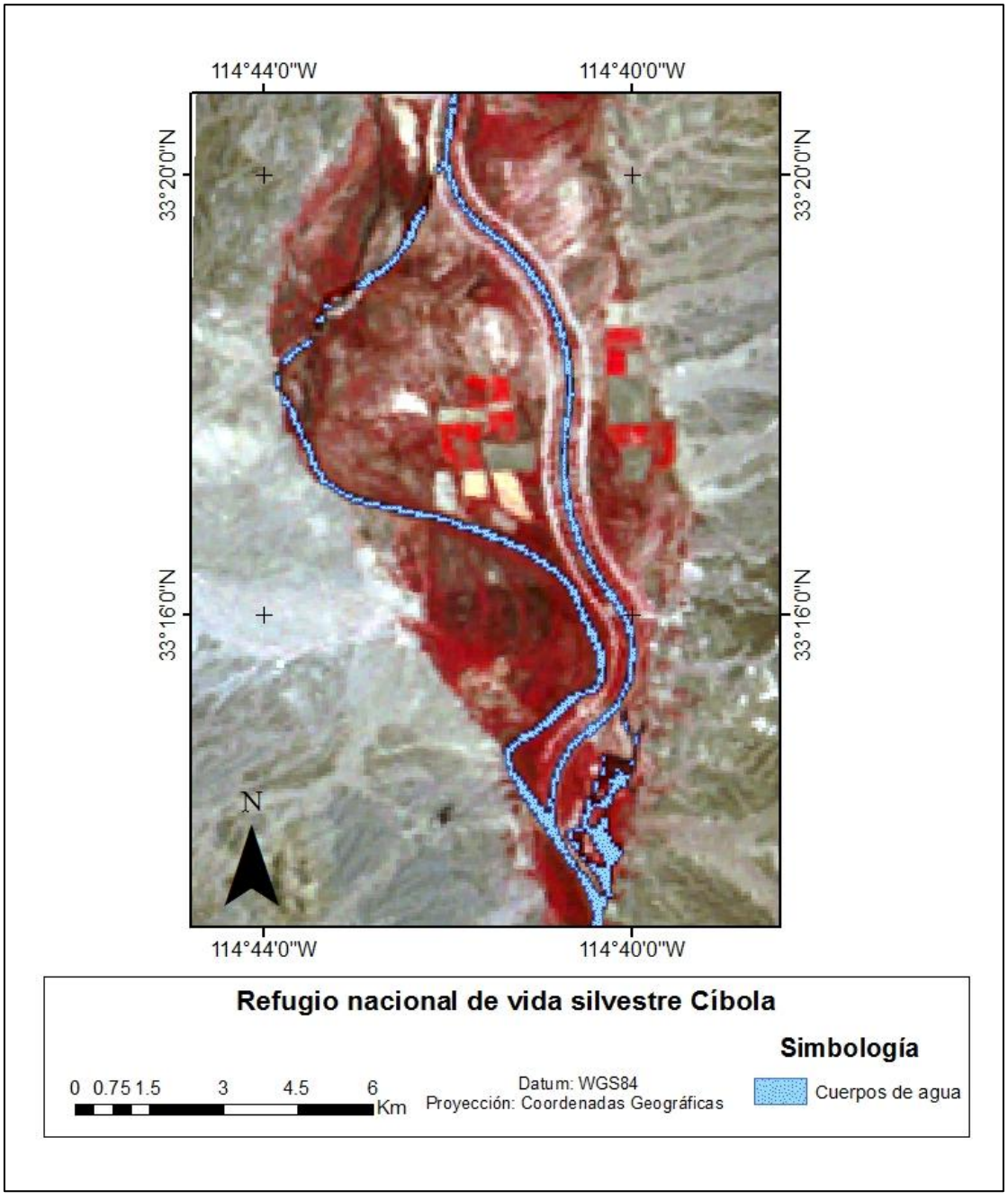


Figura A7.1 . Zona 6: Refugio nacional de vida silvestre Cíbola, Arizona y California, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1972. La imagen en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 1 MSS se está usando como fondo.

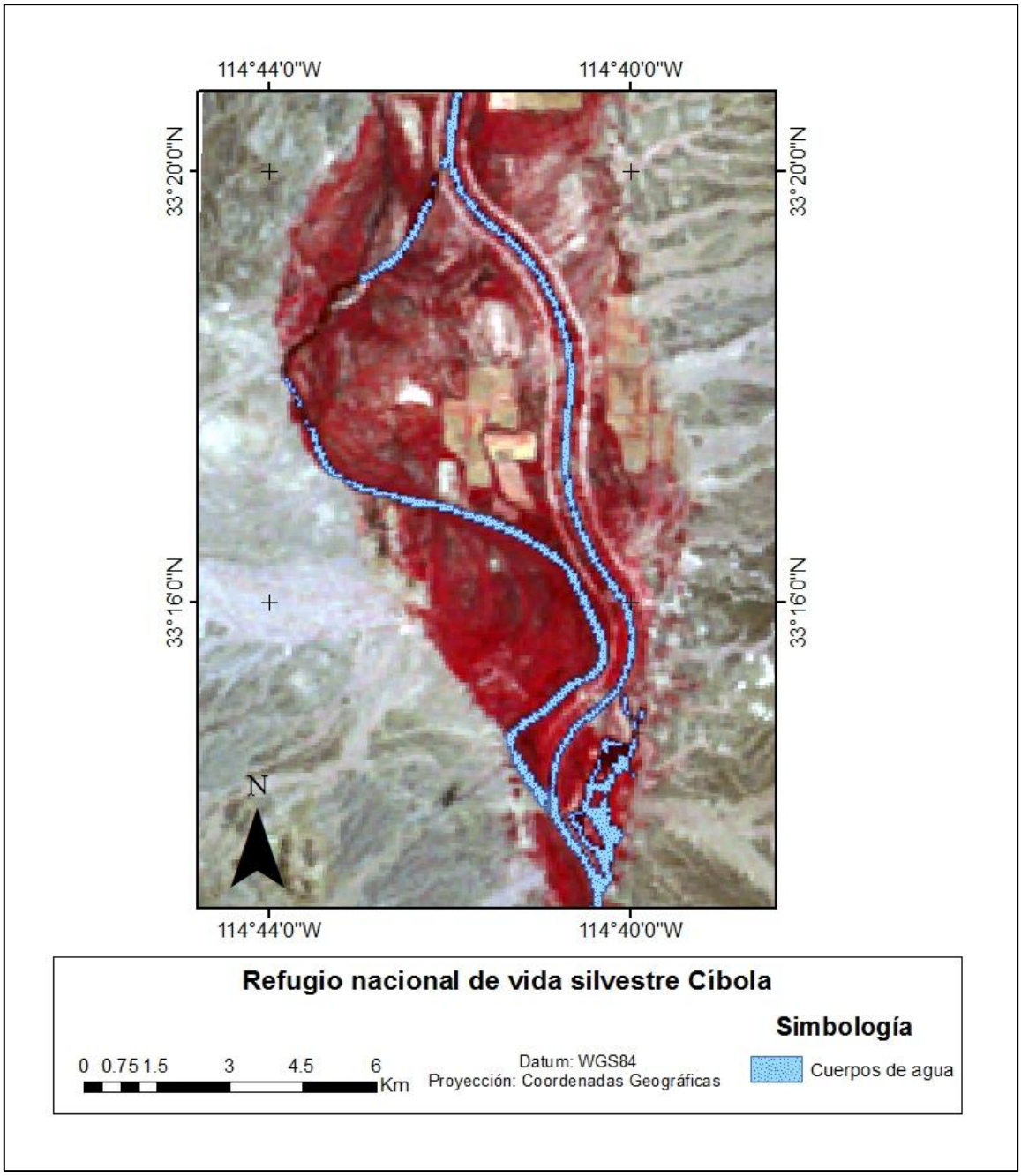


Figura A7.2 . Zona 6: Refugio nacional de vida silvestre Cíbola, Arizona y California, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1977 . La imagen en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 2 MSS se está usando como fondo.

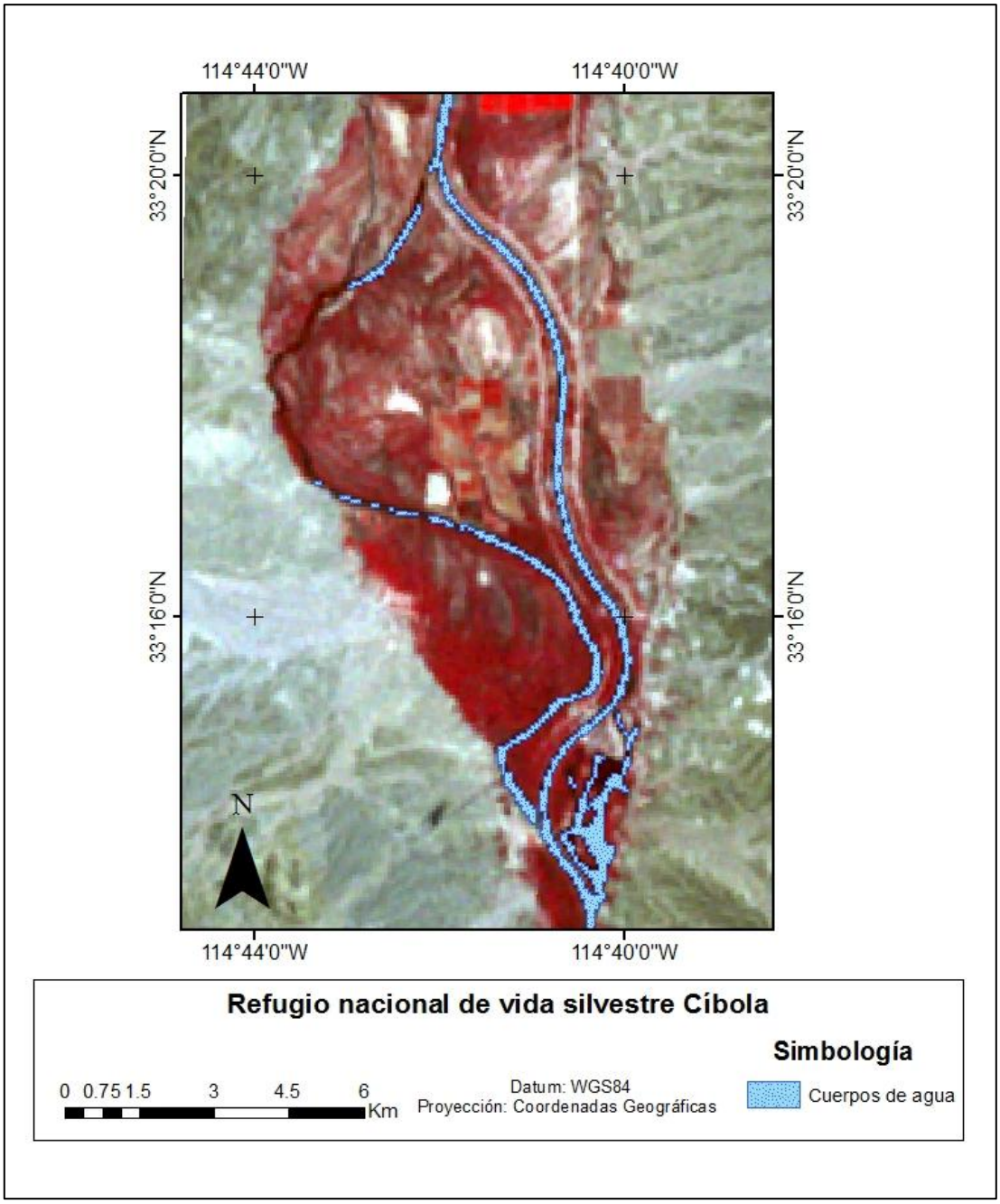


Figura A7.3 . Zona 6: Refugio nacional de vida silvestre Cíbola, Arizona y California, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 198 2. La imagen en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 2 MSS se está usando como fondo.

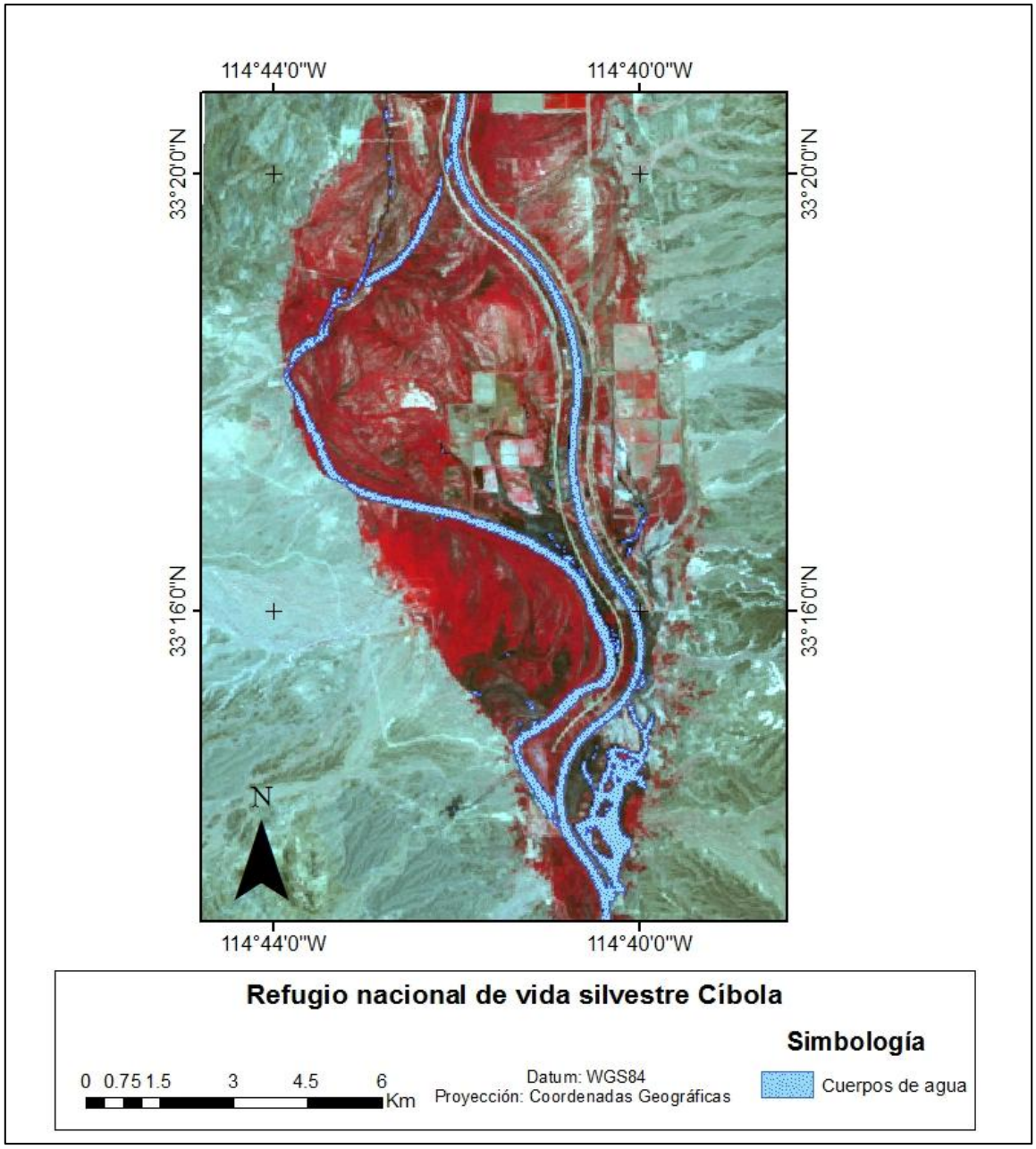


Figura A7.4 . Zona 6: Refugio nacional de vida silvestre Cíbola, Arizona y California, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1987 . La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsa t 5 TM se está usando como fondo.

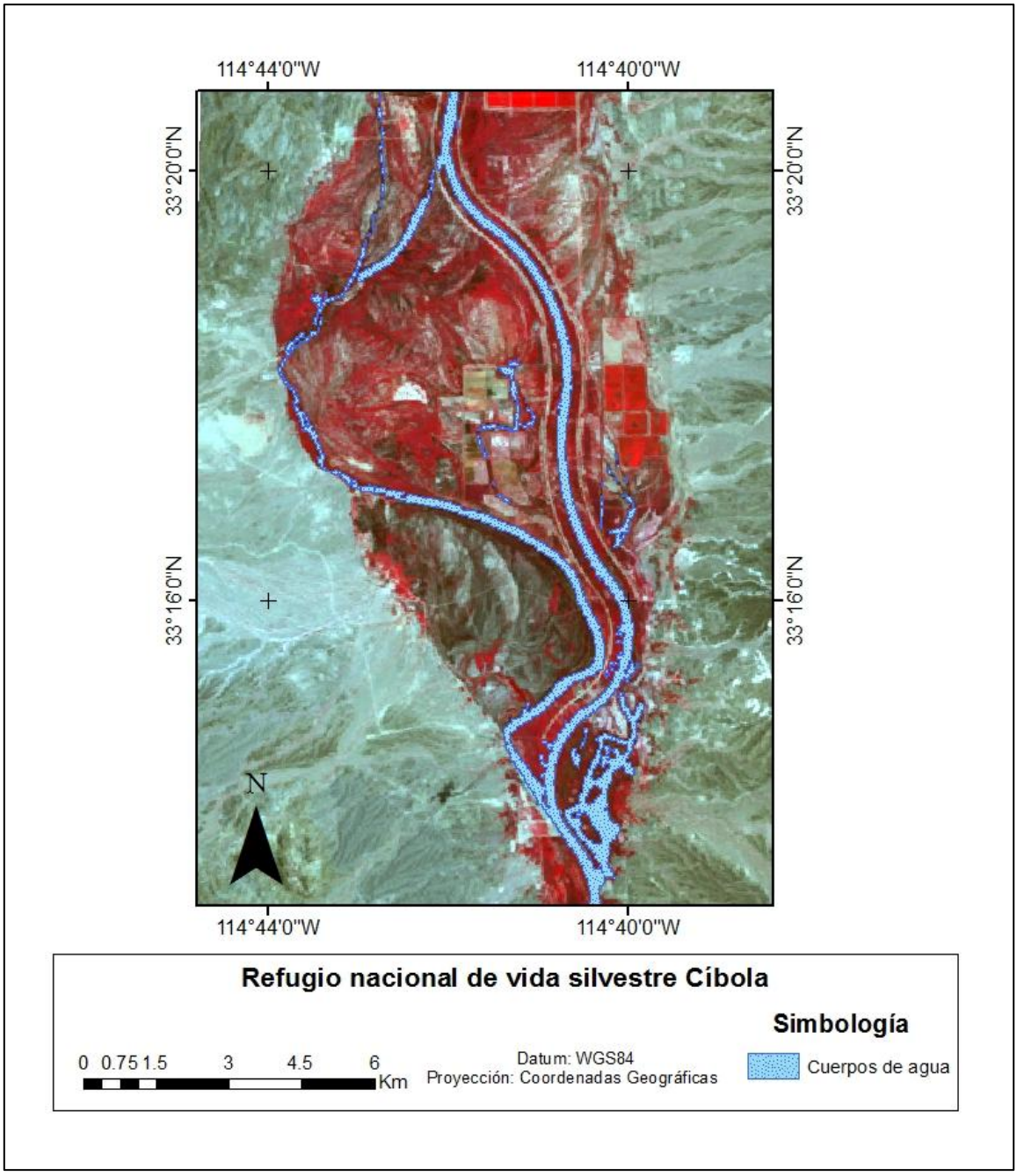


Figura A7.5 . Zona 6: Refugio nacional de vida silvestre Cíbola, Arizona y California, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1992 . La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Land sat 5 TM se está usando como fondo.

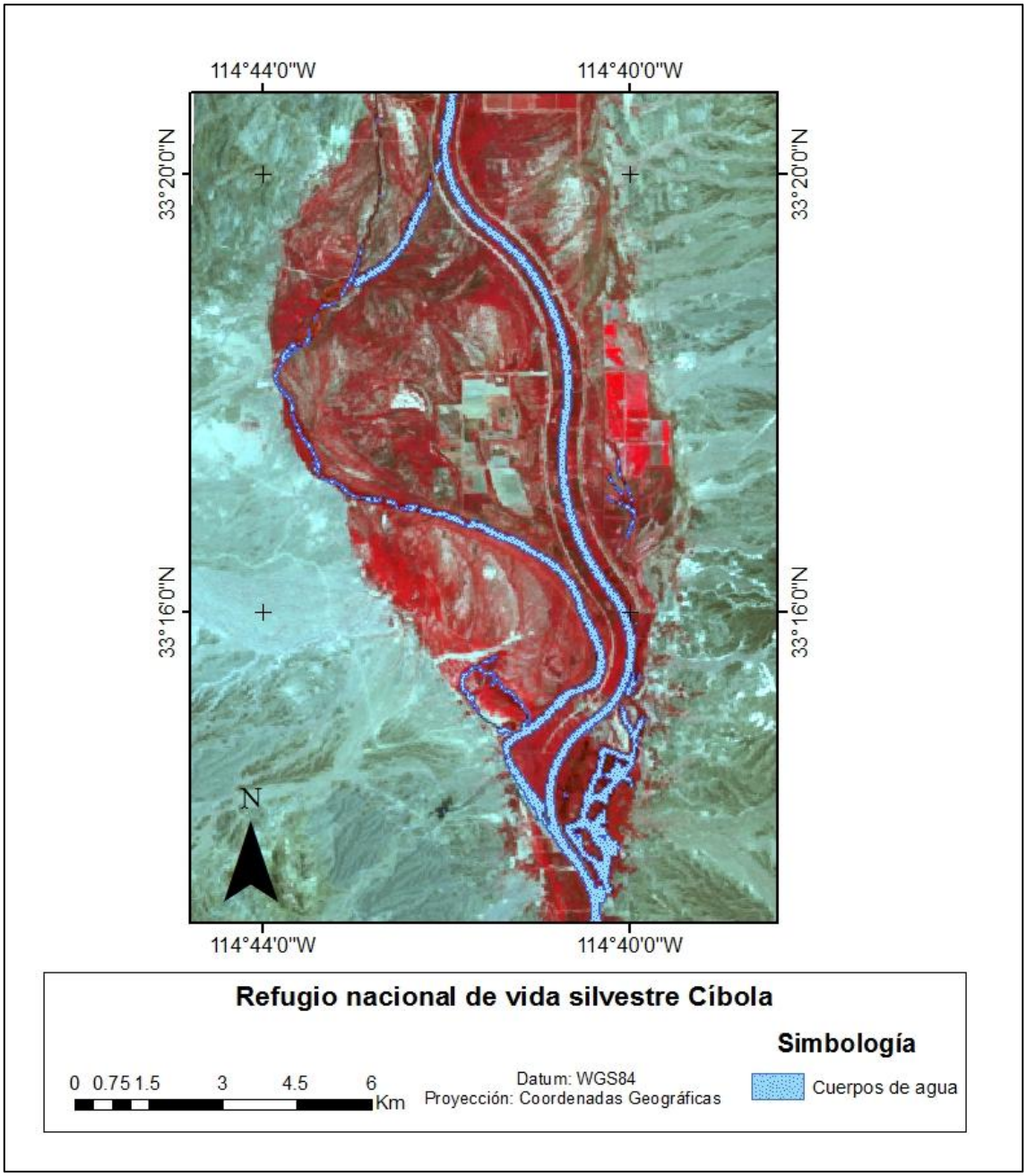


Figura A7.6 . Zona 6: Refugio nacional de vida silvestre Cíbola, Arizona y California, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1997 . La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

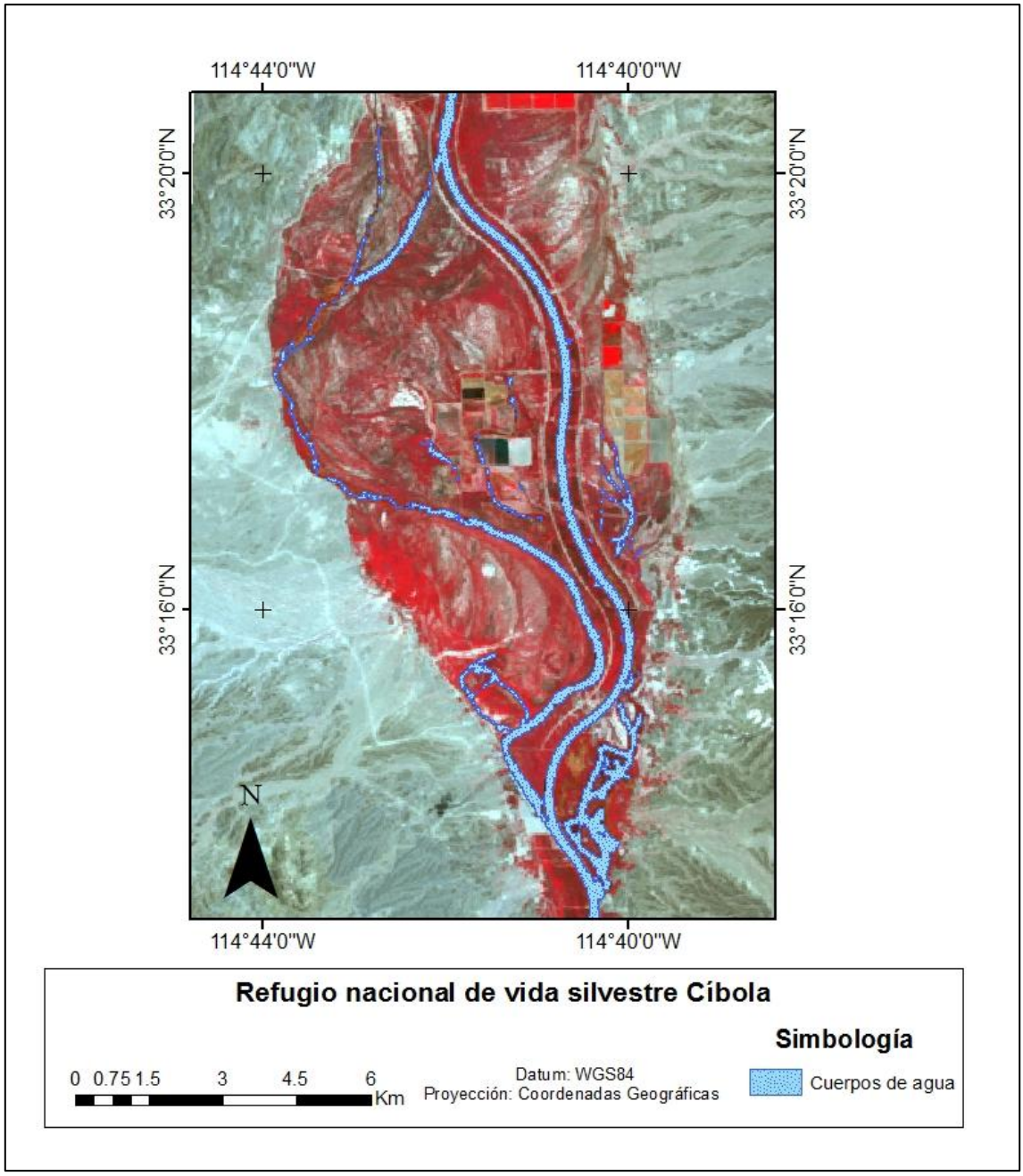


Figura A7.7. Zona 6: Refugio nacional de vida silvestre Cíbola, Arizona y California, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 2002. La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

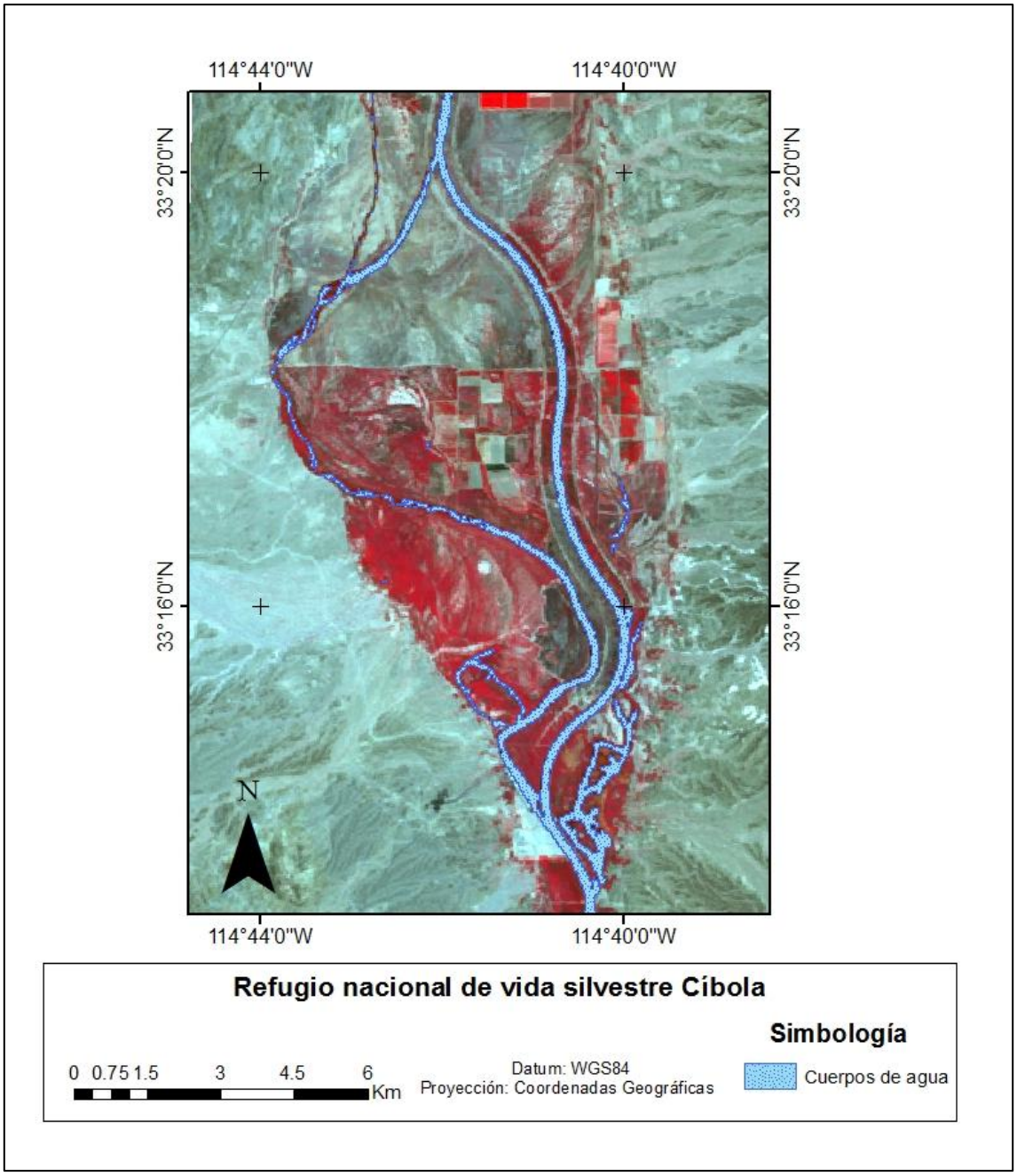


Figura A7.8 . Zona 6: Refugio nacional de vida silvestre Cíbola, Arizona y California, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 2007 . La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

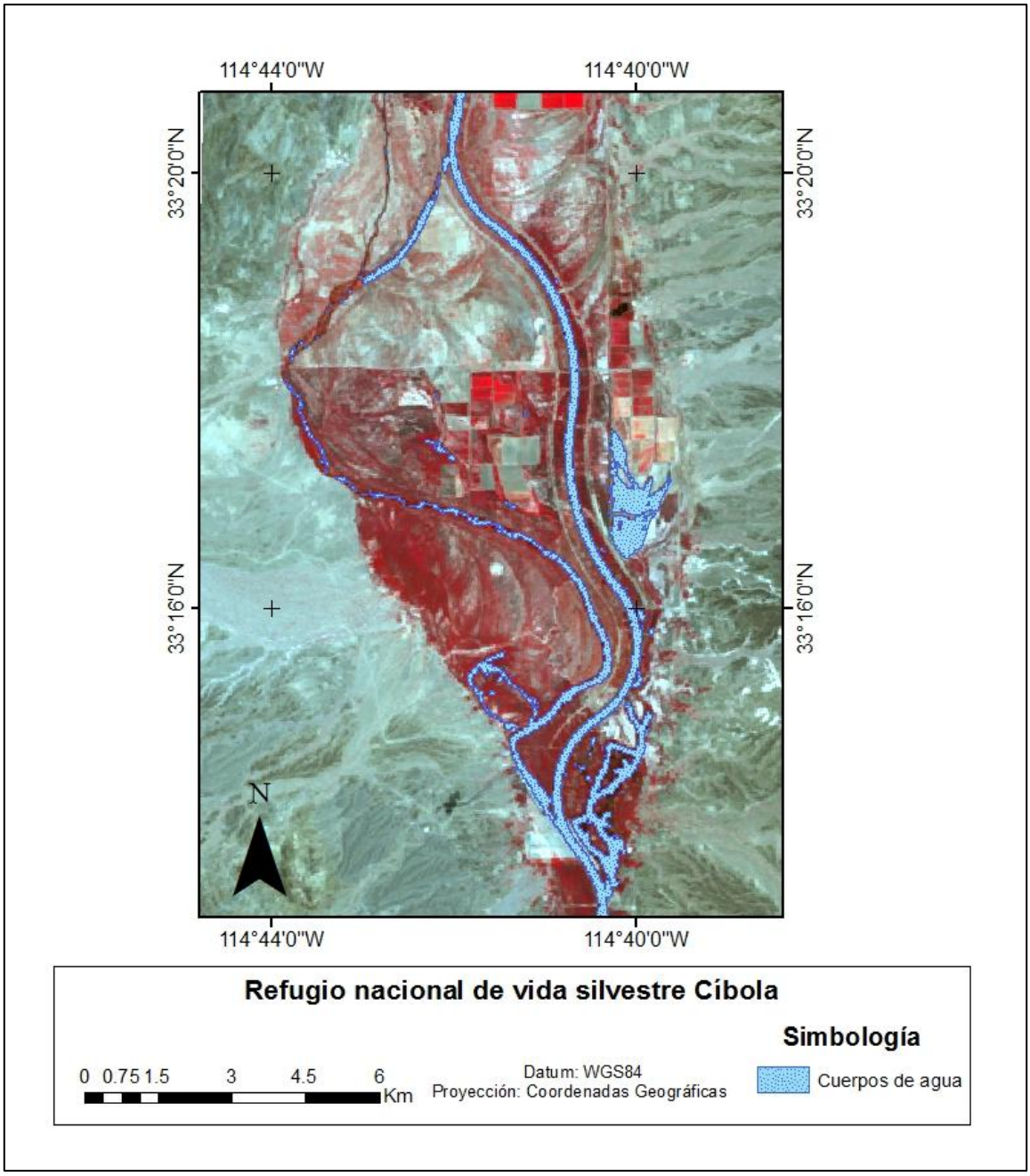


Figura A7.9 . Zona 6: Refugio nacional de vida silvestre Cíbola, Arizona y California, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 2011 . La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

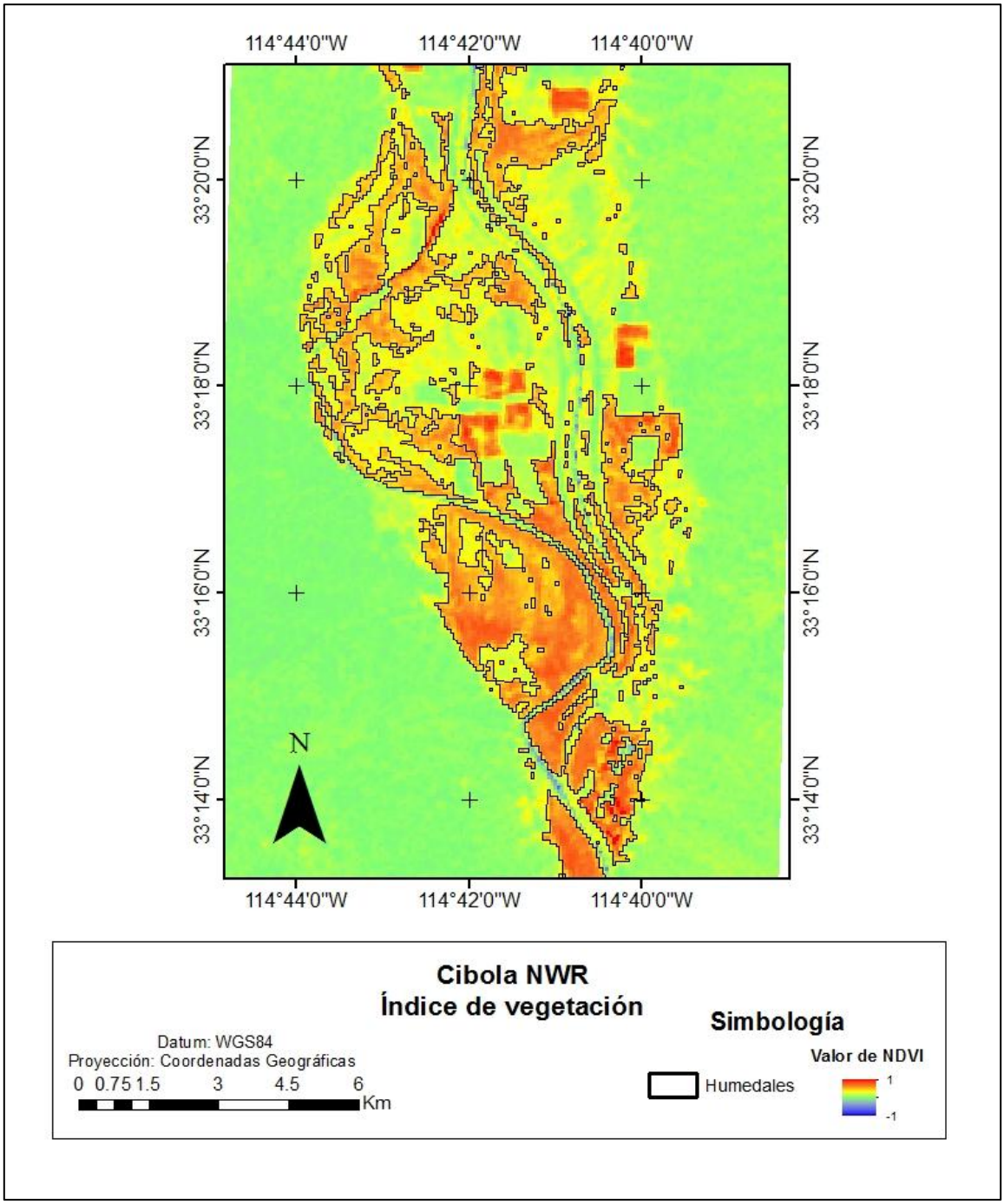


Figura A7.10 . Zona 6: Refugio nacional de vida silvestre Cíbola, Arizona y California, EUA. Imagen de NDVI para el año 1972. Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales estan vectorizadas. El índice d e NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 1 MSS.

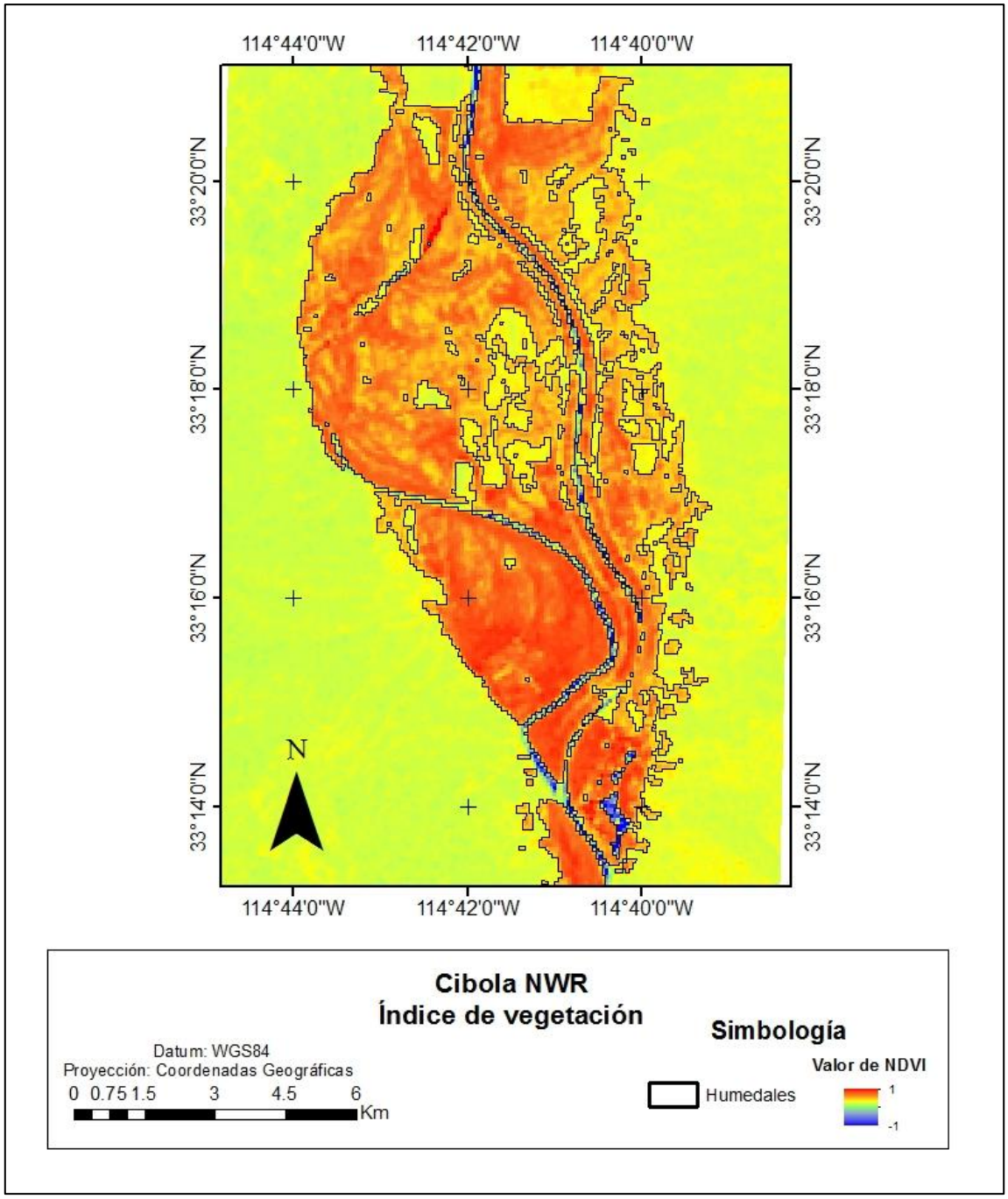


Figura A7.11 . Zona 6: Refugio nacional de vida silvestre Cíbola, Arizona y California, EUA. Imagen de NDVI para el año 1977 . Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales estan vectorizadas . El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 2 MSS.

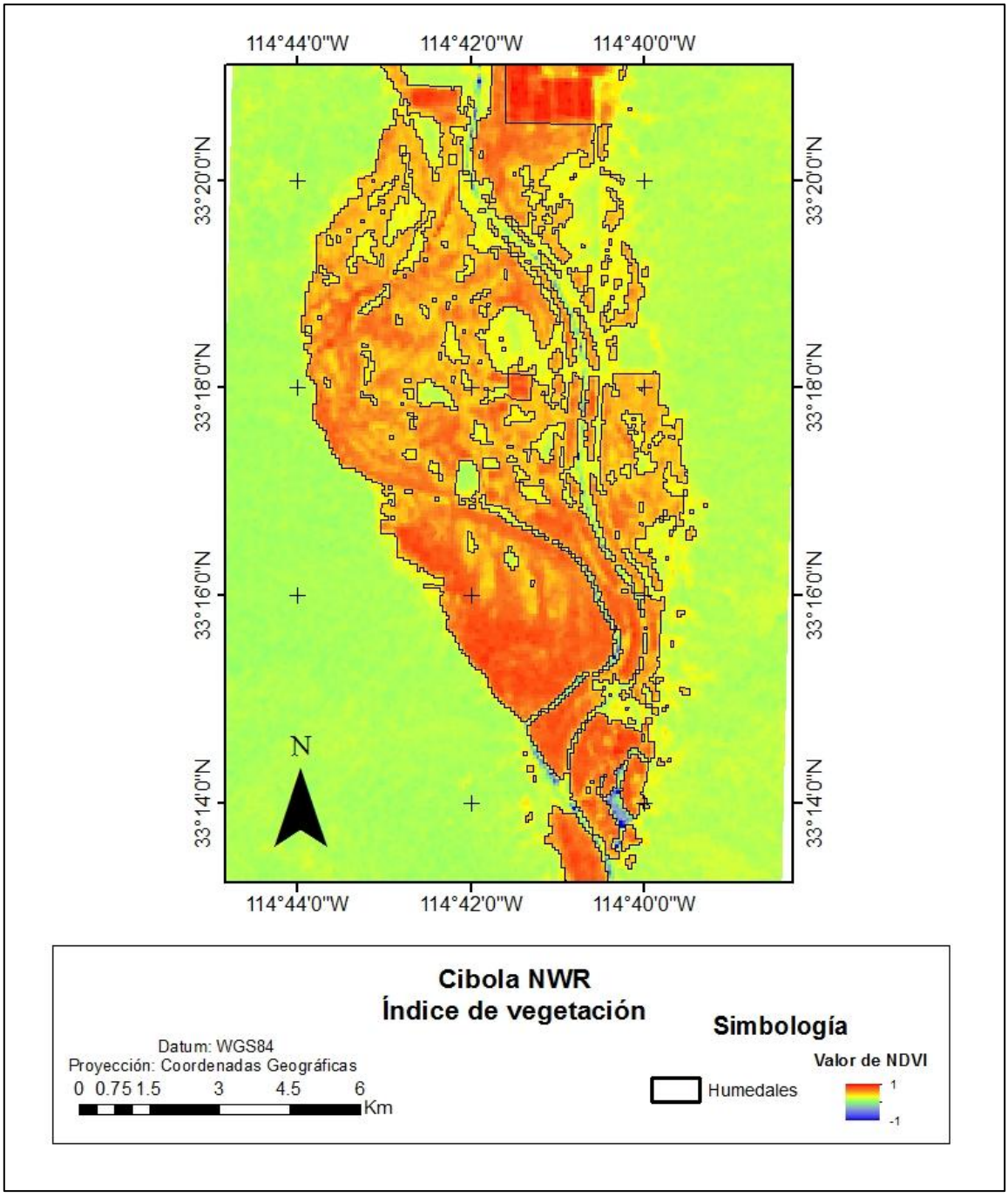


Figura A7.12. Zona 6: Refugio nacional de vida silvestre Cíbola, Arizona y California, EUA. Imagen de NDVI para el año 1973 . Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales estan vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 3 MSS.

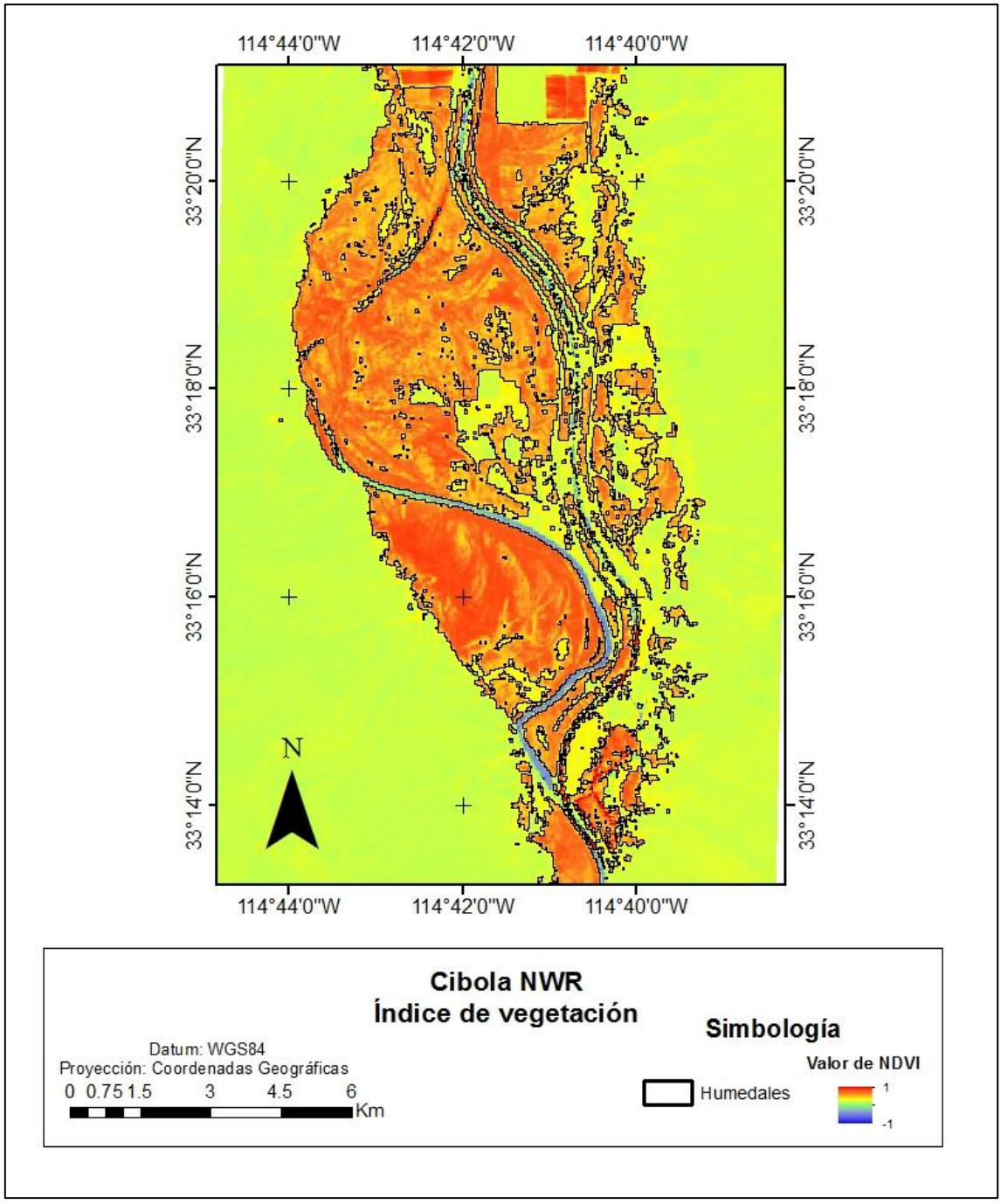


Figura A7.13. Zona 6: Refugio nacional de vida silvestre Cíbola, Arizona y California, EUA. Imagen de NDVI para el año 1987 . Las áreas de la cubierta vegetal de los hu medales estan vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 5 TM .

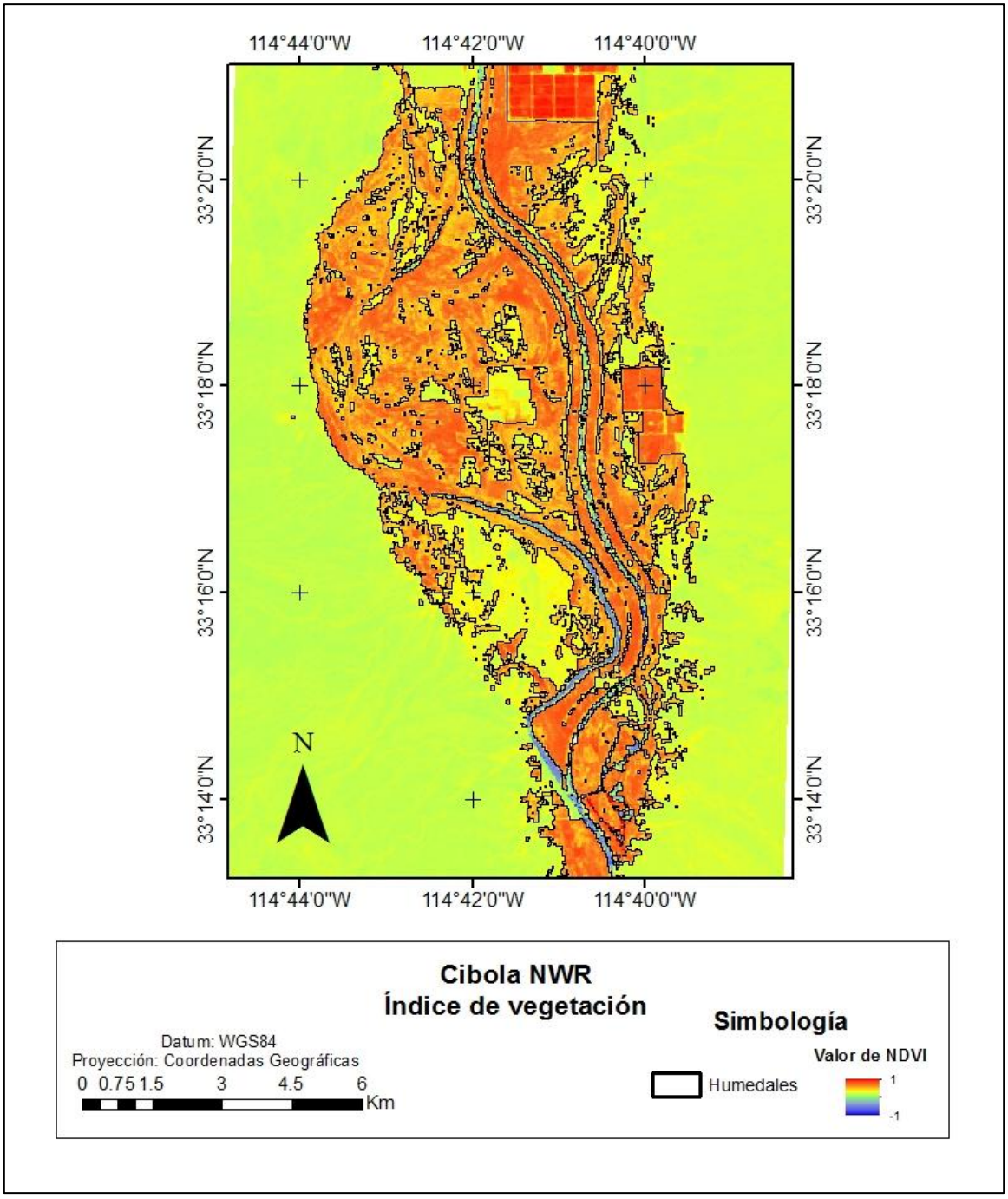


Figura A7.14. Zona 6: Refugio nacional de vida silvestre Cíbola, Arizona y California, EUA. Imagen de NDVI para el año 1992 . Las áreas de la cubierta veget al de los humedales estan vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 5 TM .

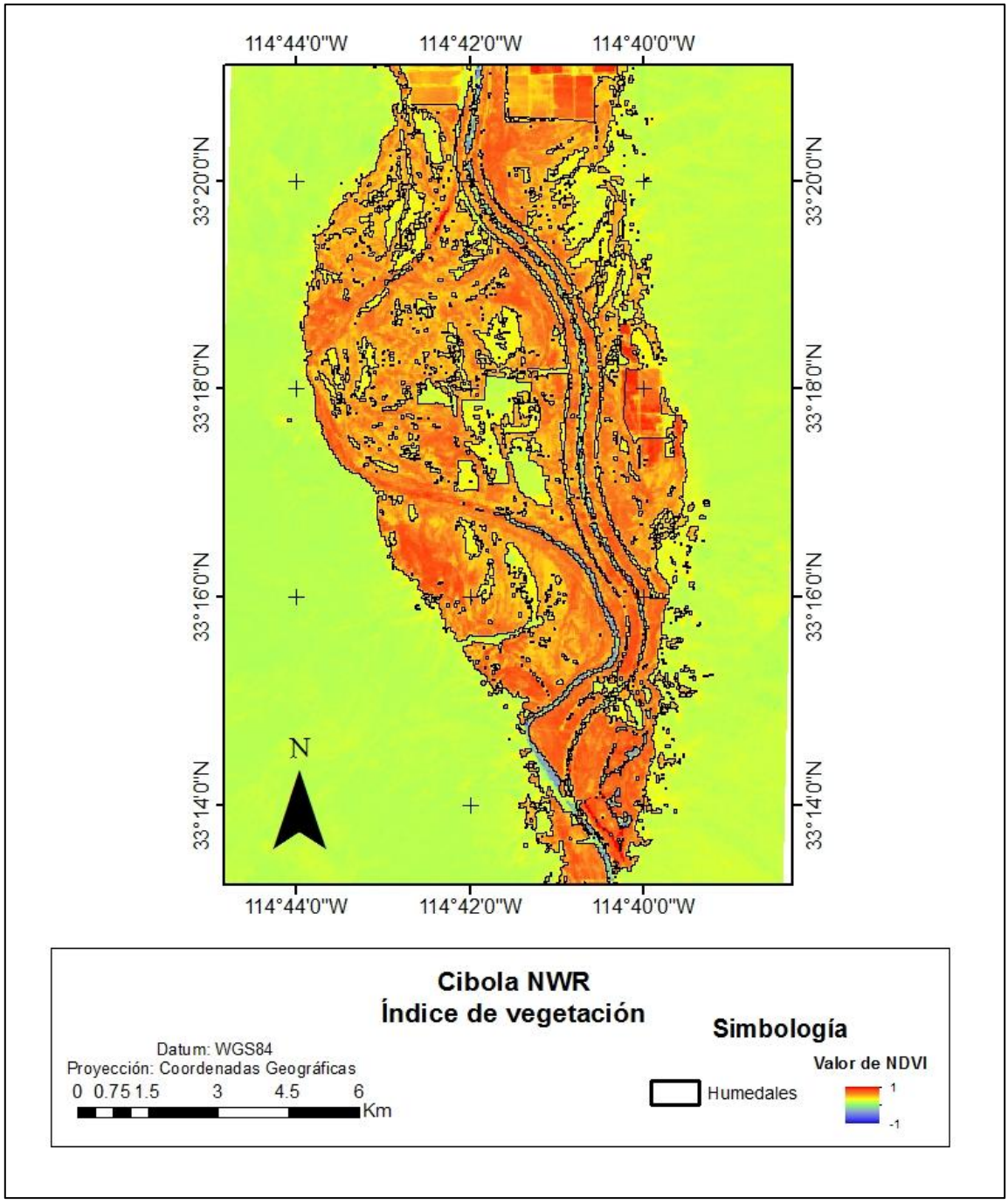


Figura A7.15 . Zona 6: Refugio nacional de vida silvestre Cíbola, Arizona y California, EUA. Imagen de NDVI para el año 1997 . Las áreas de la cu bierta vegetal de los humedales estan vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 5 TM .

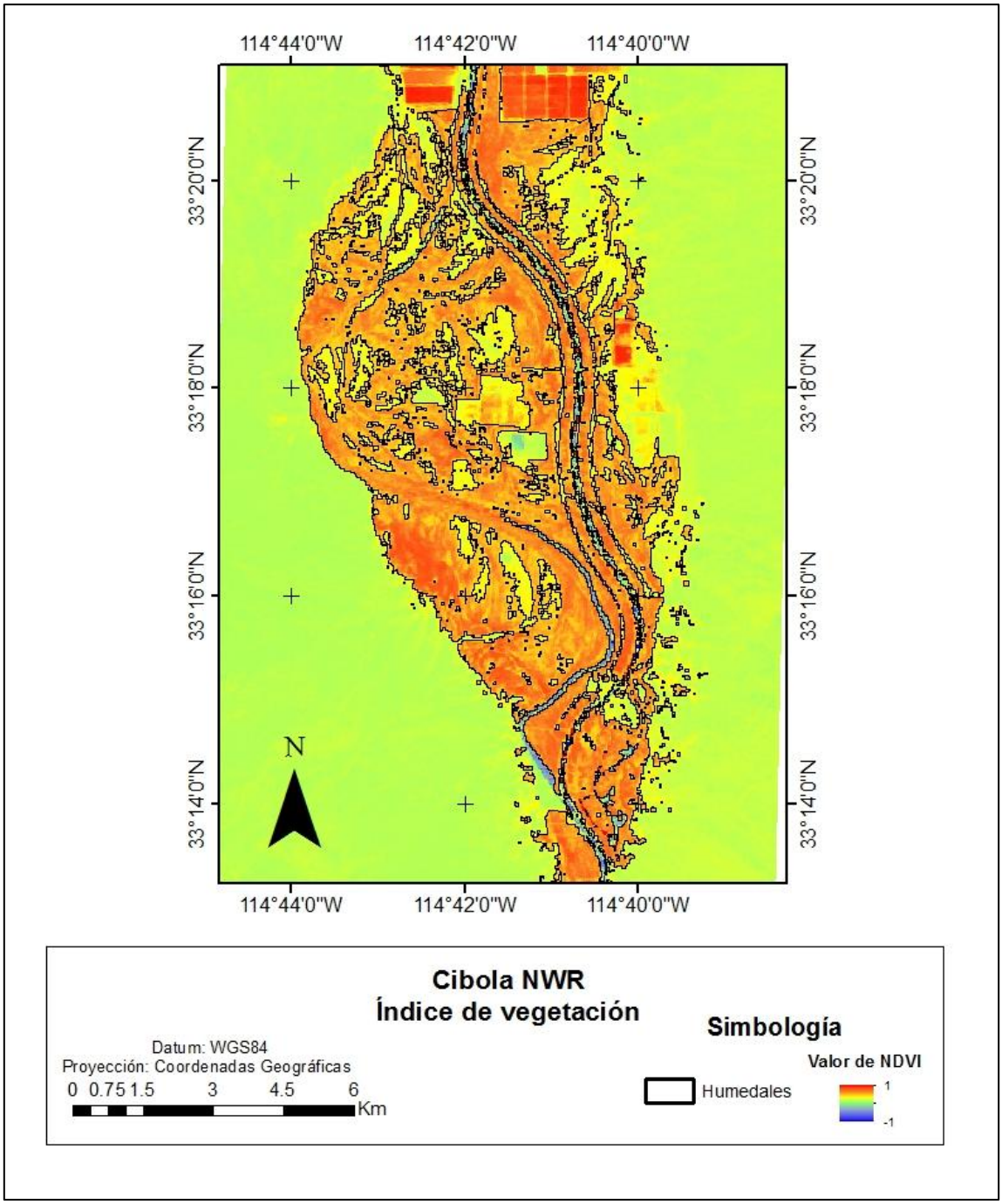


Figura A7.16 . Zona 6: Refugio nacional de vida silvestre Cíbola, Arizona y California, EUA. Imagen de NDVI para el año 2002 . Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales estan vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 5 TM .

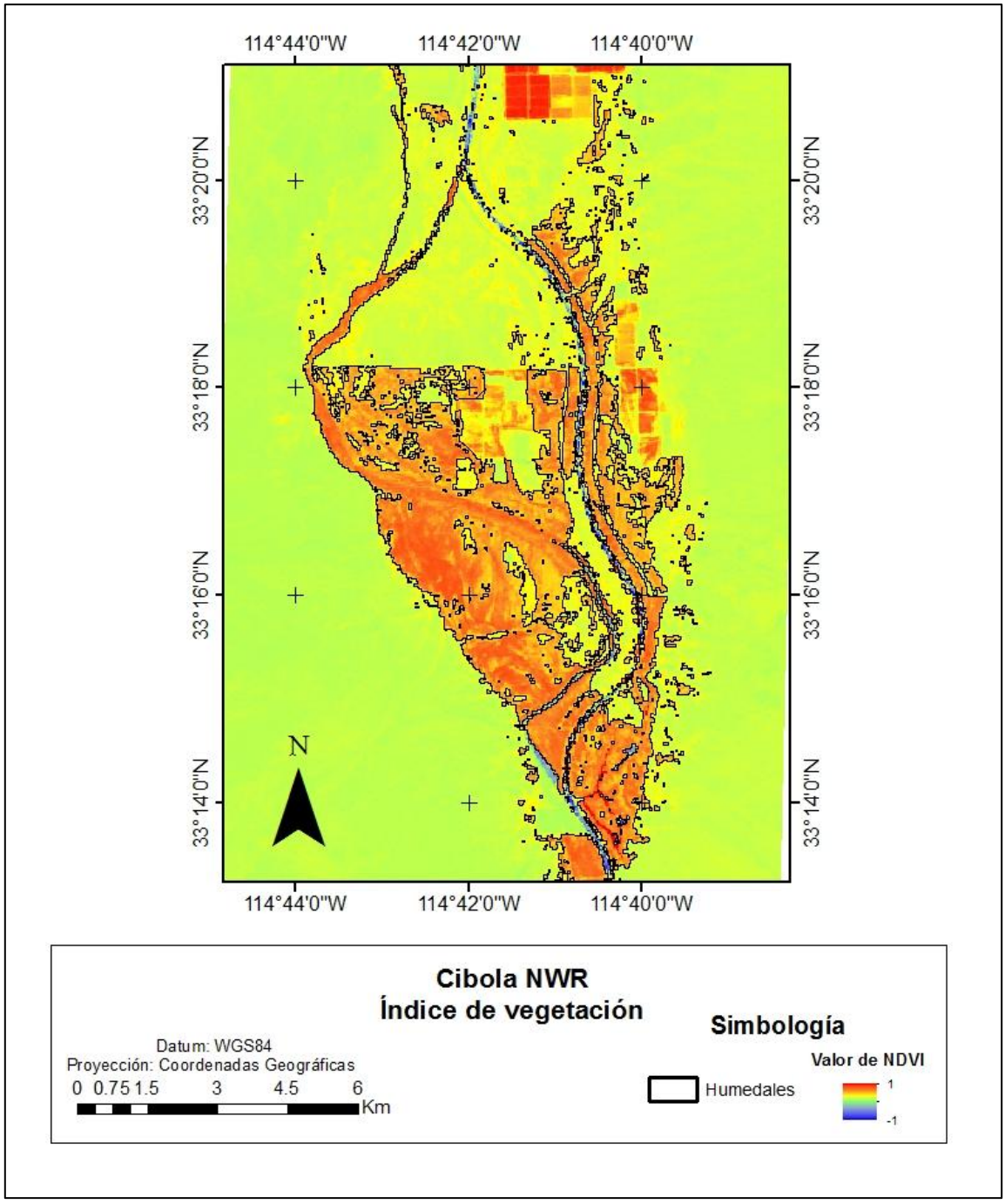


Figura A7.17 . Zona 6: Refugio nacional de vida silvestre Cíbola, Arizona y California, EUA. Imagen de NDVI para el año 2007. Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales estan vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 5 TM .

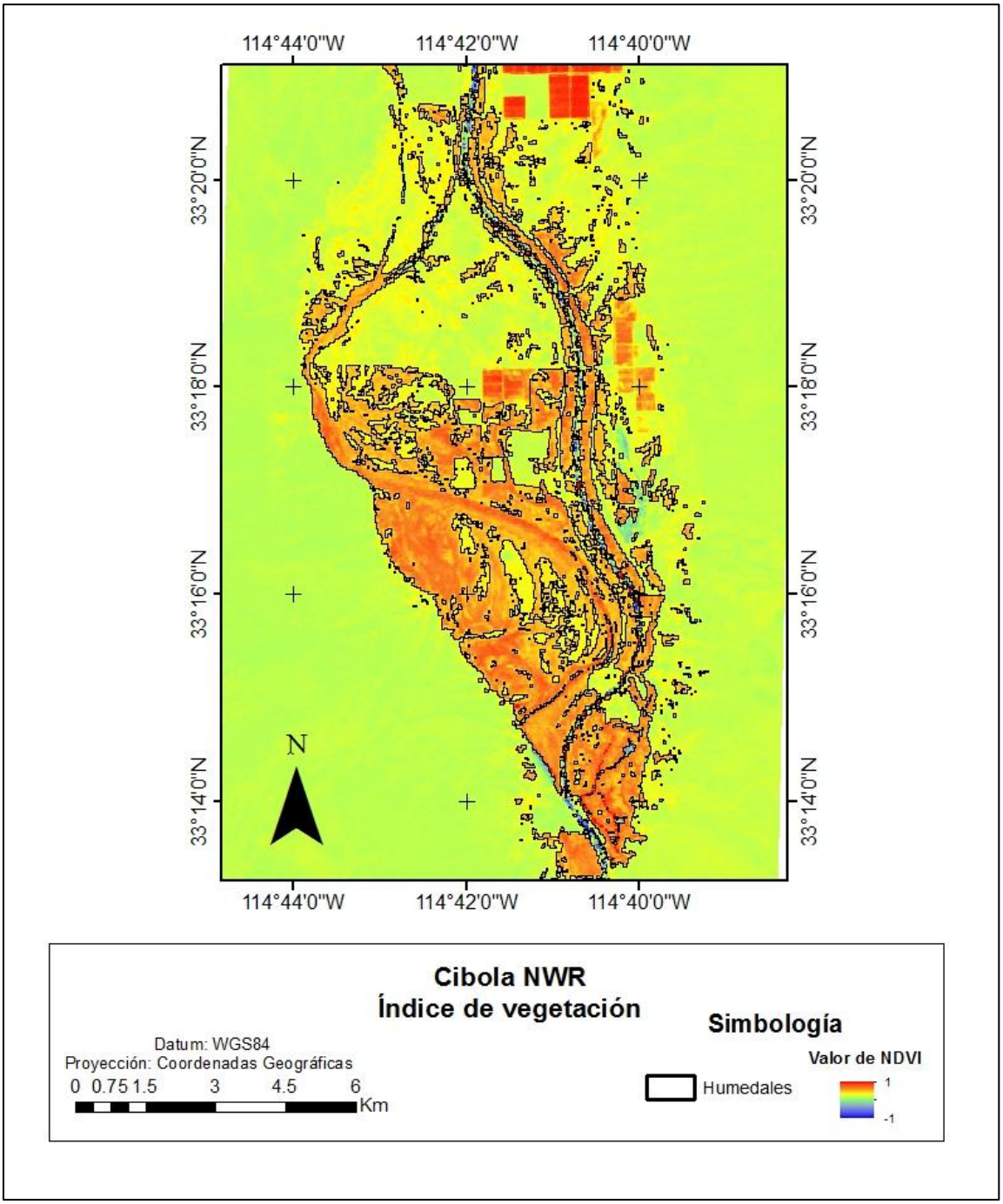


Figura A7.18 . Zona 6: Refugio nacional de vida silvestre Cíbola, Arizona y California, EUA. Imagen de NDVI para el año 2011 . Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales estan vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 5 TM .

ANEXO 8

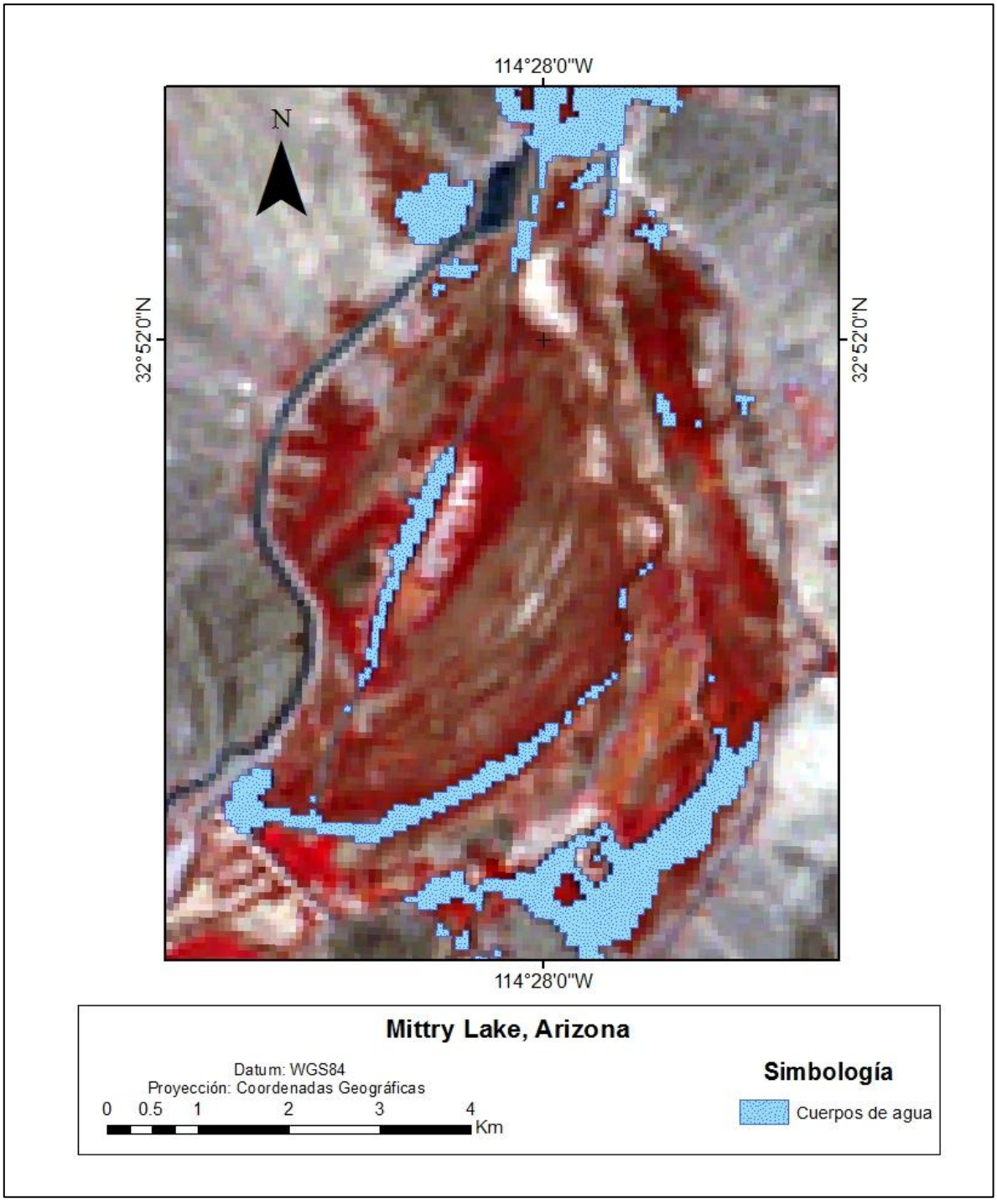


Figura A8.1 . Zona 7: Mittry Lake, Arizona, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1972. La imagen en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 1 MSS se está usando como fondo.

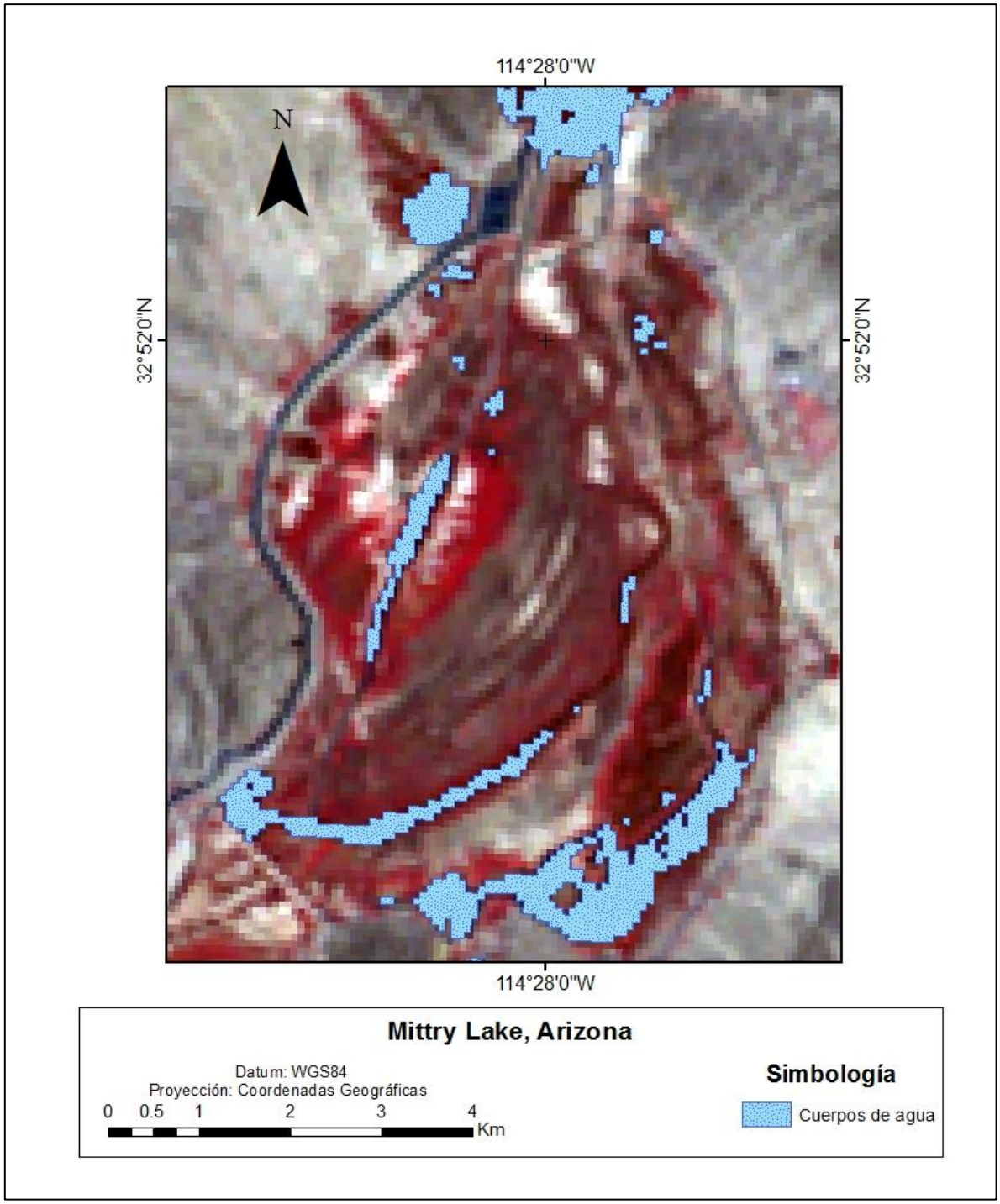


Figura A8.2 . Zona 7: Mittry Lake, Arizona, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1977. La imagen en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 2 MSS se está usando como fondo.

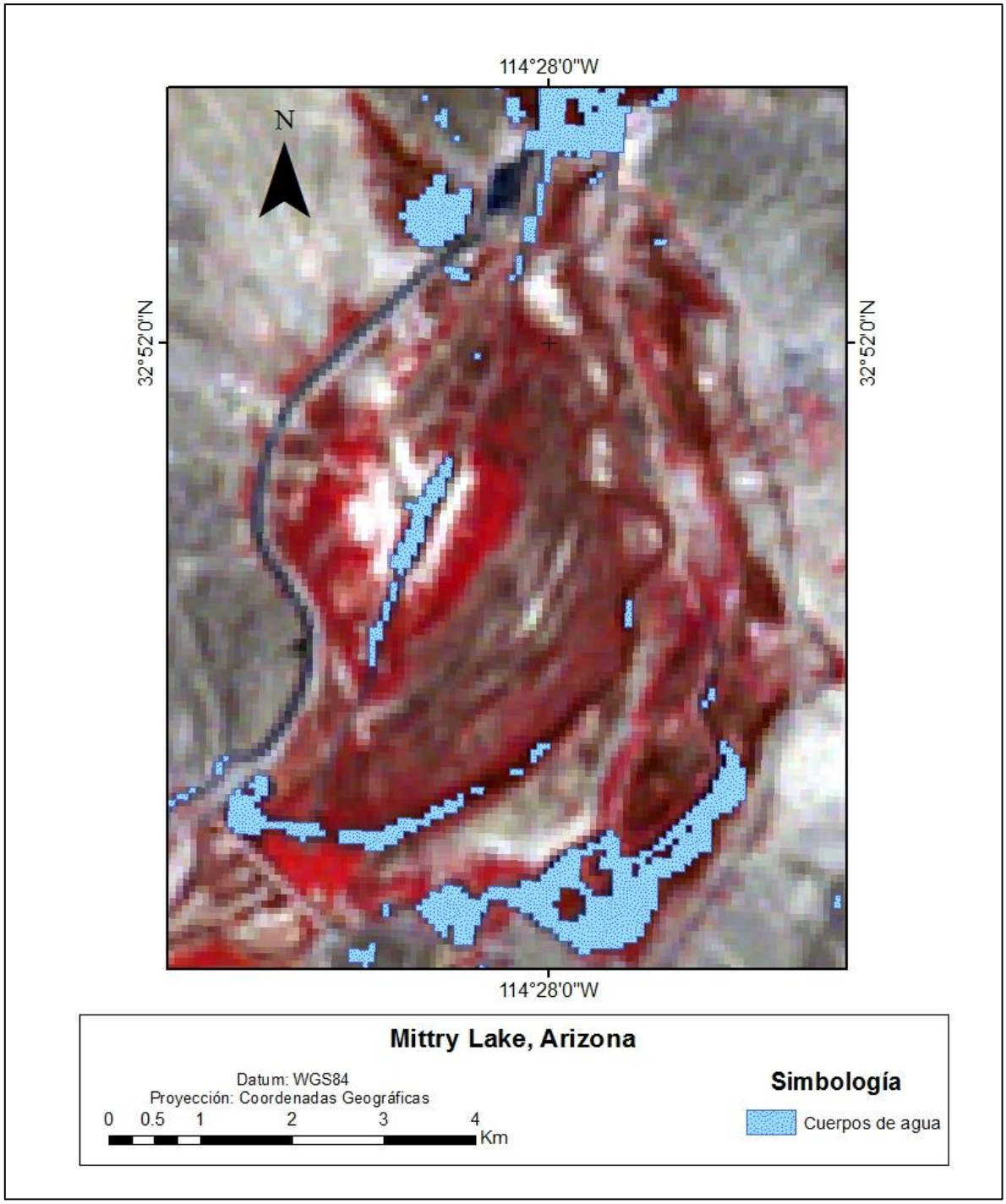


Figura A8.3 . Zona 7: Mittry Lake, Arizona, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1982. La imagen en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 3 MSS se está usando como fondo.

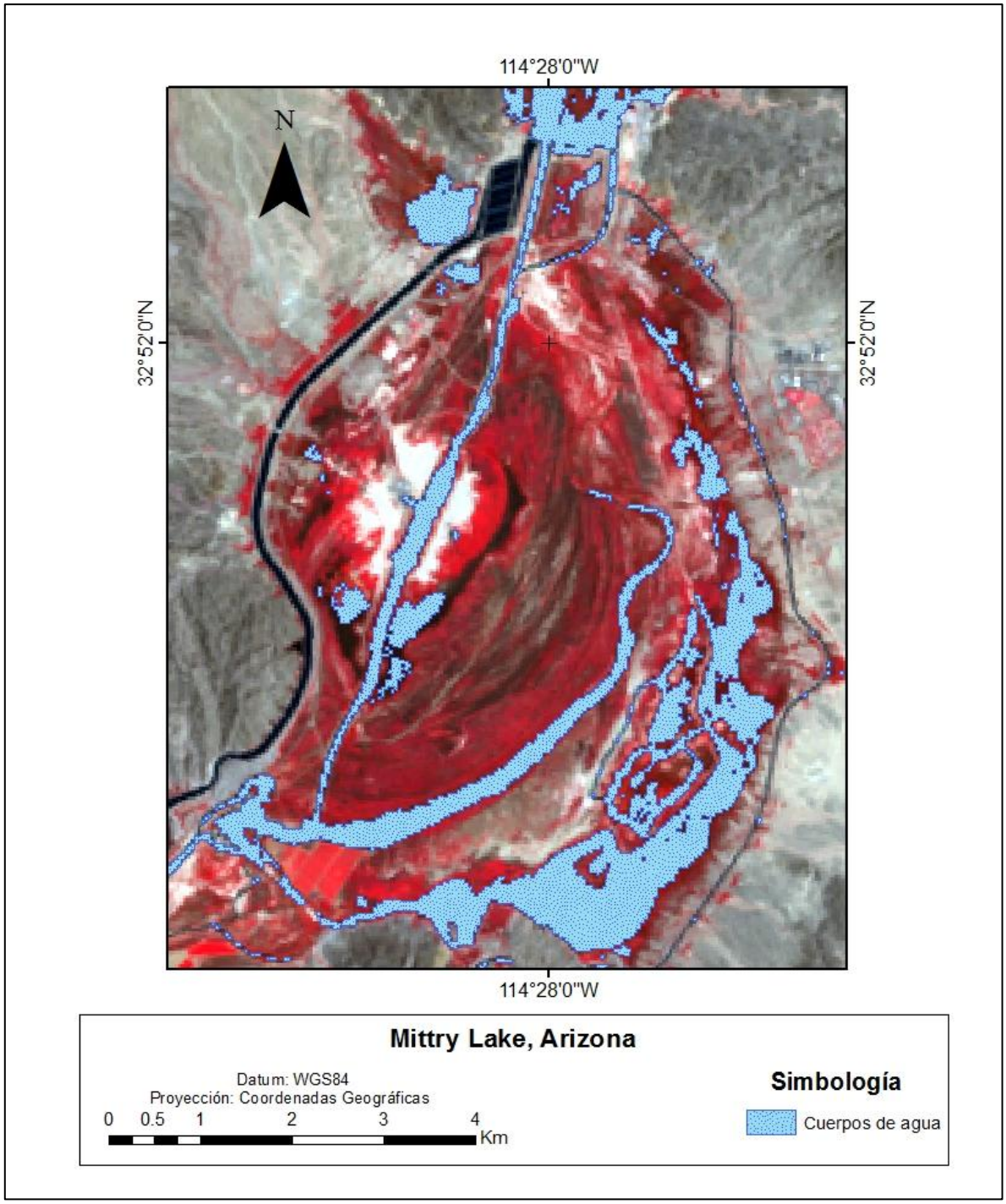


Figura A8.4 . Zona 7: Mittry Lake, Arizona, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1987. La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

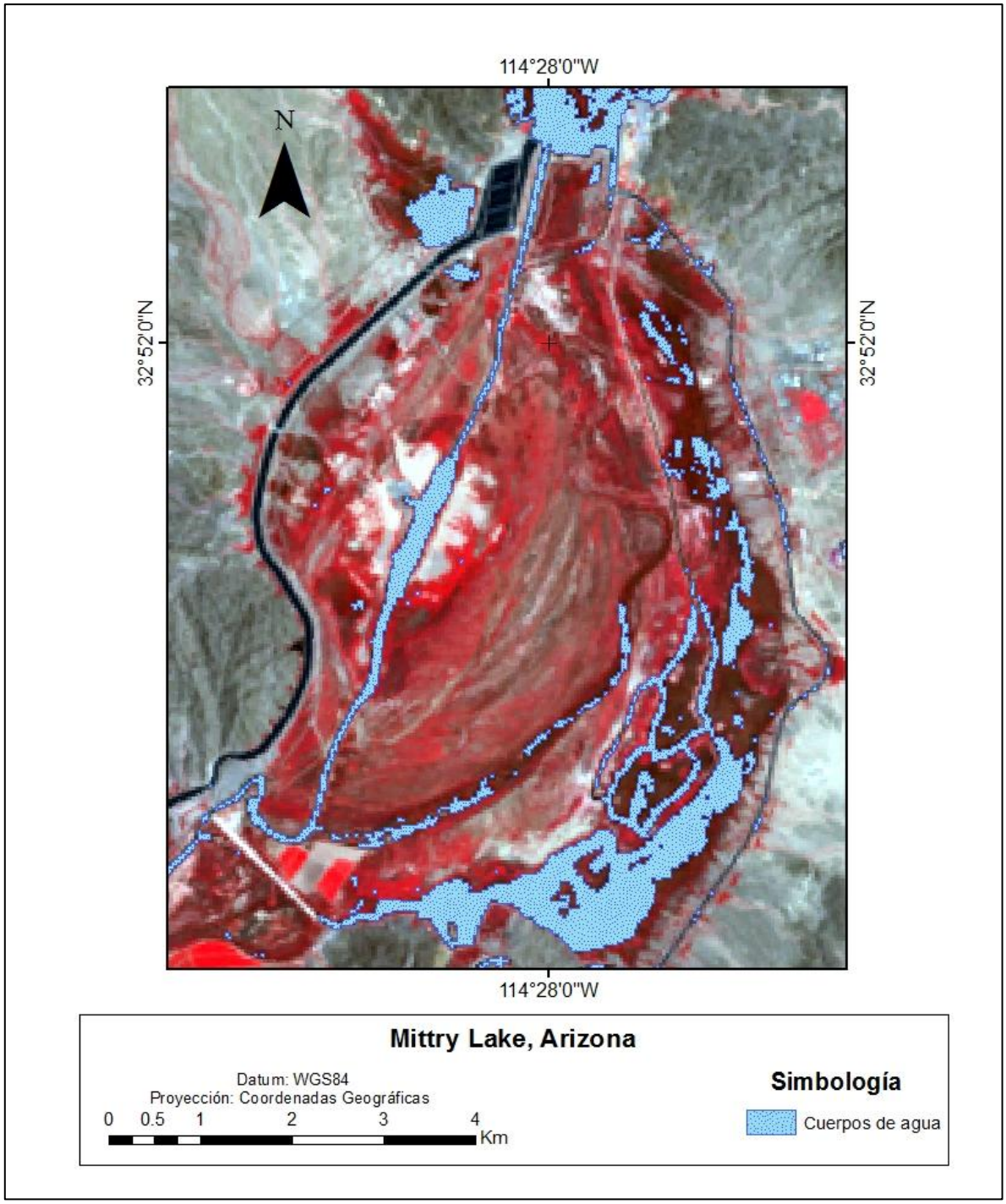


Figura A8.5 . Zona 7: Mittry Lake, Arizona, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1992. La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

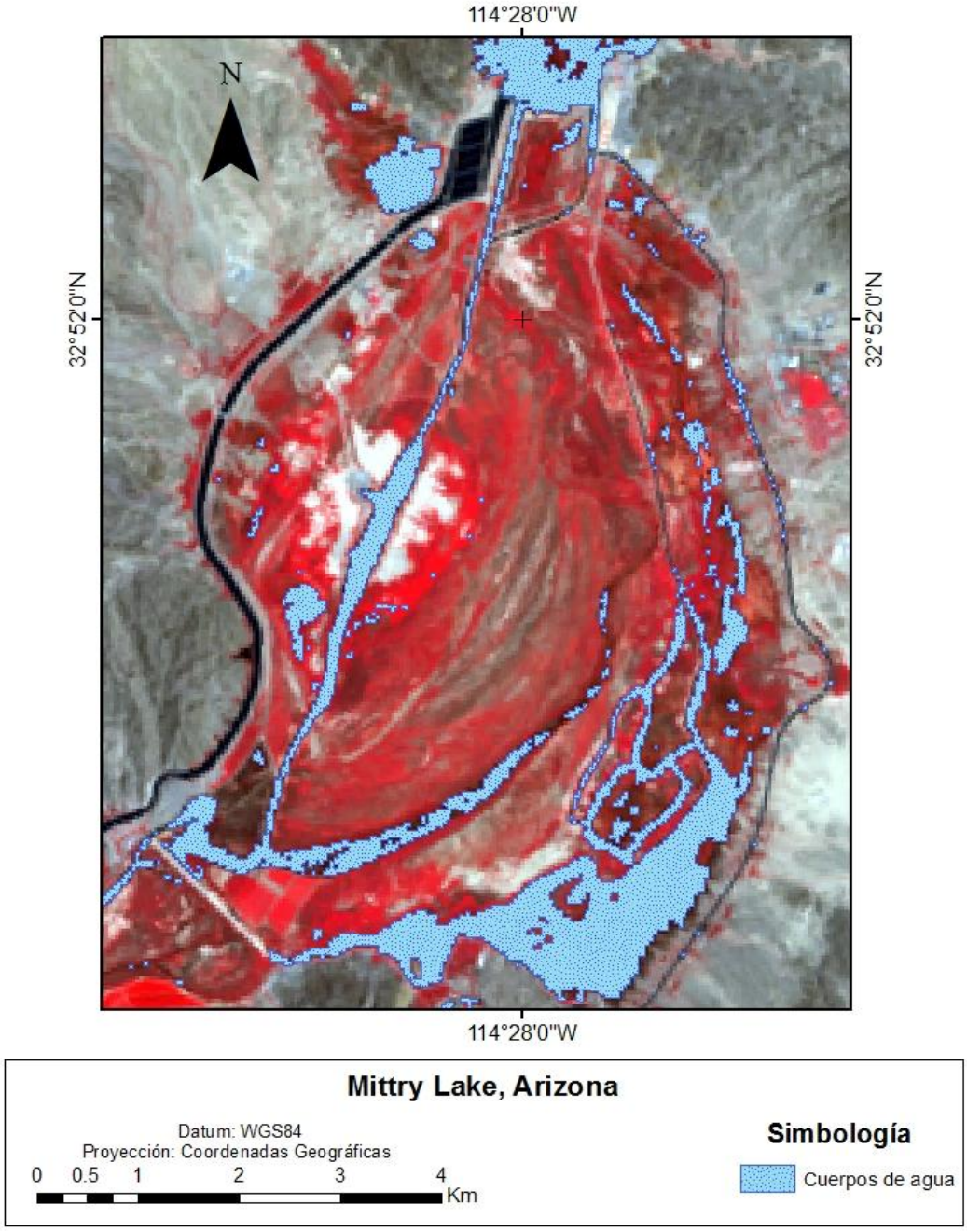


Figura A8.6 . Zona 7: Mittry L ake, Arizona, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1997 . La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

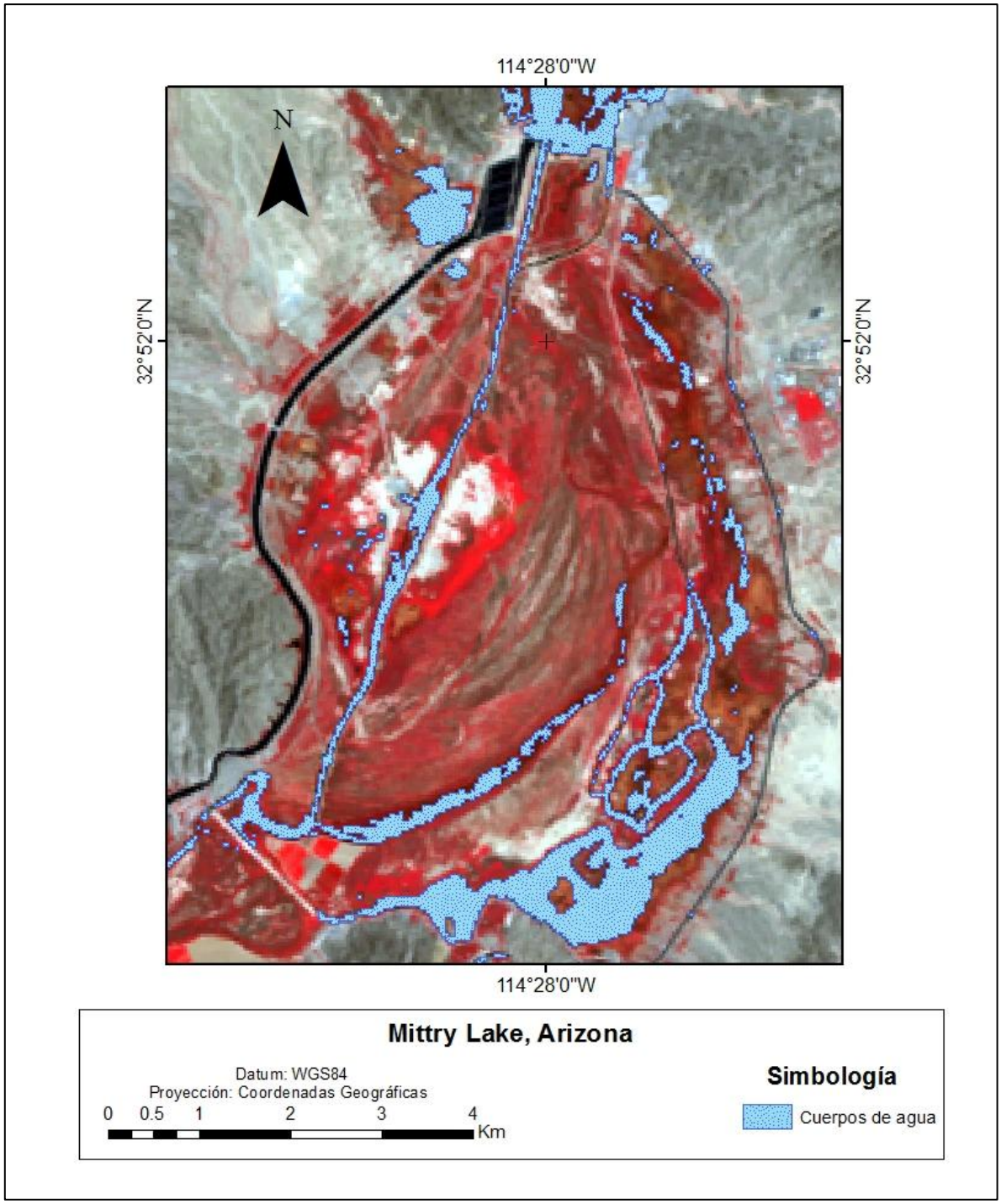


Figura A8.7. Zona 7: Mittry Lake, Arizona, EUA. Resultados de la iden tificación de los cuerpos de agua para el año 2002. La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

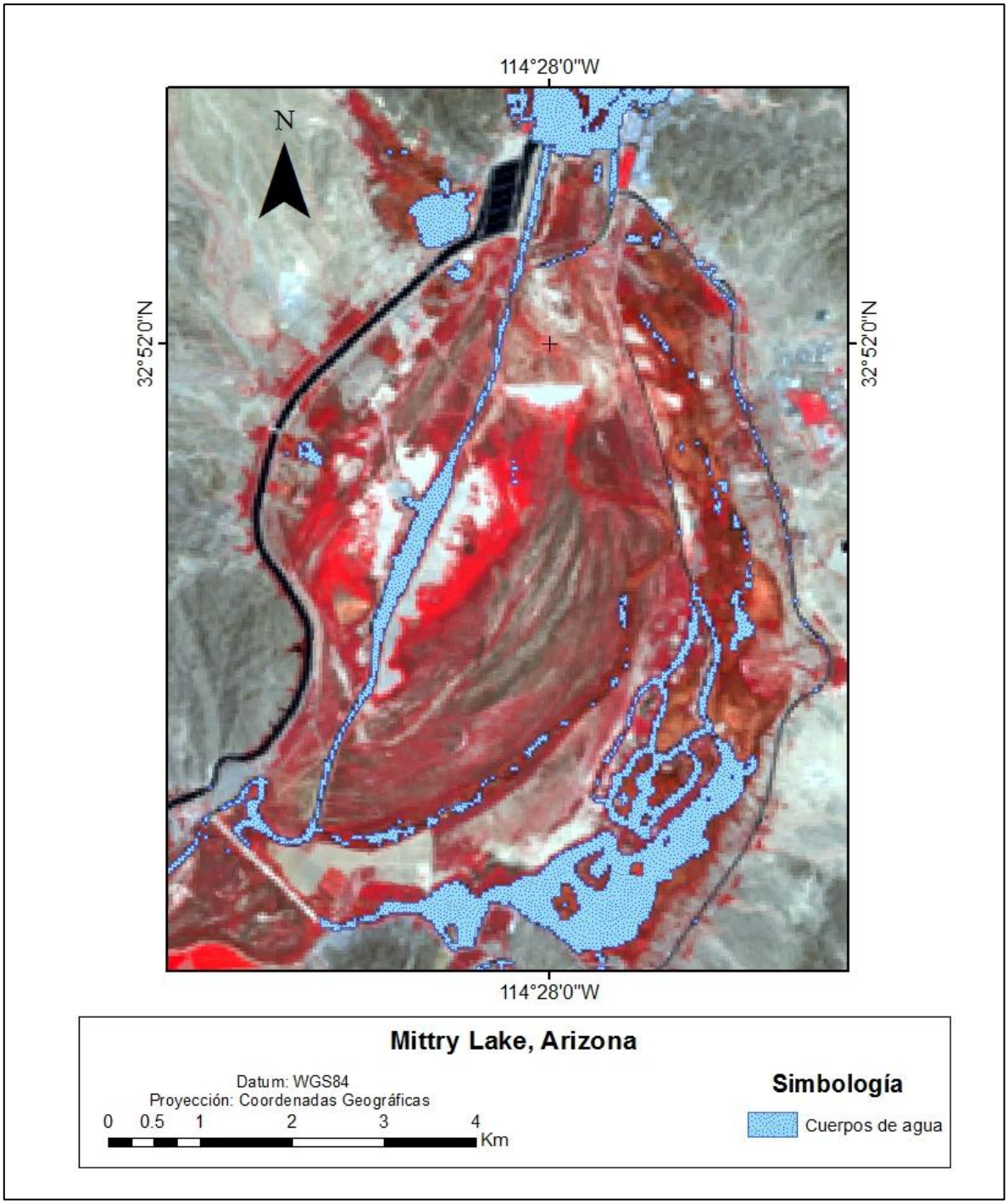


Figura A8.8 . Zona 7: Mittry Lake, Arizona, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 2007. La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

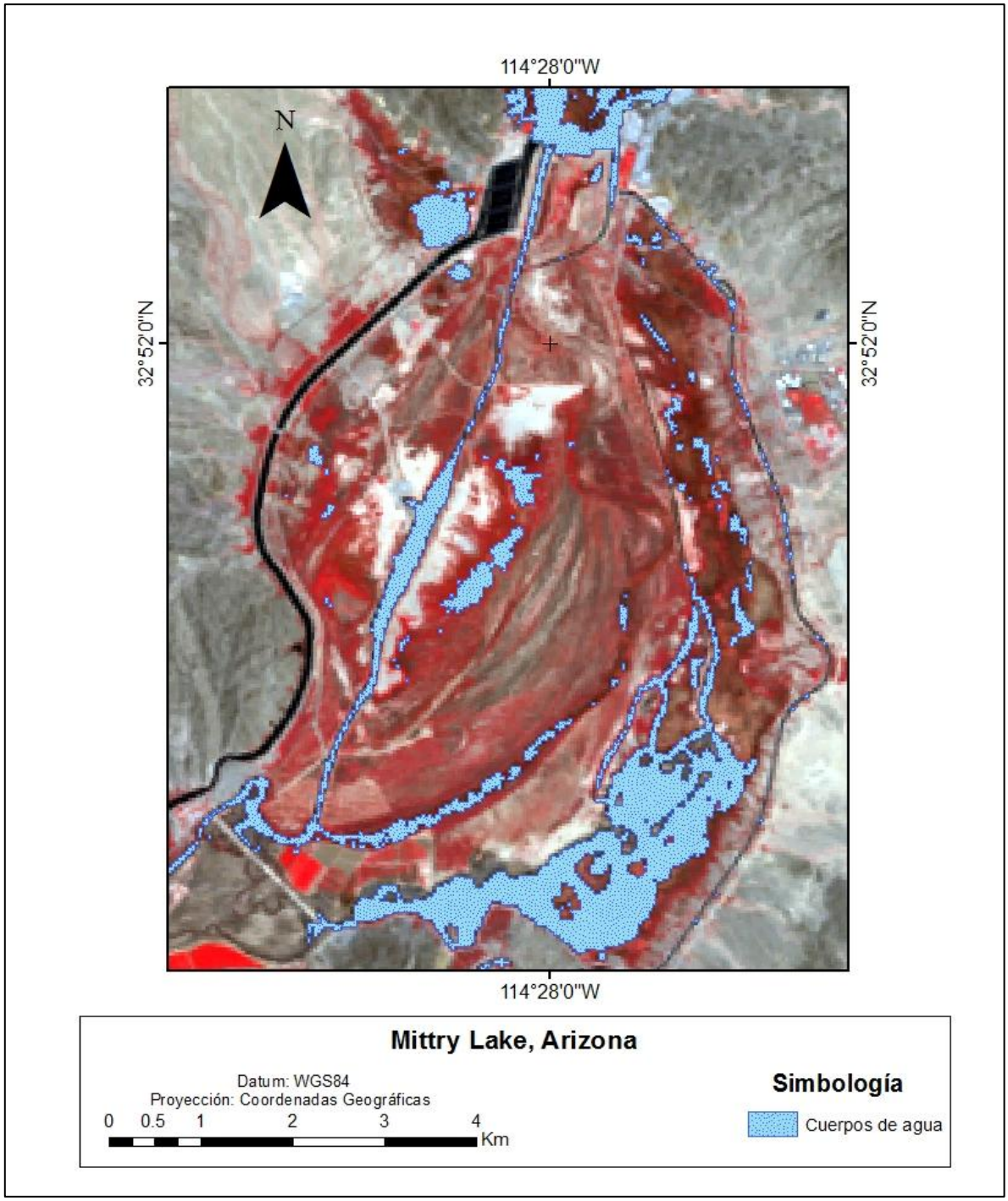


Figura A8.9 . Zona 7: Mittry Lake, Arizona, EUA. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 2011. La imagen en falso color infra rrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

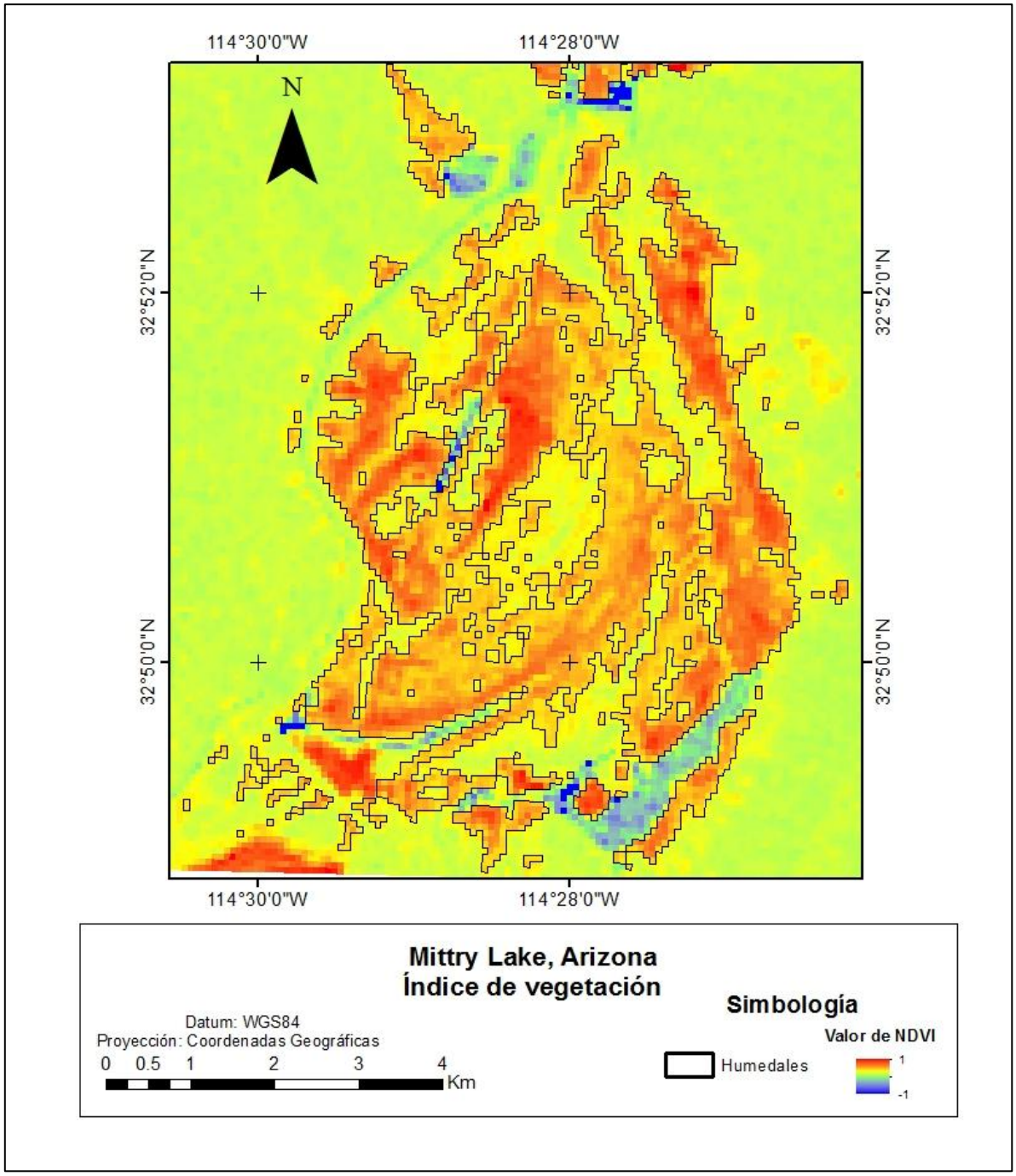


Figura A8.10 . Zona 7: Mittry Lake, Arizona, EUA. Imagen de NDVI para el año 1972. Las área s de la cubierta vegetal de los humedales estan vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 1 MSS.

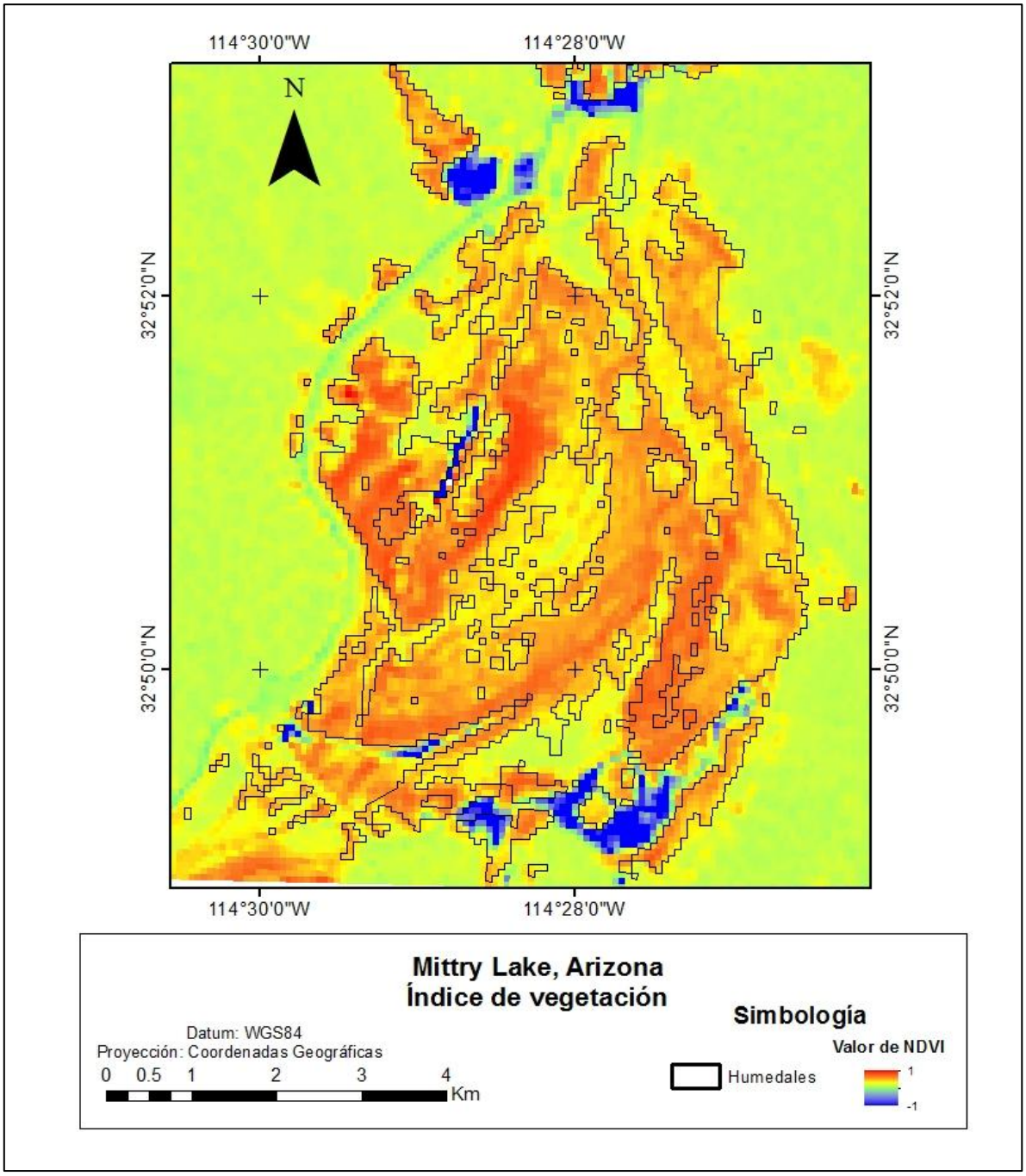


Figura A8.11 . Zona 7: Mittry Lake, Arizona, EUA. Imagen de NDVI para el año 1977. Las área s de la cubierta vegetal de los humedales estan vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 2 MSS.

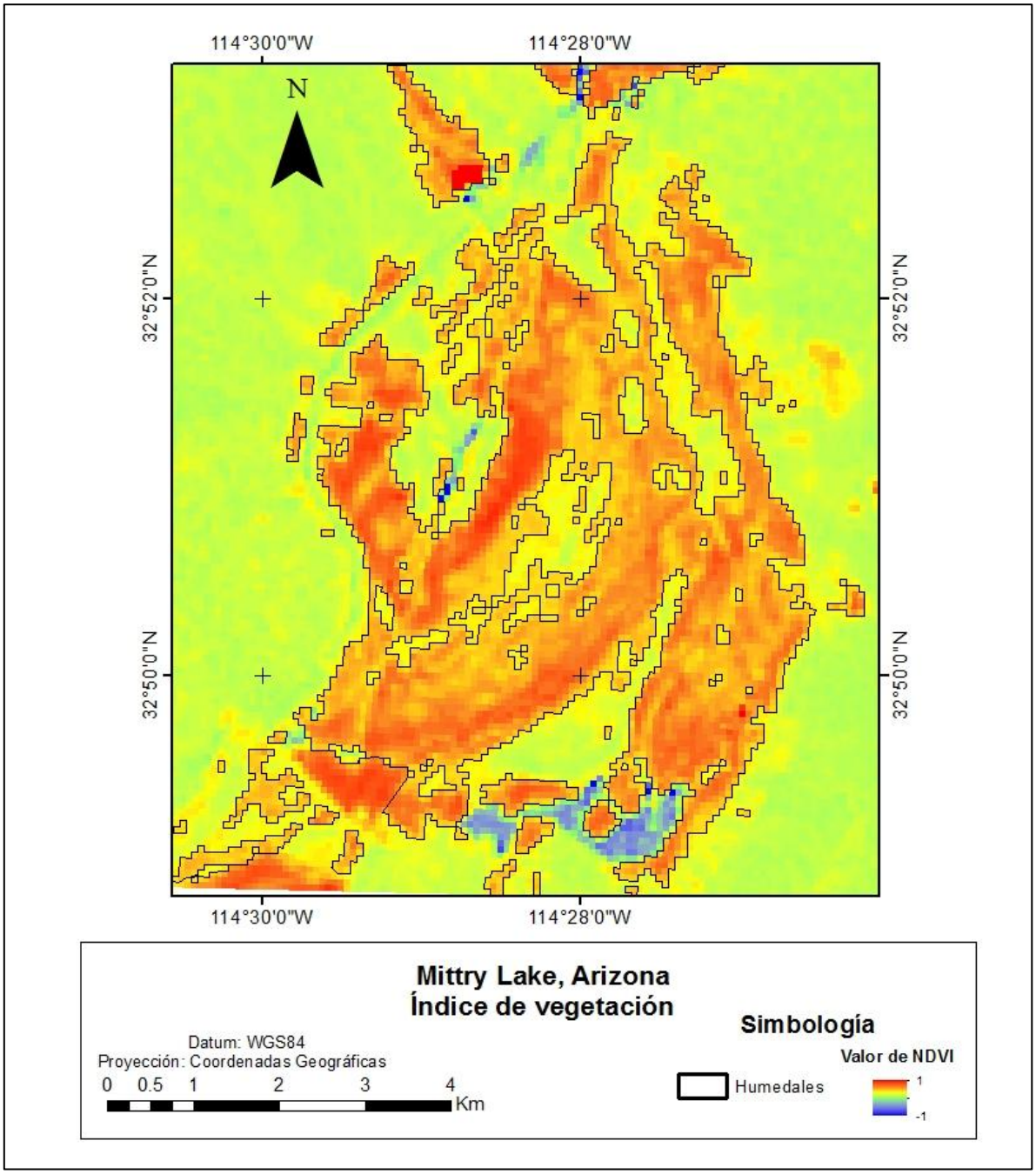


Figura A8.12. Zona 7: Mittry Lake, Arizona, EUA. Imagen de NDVI para el año 1982. Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales estan vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 3 MSS.

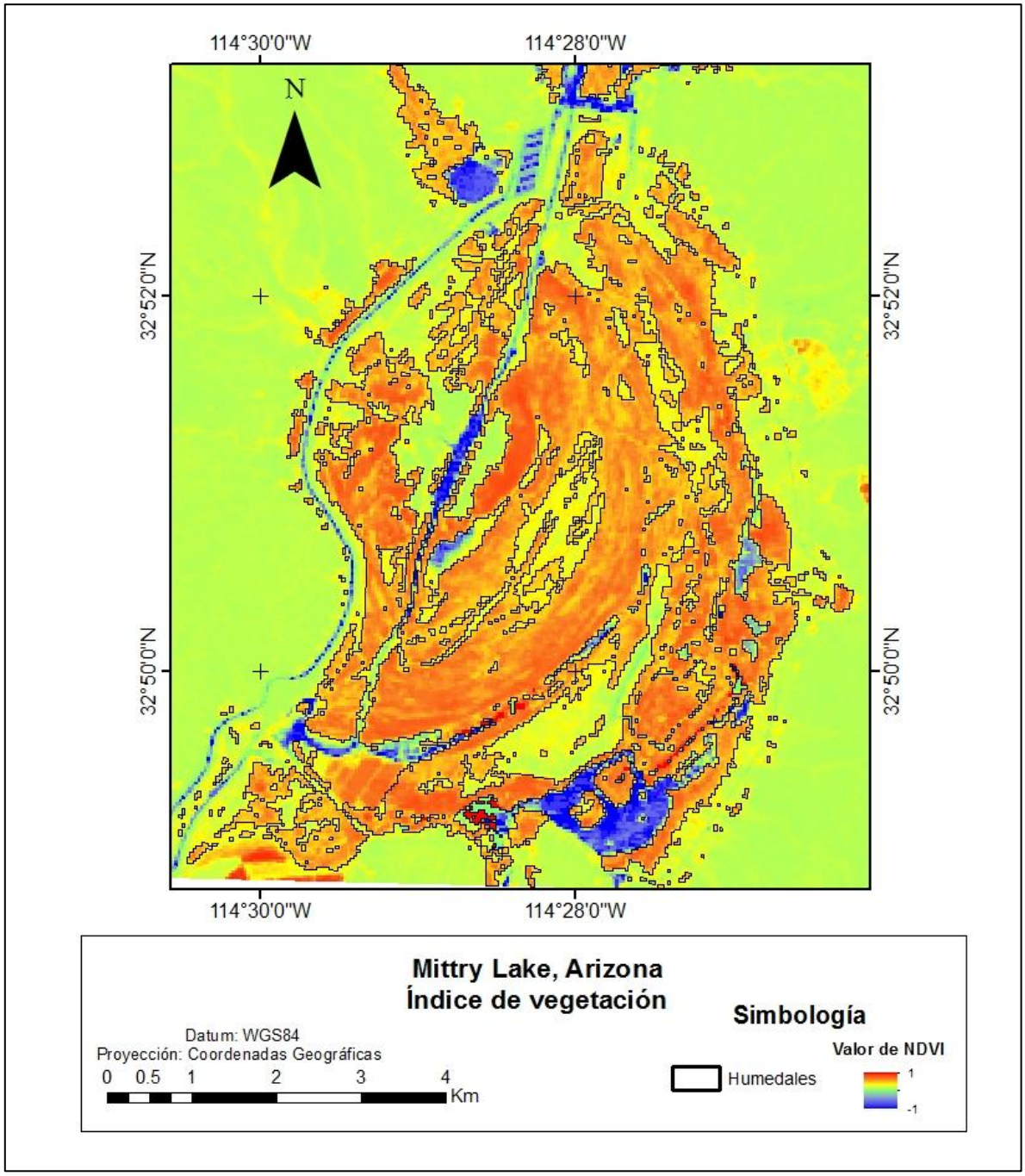


Figura A8.13. Zona 7: Mittry Lake, Arizona, EUA. Imagen de NDVI para el año 1987. Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 5 TM .

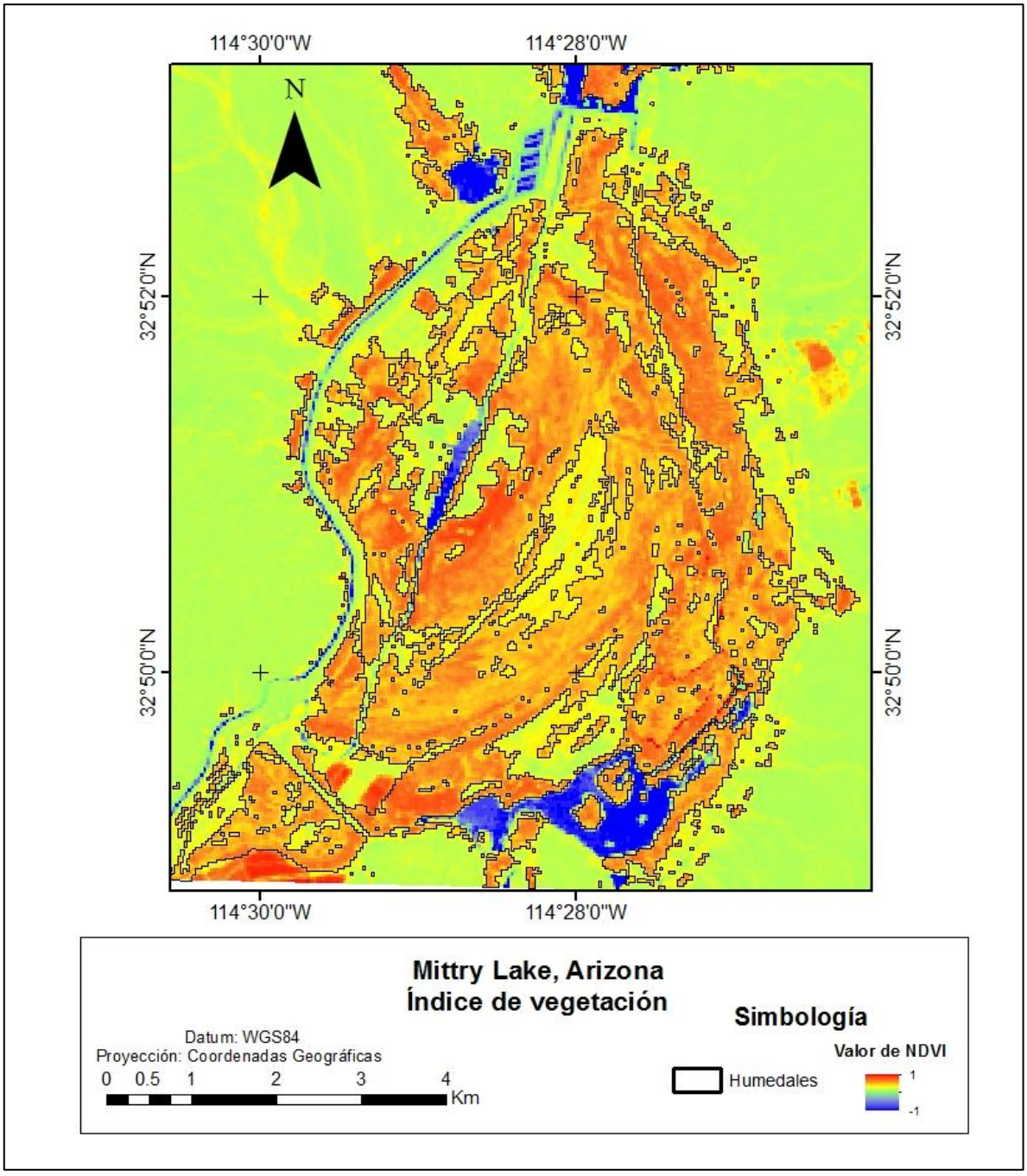


Figura A8.14. Zona 7: Mittry Lake, Arizona, EUA. Imagen de NDVI para el año 1992. Las área s de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a part ir de la imagen de Landsat 5 TM .

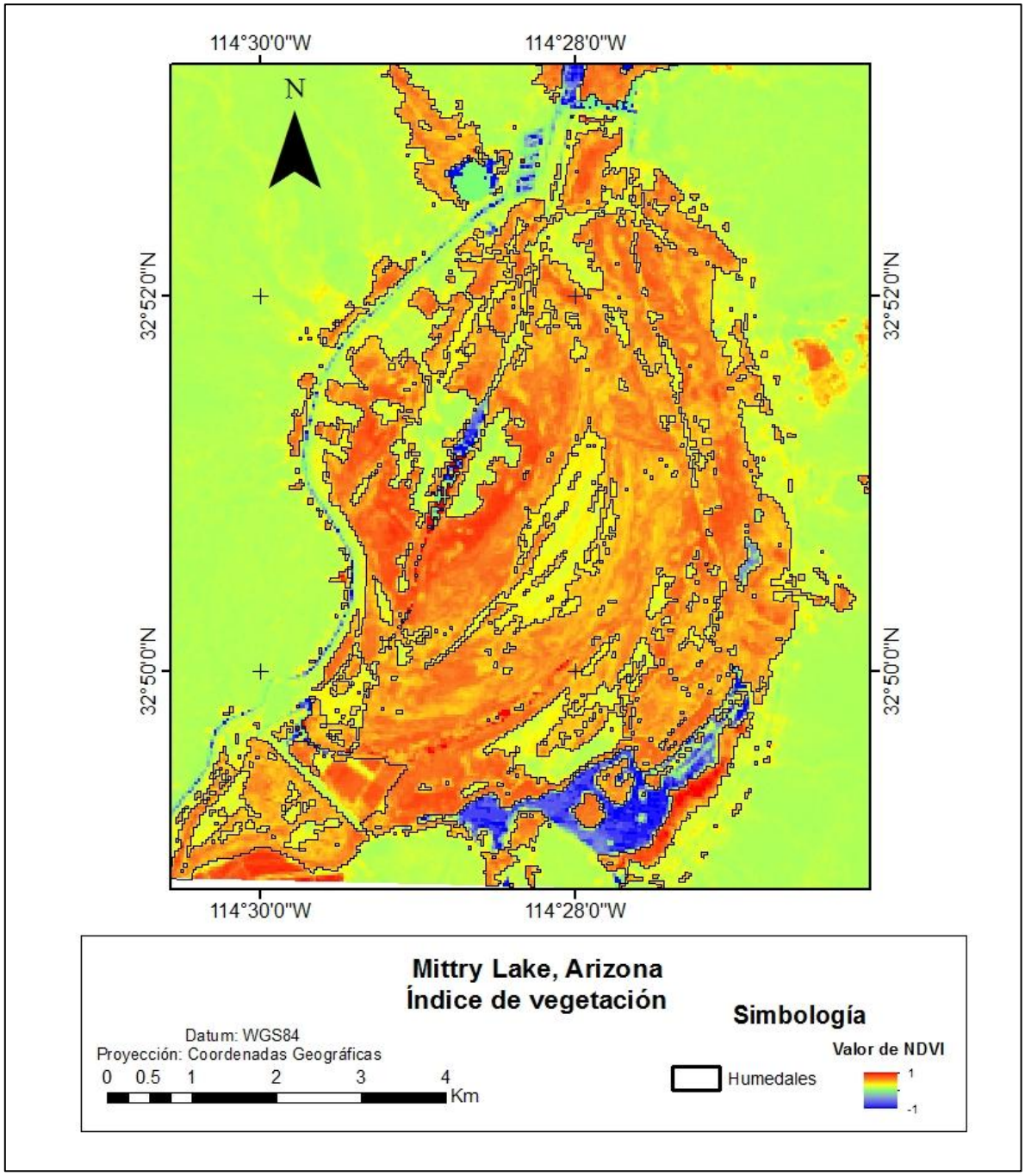


Figura A8.15 . Zona 7: Mittry Lake, Arizona, EUA. Imagen de NDVI para el año 1997. Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a part ir de la imagen de Landsat 5 TM .

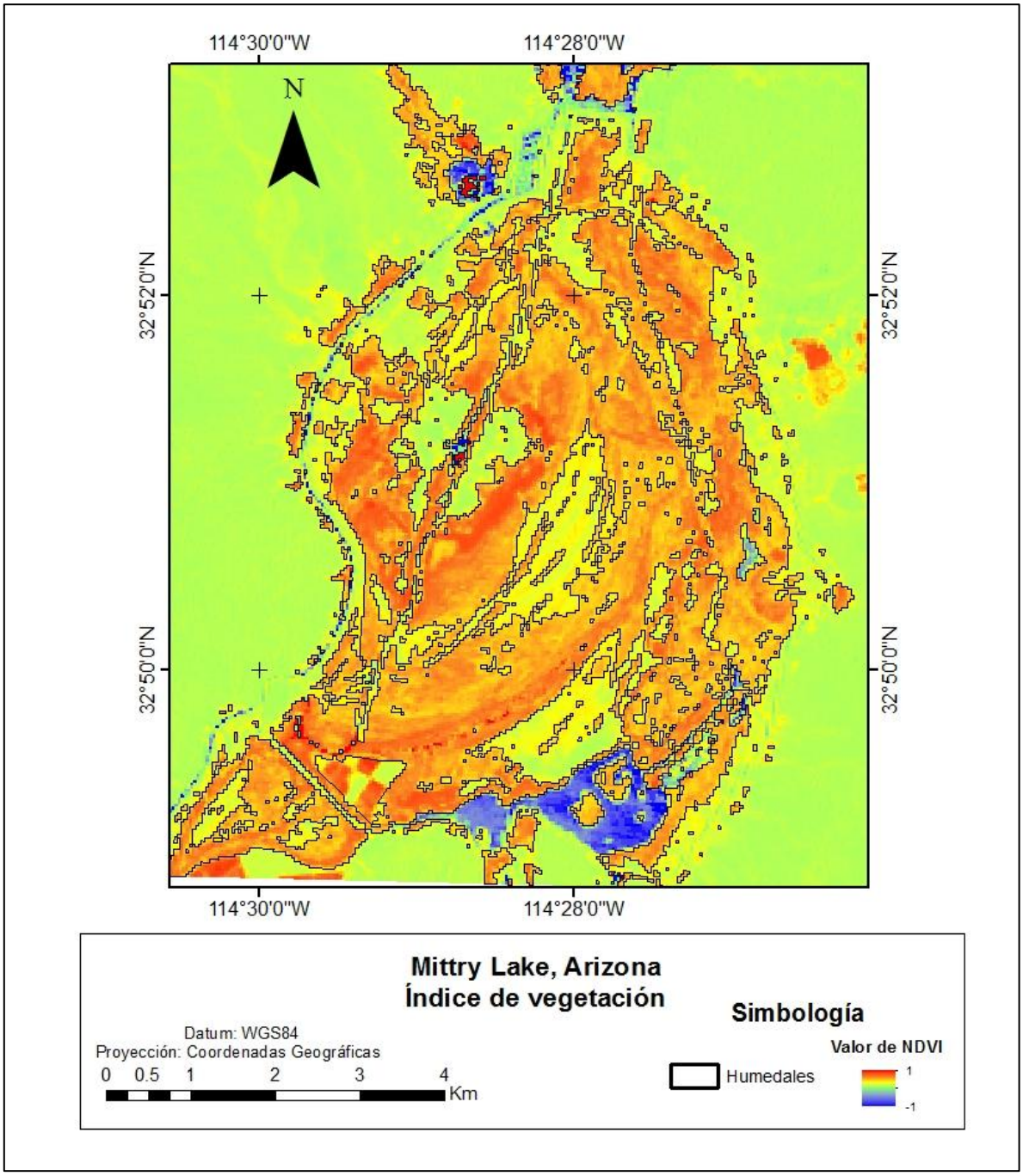


Figura A8.16 . Zona 7: Mittry Lake, Arizona, EUA. Imagen de NDVI para el año 2002. Las área s de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a part ir de la imagen de Landsat 5 TM .

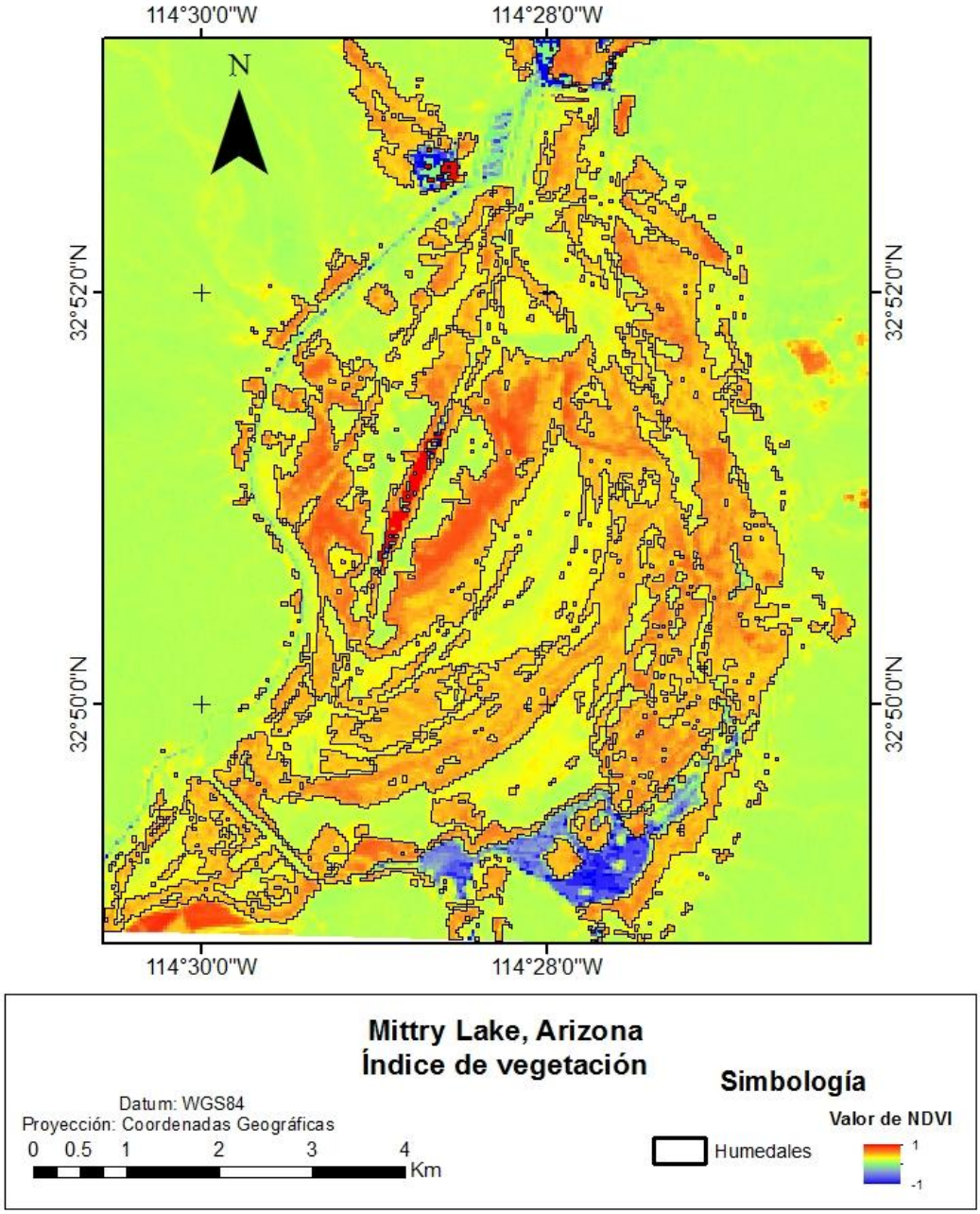


Figura A8.17 . Zona 7: Mittry Lake, Arizona, EUA. Imagen de NDVI para el año 2007. Las área s de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizada s. El índice de NDVI se calculó a part ir de la imagen de Landsat 5 TM .

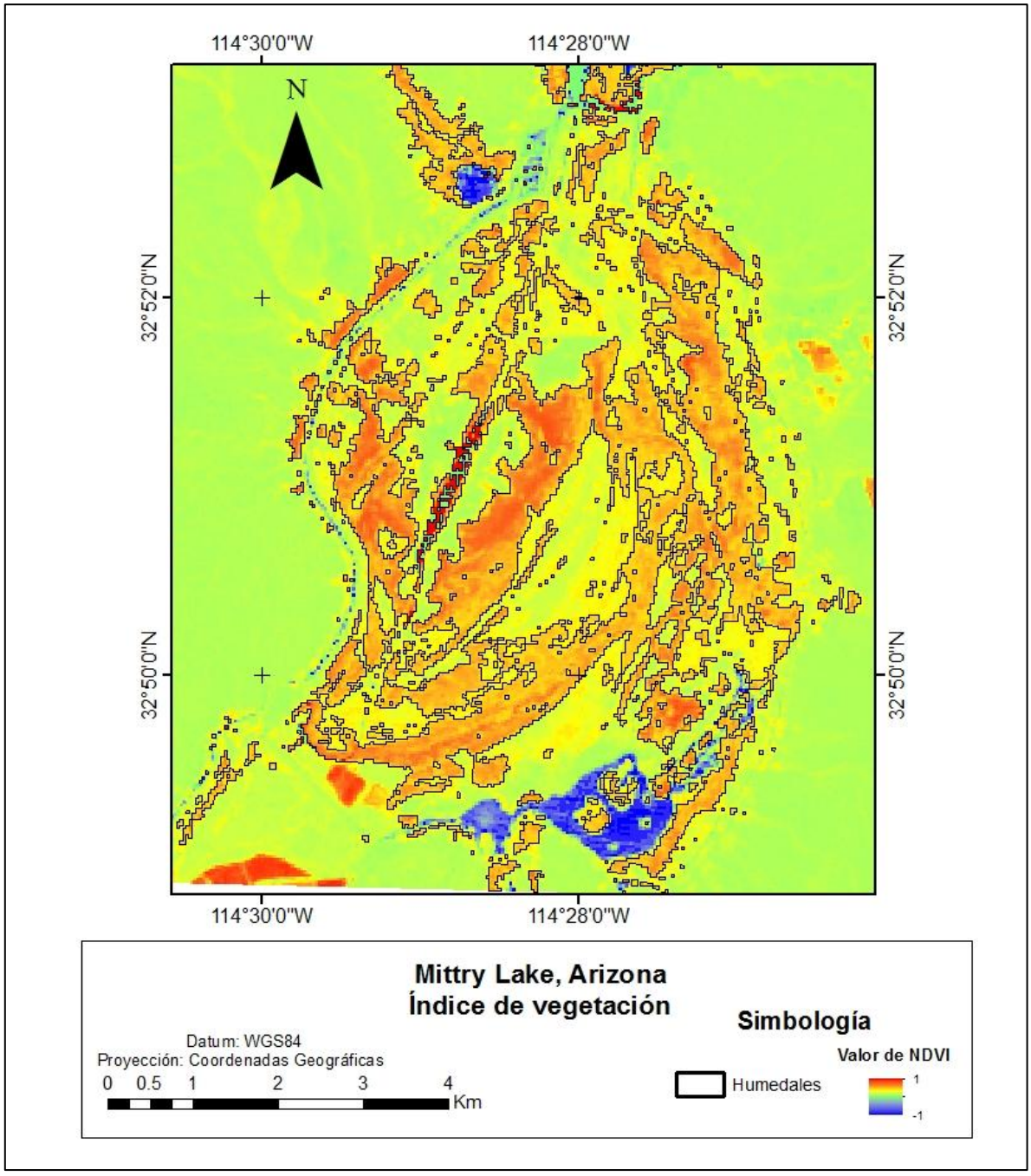


Figura A8.18 . Zona 7: Mittry Lake, Arizona, EUA. Imagen de NDVI para el año 2011. Las área s de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a part ir de la imagen de Landsat 5 TM .

ANEXO 9

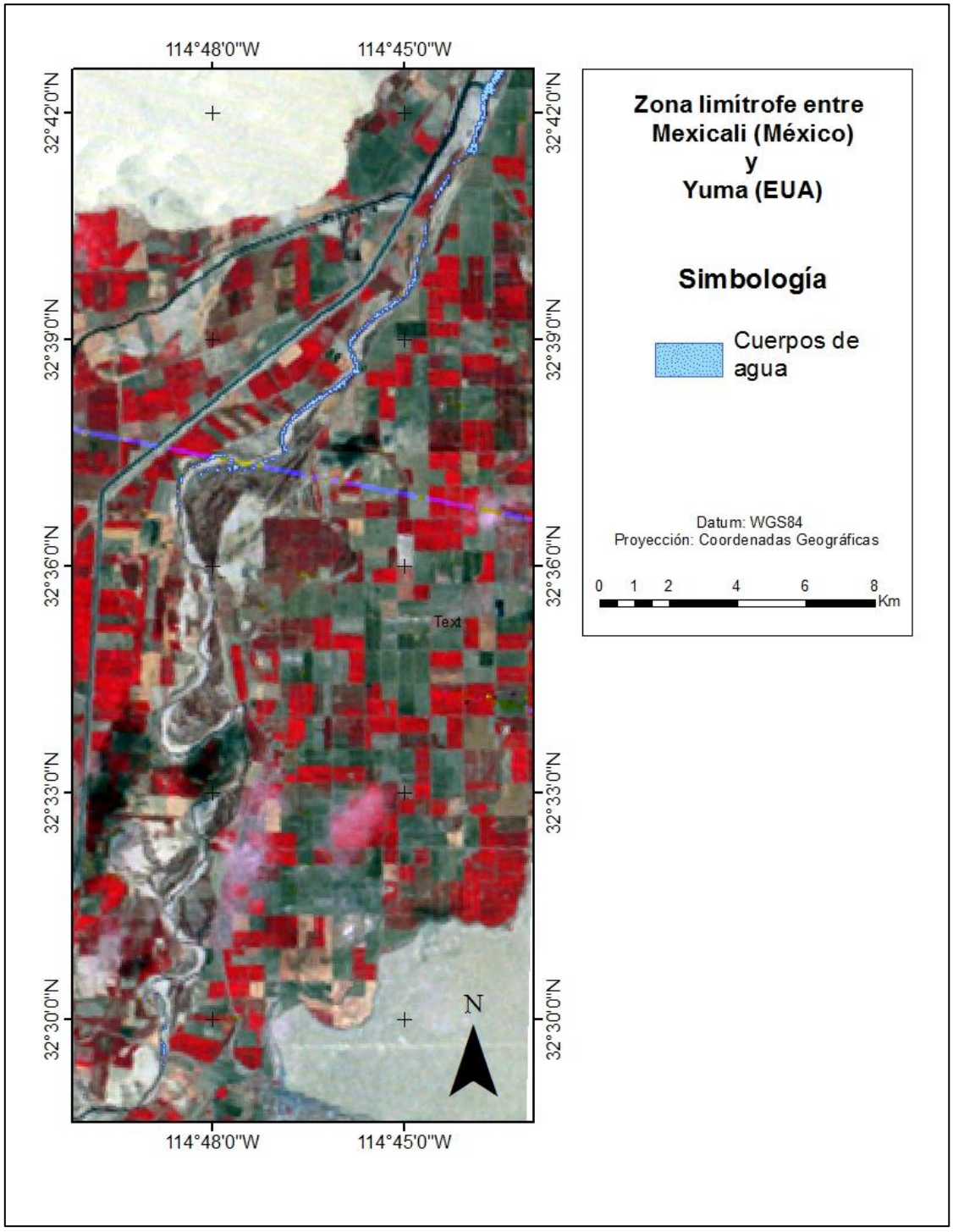


Figura A9.1 . Zona 8: Tramo limítrofe del río Colorado, EUA -México . Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1972. La imagen en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 1 M SS se está usando como fondo.

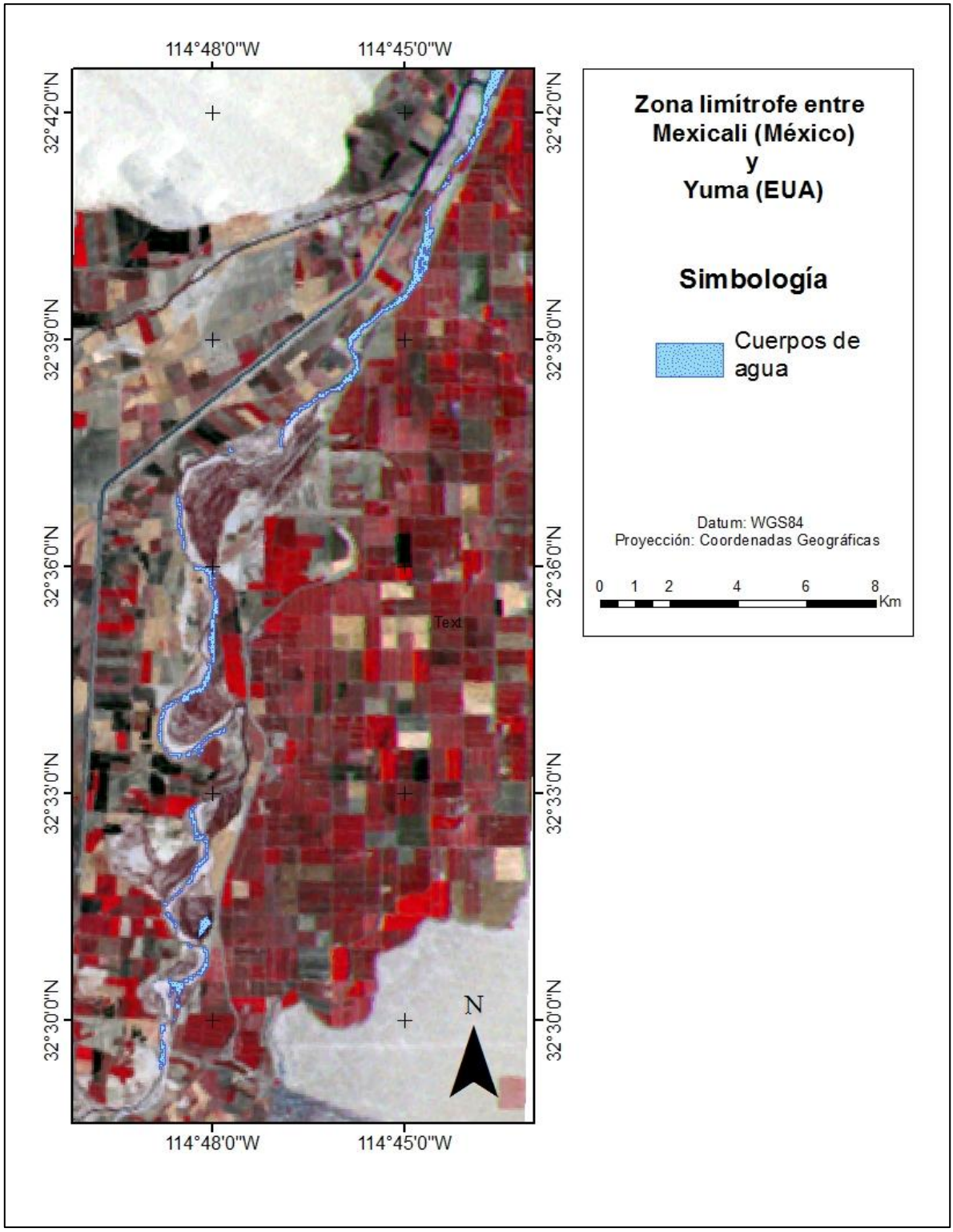


Figura A9.2. Zona 8: Tramo limítrofe del río Colorado, EUA -México. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1977. La imagen en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 2 MSS se está usando como fondo.

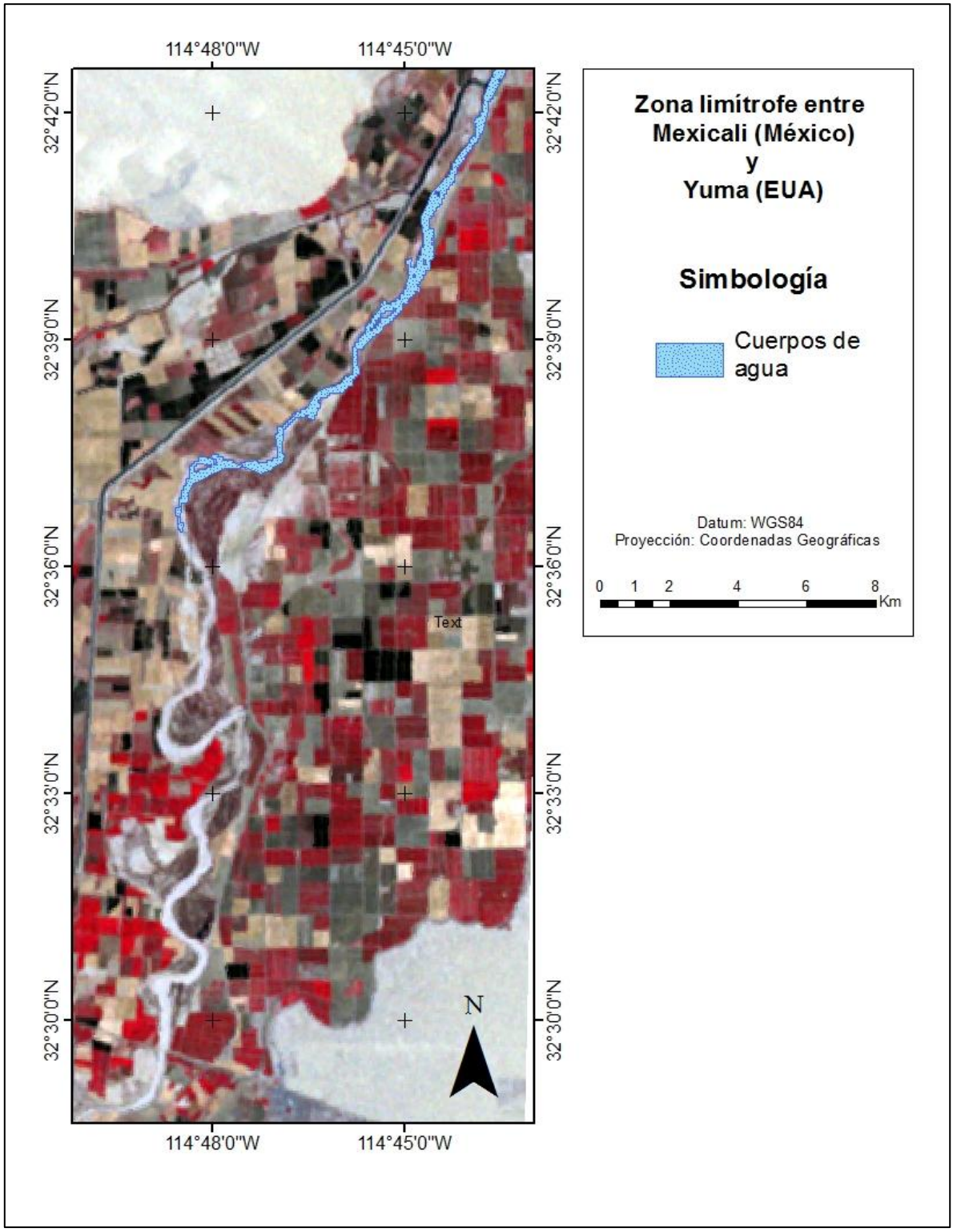


Figura A9.3. Zona 8: Tramo limítrofe del río Colorado, EUA -México. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1982. La imagen en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 3 MSS se está usando como fondo.

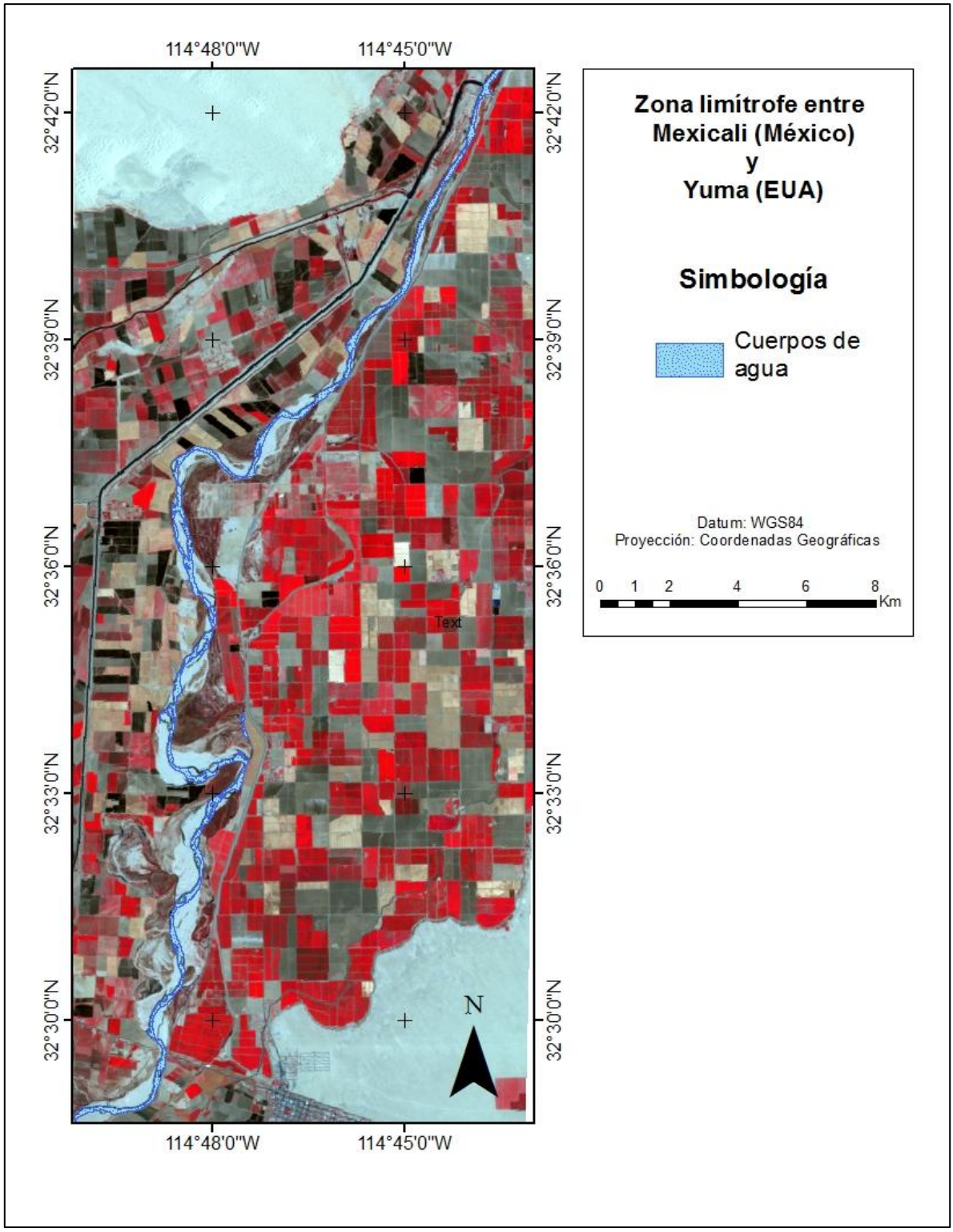


Figura A9.4. Zona 8: Tramo limítrofe del río Colorado, EUA -México. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1987. La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

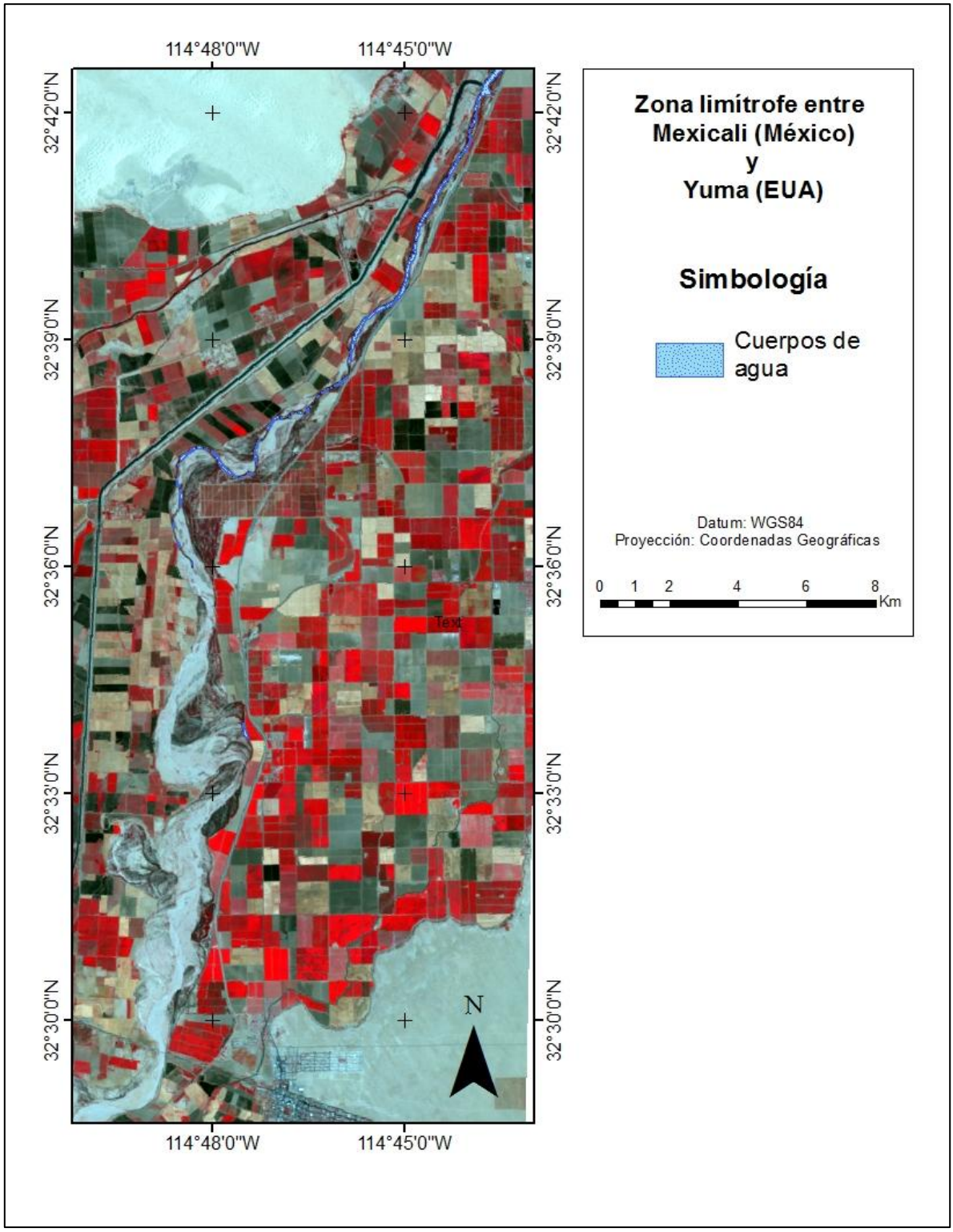


Figura A9.5. Zona 8: Tramo limítrofe del río Colorado, EUA -México. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1992. La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

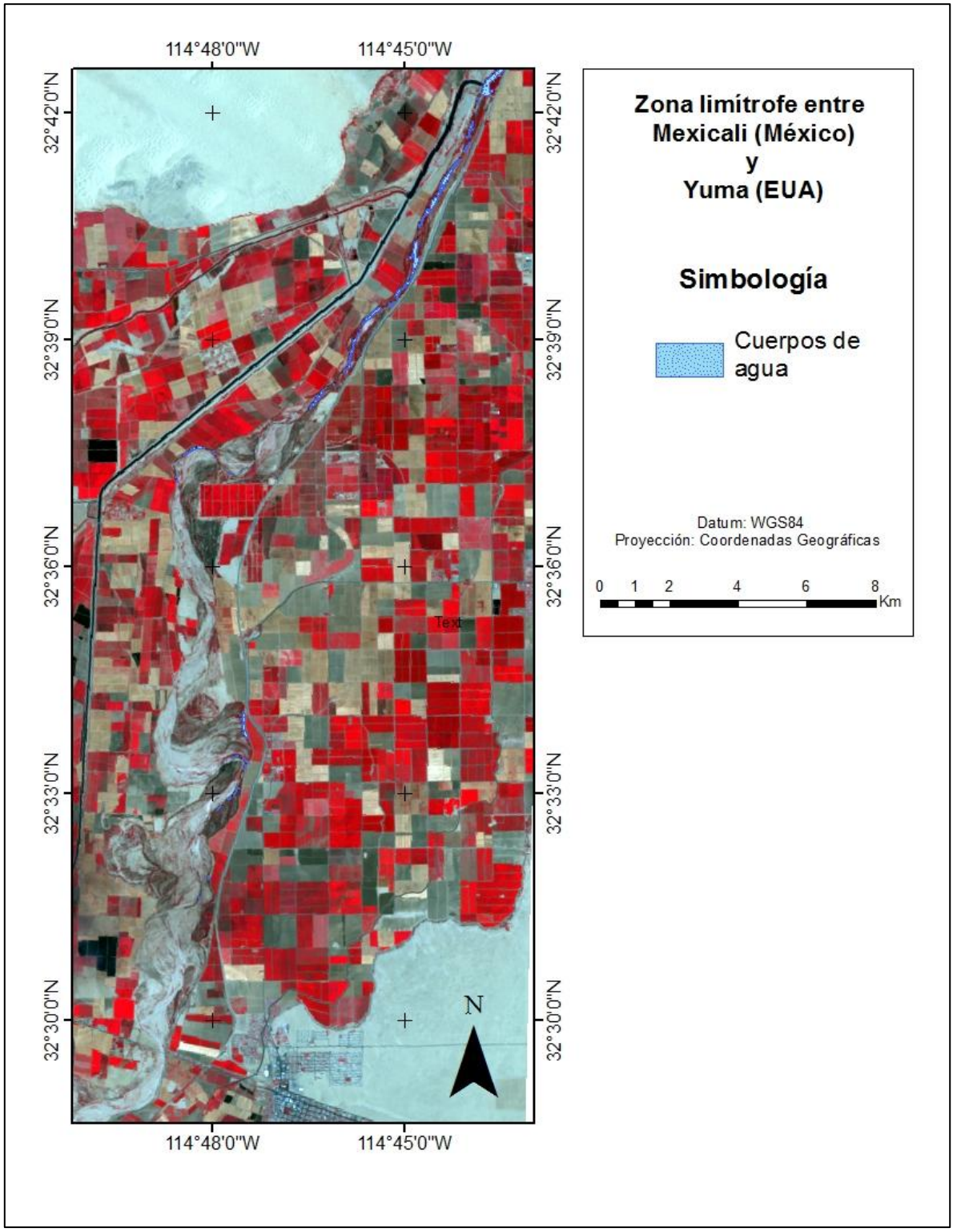


Figura A9.6. Zona 8: Tramo limítrofe del río Colorado, EUA-México. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1997. La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

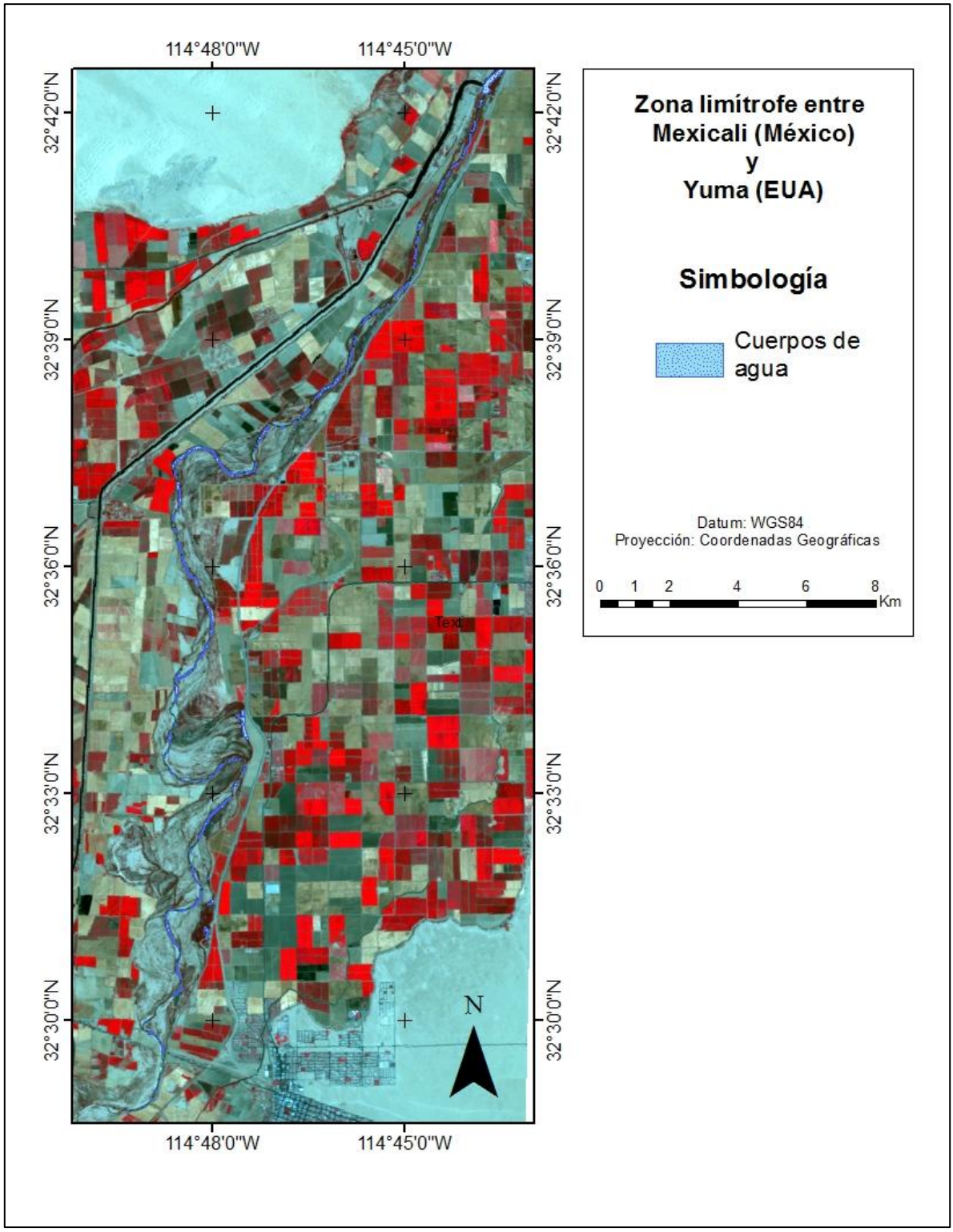


Figura A9.7. Zona 8: Tramo limítrofe del río Colorado, EUA -México. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 2002. La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

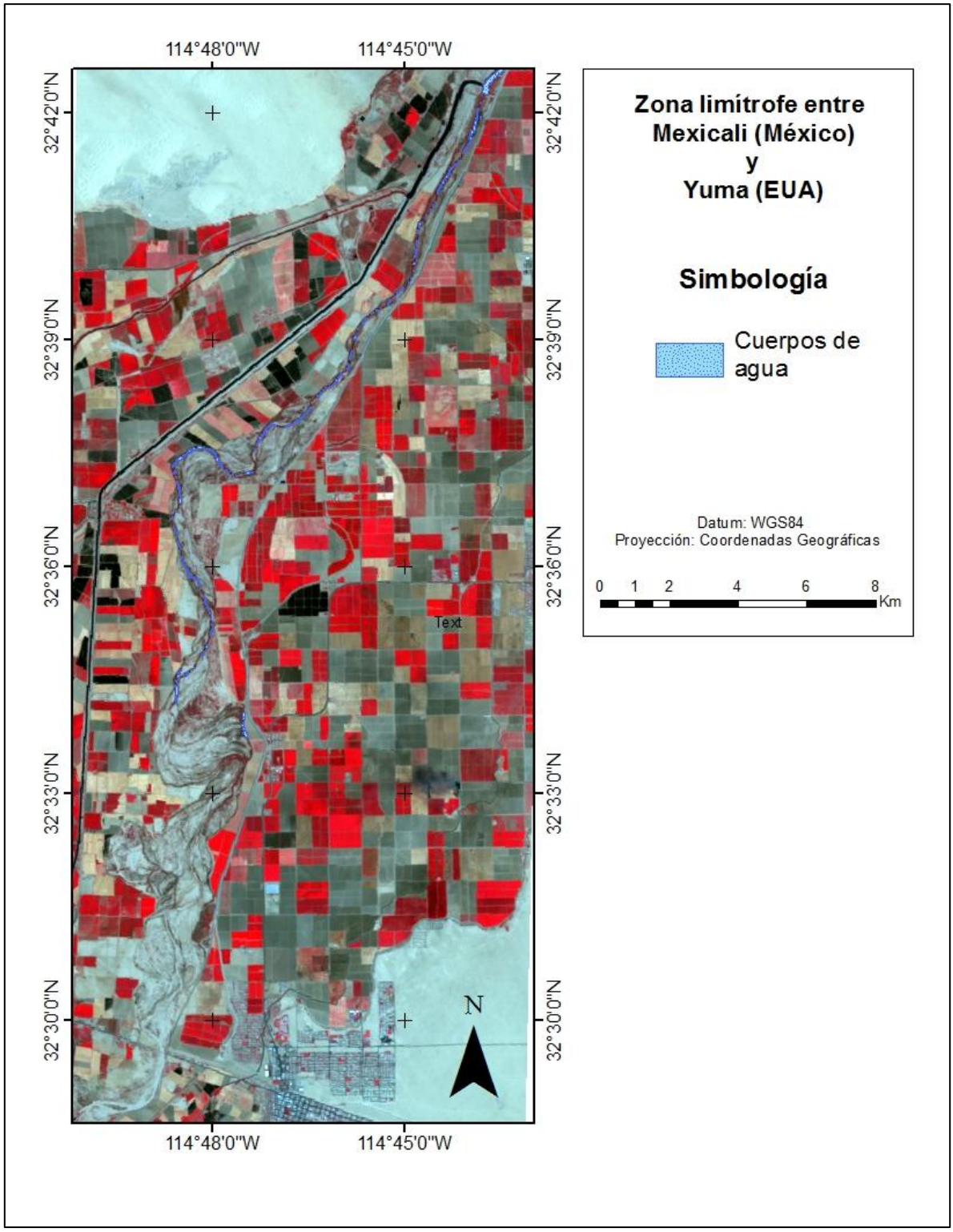


Figura A9.8. Zona 8: Tramo limítrofe del río Colorado, EUA -México. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 2007. La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

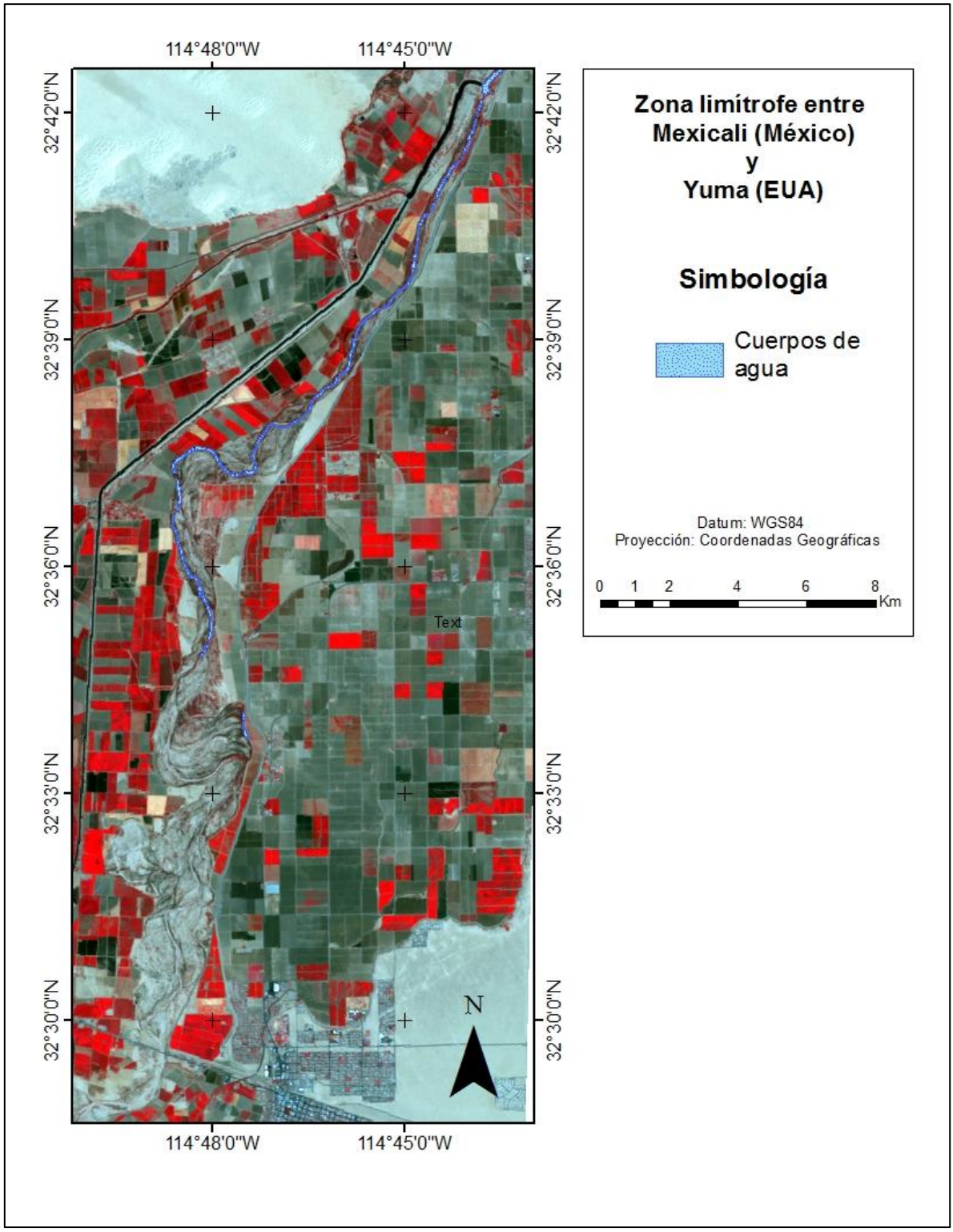


Figura A9.9. Zona 8: Tramo limítrofe del río Colorado, EUA -México. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 2011. La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

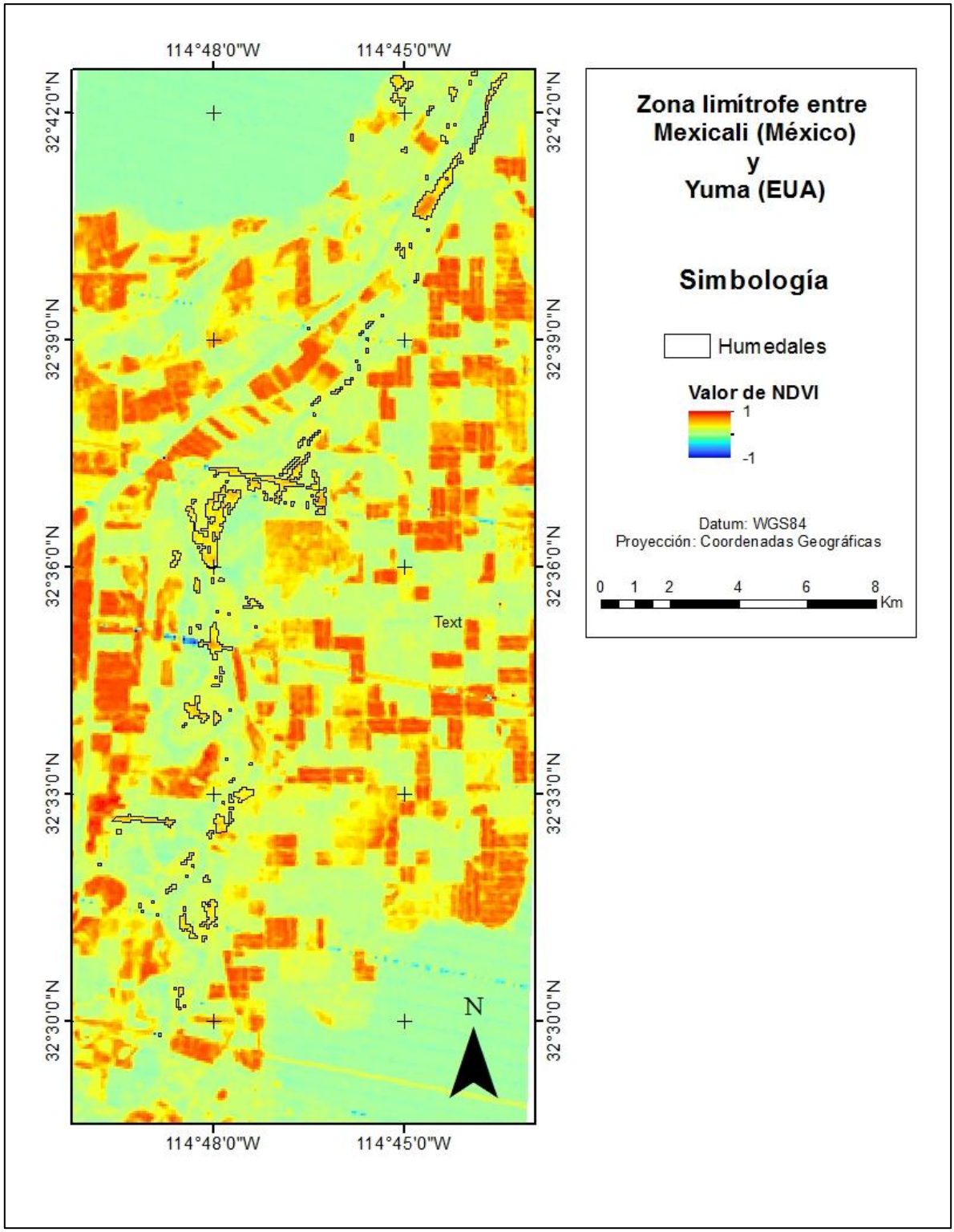


Figura A9.10 . Zona 8: Tramo limítrofe del río Colorado, EUA -México. Imagen de NDVI para el año 1972. Las áreas de la cubierta vegetal de l os humedales están vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 1 MSS.

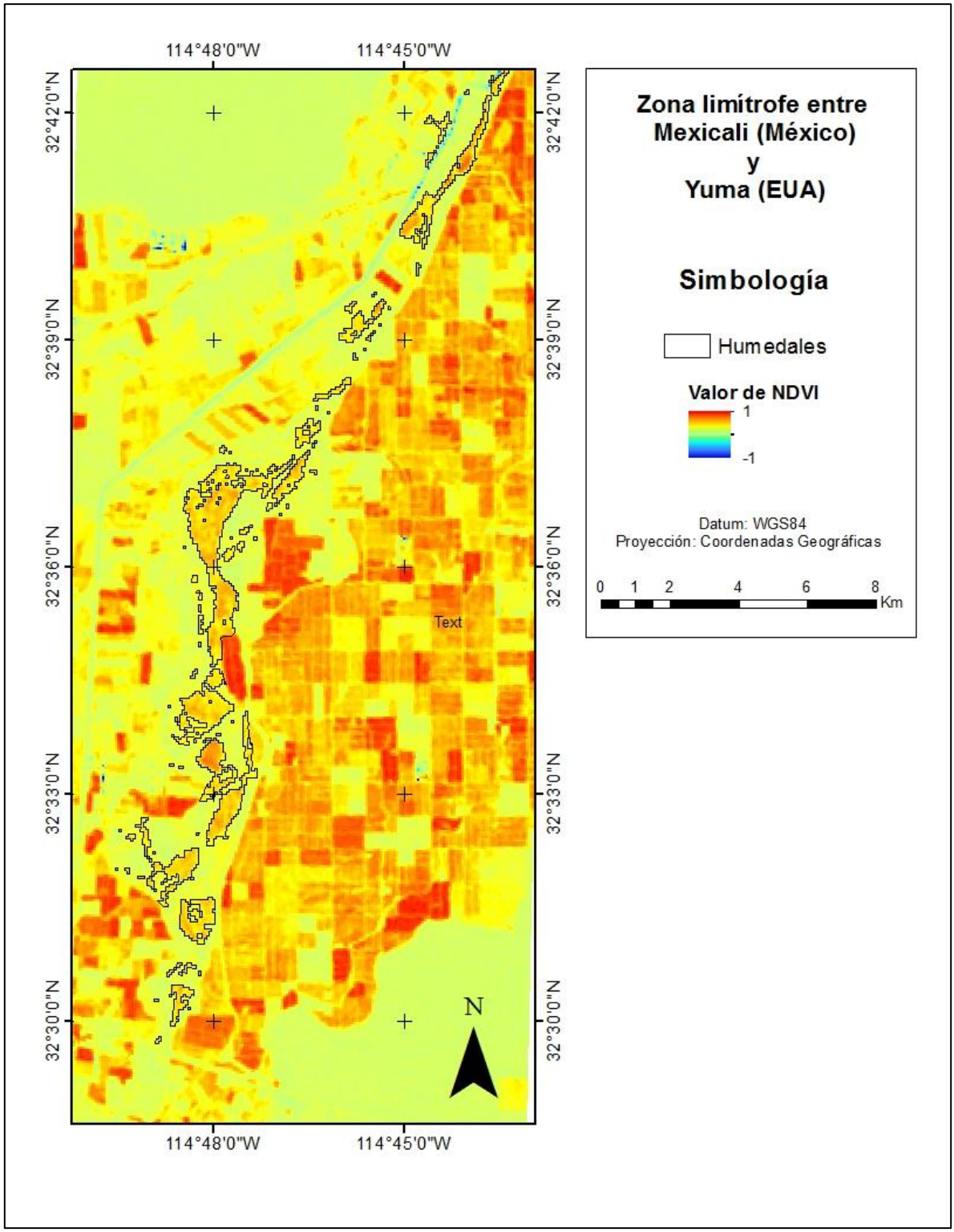


Figura A9.11 . Zona 8: Tramo limítrofe del río Colorado, EUA -México. Imagen de NDVI para el año 1977 . Las áreas de la cubierta vegetal de los humedale s están vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a parti r de la imagen de Landsat 2 MSS .

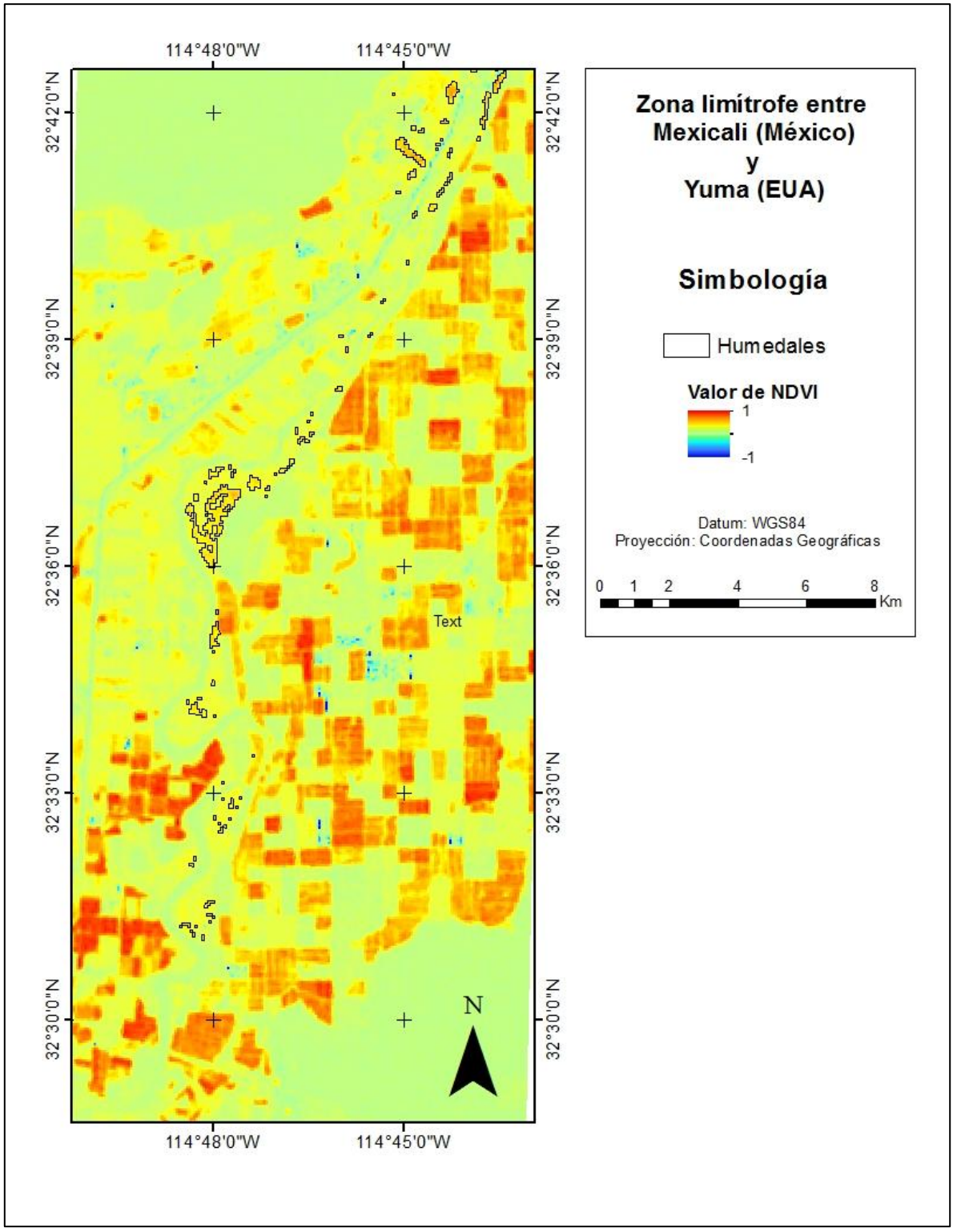


Figura A9.12. Zona 8: Tramo limítrofe del río Colorado, EUA -México. Imagen de NDVI para el año 198 2. Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vec torizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 3 MSS.

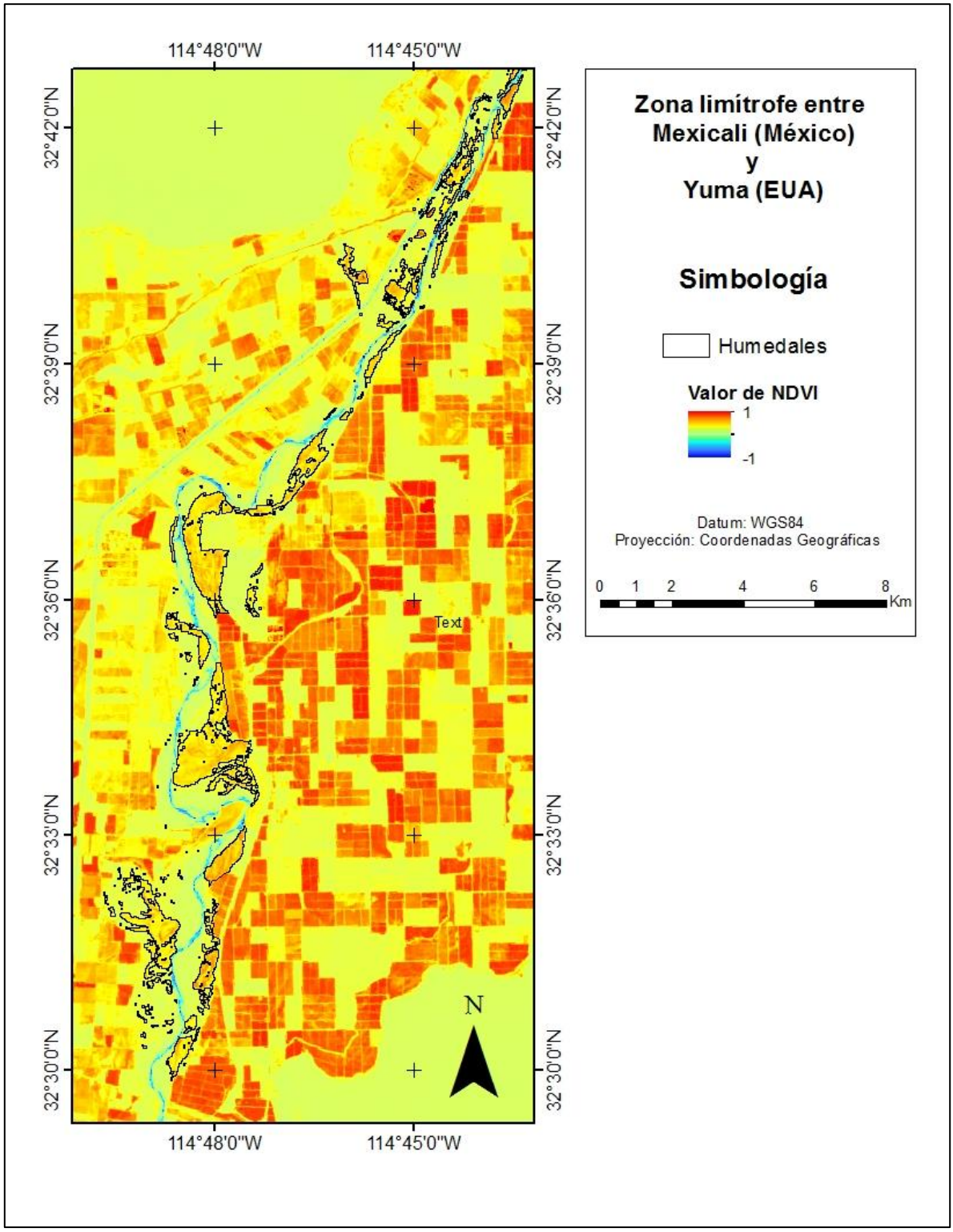


Figura A9.13. Zona 8: Tramo limítrofe del río Colorado, EUA -México. Imagen de NDVI para el año 1987 . Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a part ir de la imagen de Landsat 5 TM .

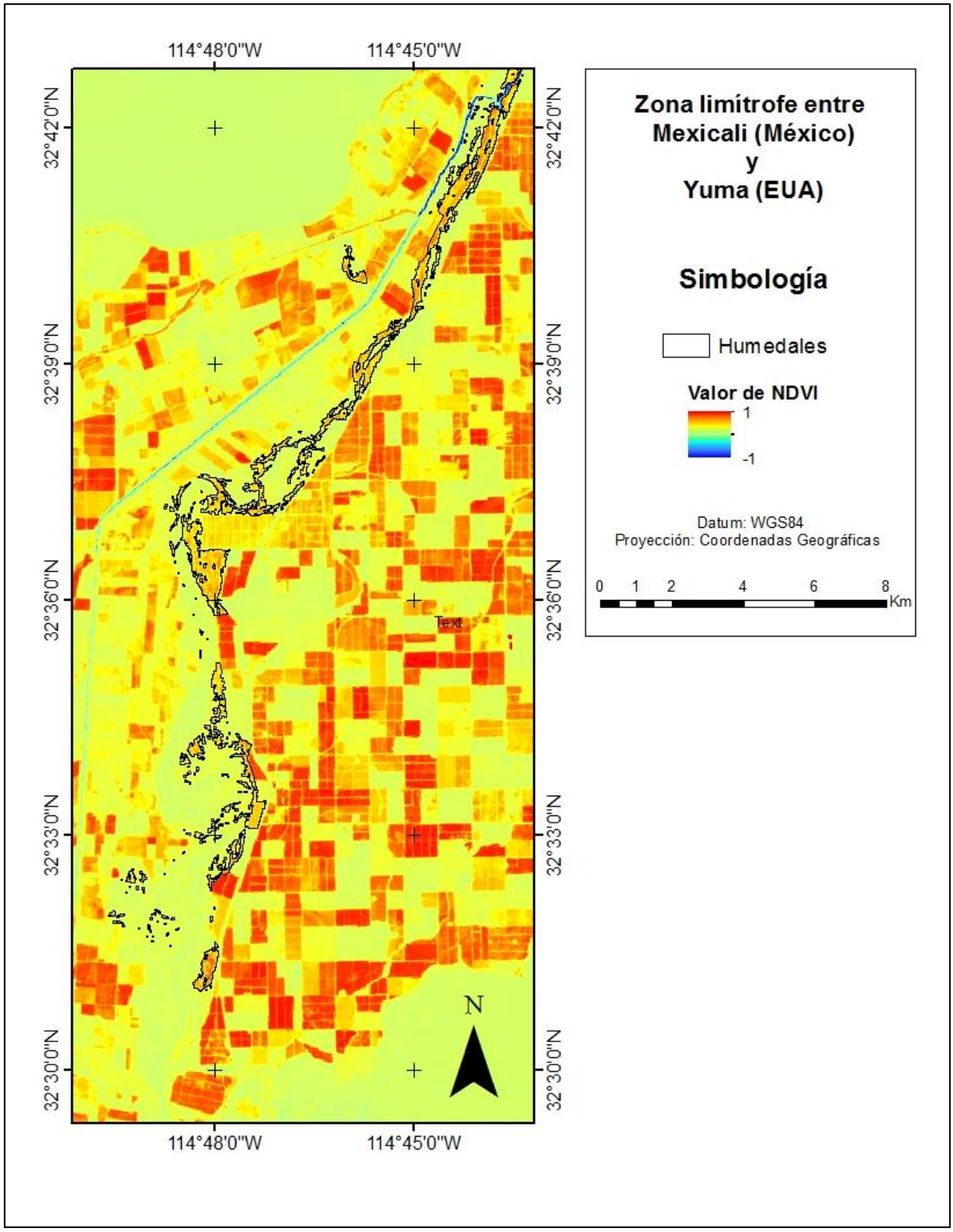


Figura A9.14. Zona 8: Tramo limítrofe del río Colorado, EUA -México. Imagen de NDVI para el año 1992 . Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas. El índice d e NDVI se calculó a part ir de la imagen de Landsat 5 TM .

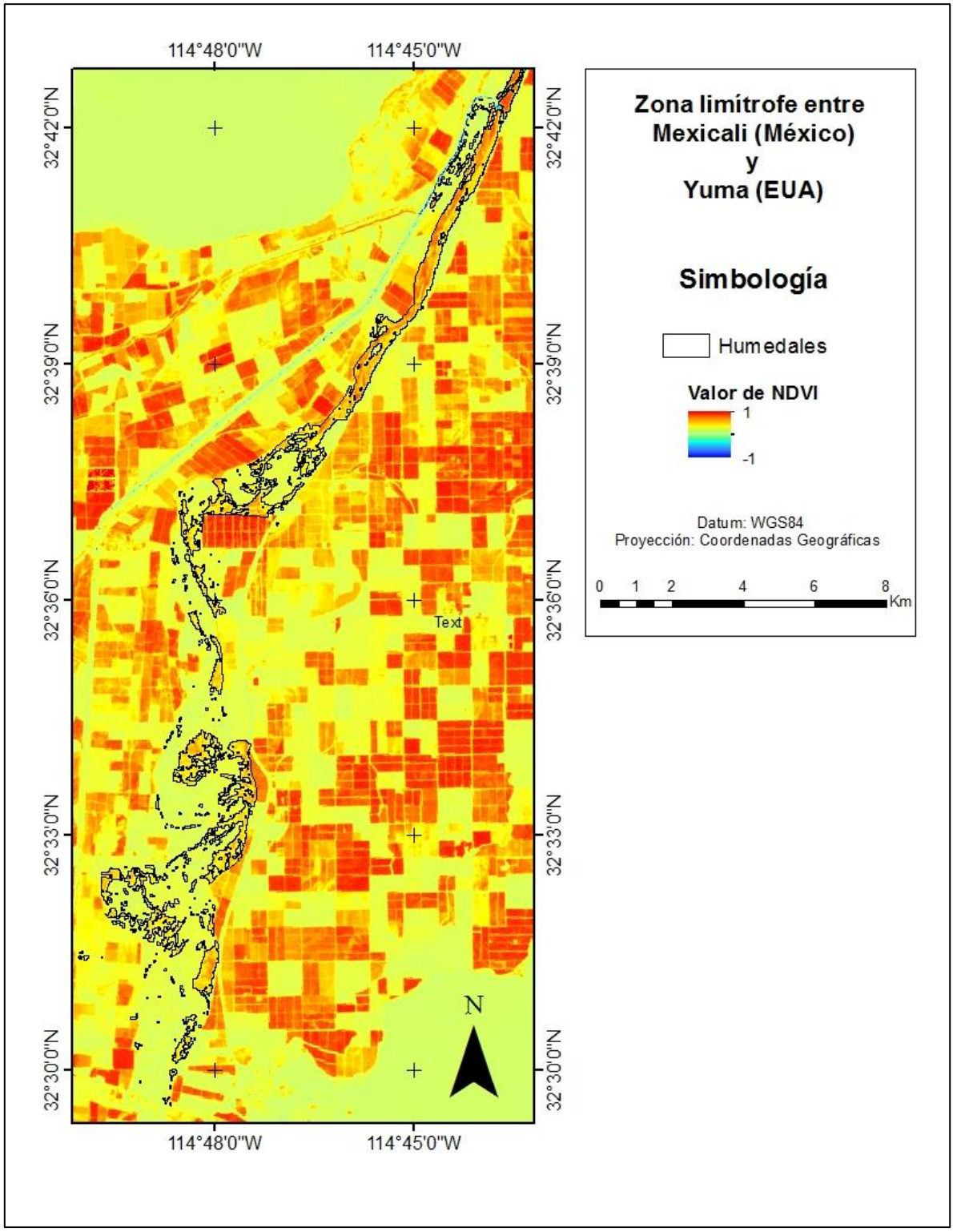


Figura A9.15 . Zona 8: Tramo limítrofe del río Colorado, EUA -México. Imagen de NDVI para el año 1997 . Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas. El índice de NDVI se ca lculó a part ir de la imagen de Landsat 5 TM .

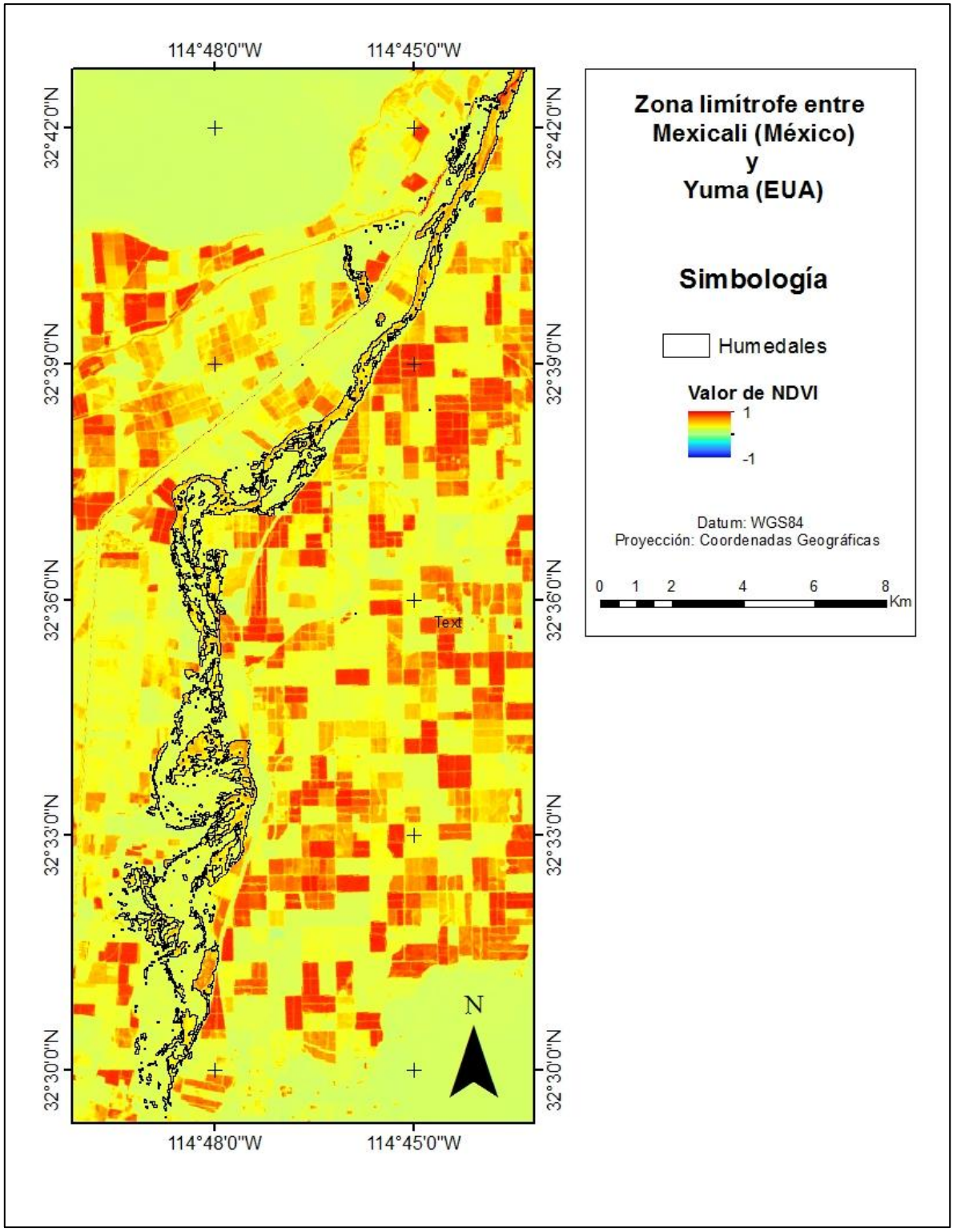


Figura A9.16 . Zona 8: Tramo limítrofe del río Colorado, EUA -México. Imagen de NDVI para el año 2002 . Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a part ir de la imagen de Landsat 5 TM .

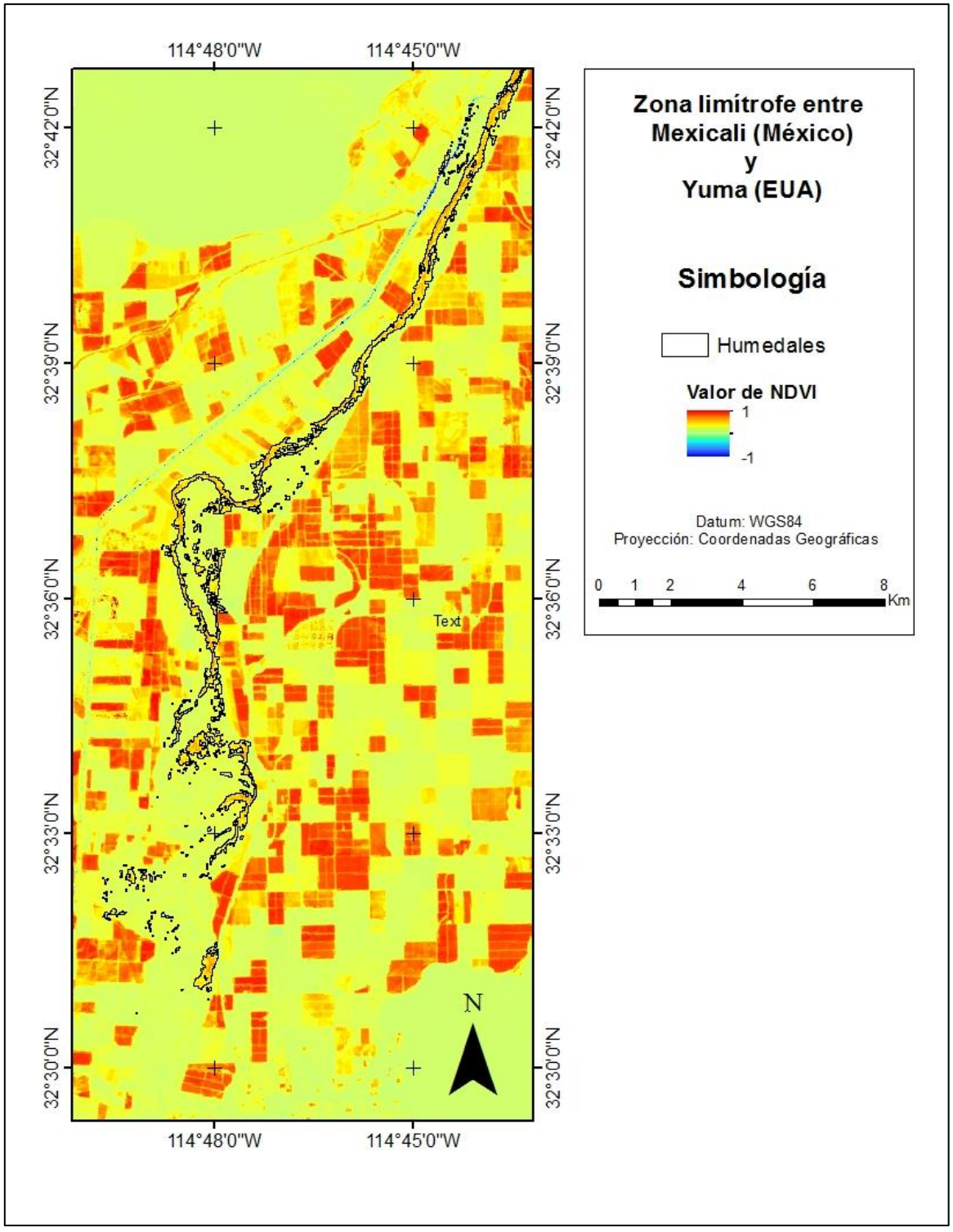


Figura A9.17 . Zona 8: Tramo limítrofe del río Colorado, EUA -México. Imagen de NDVI para el año 2007 . Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a part ir de la ima gen de Landsat 5 TM .

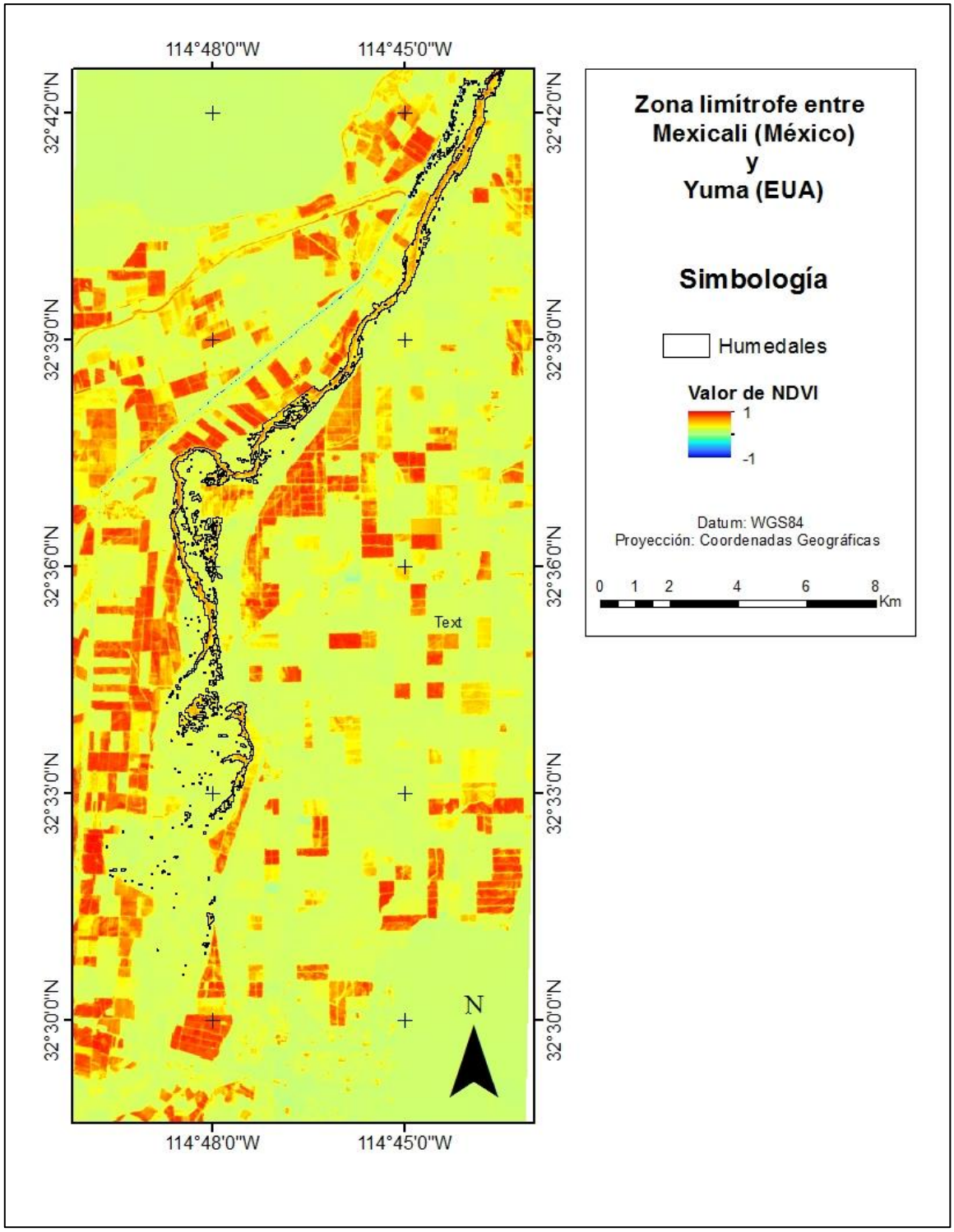


Figura A9.18 . Zona 8: Tramo limítrofe del río Colorado, EUA -México. Imagen de NDVI para el año 2011 . Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a part ir de la imagen de Lands at 5 TM.

ANEXO 10

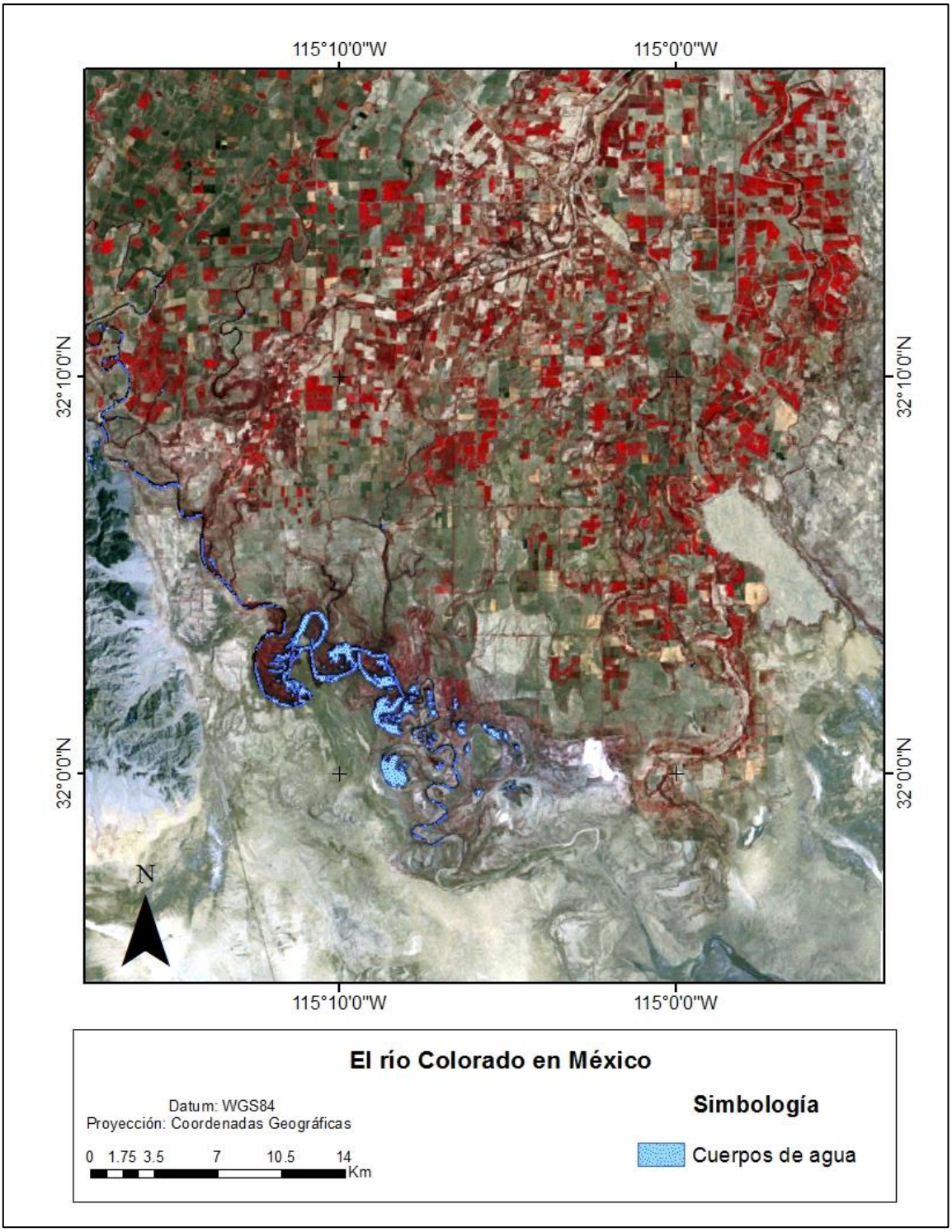


Figura A10.1. Zona 9: Río Colorad o en México. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1972. La imagen en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 1 MSS se está usando como fondo.

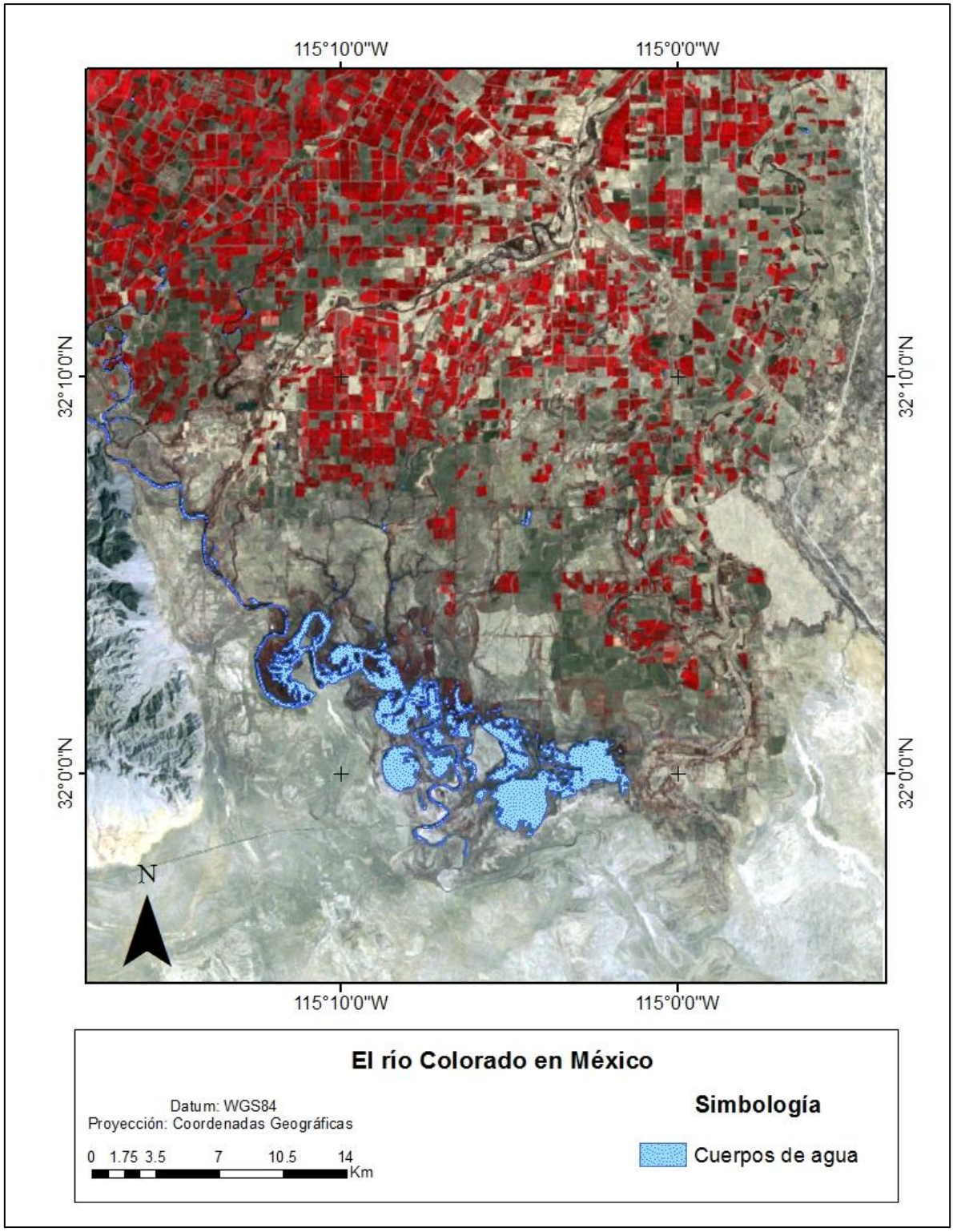


Figura A10.2 . Zona 9: Río Colorado en México. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1977. La imagen en falso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 2 MSS se está usando como fondo.

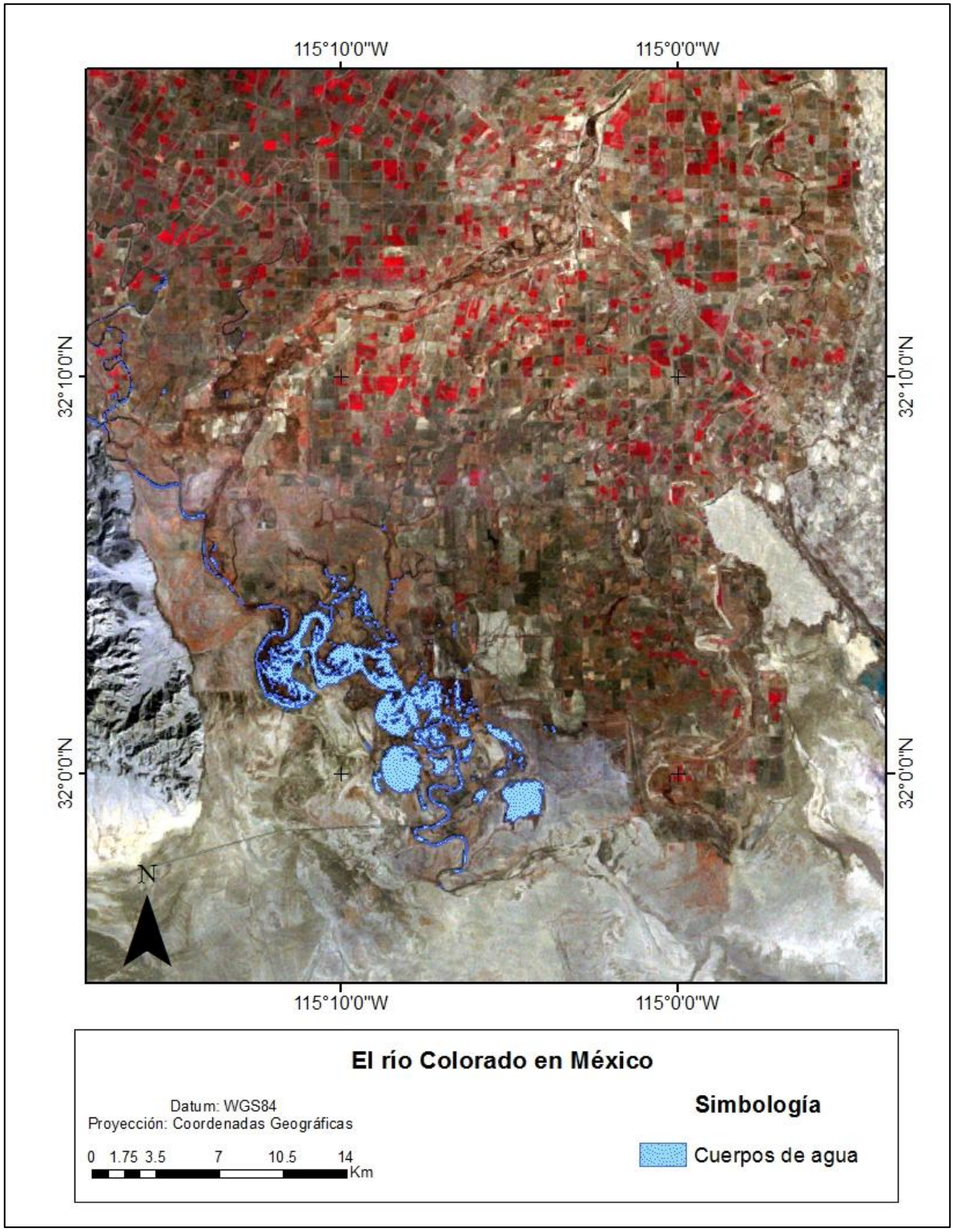


Figura A10.3 . Zona 9: Río Colorad o en México. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 198 2. La imagen en fa lso color infrarrojo RGB 6/5/4 de Landsat 3 MSS se está usando como fondo.

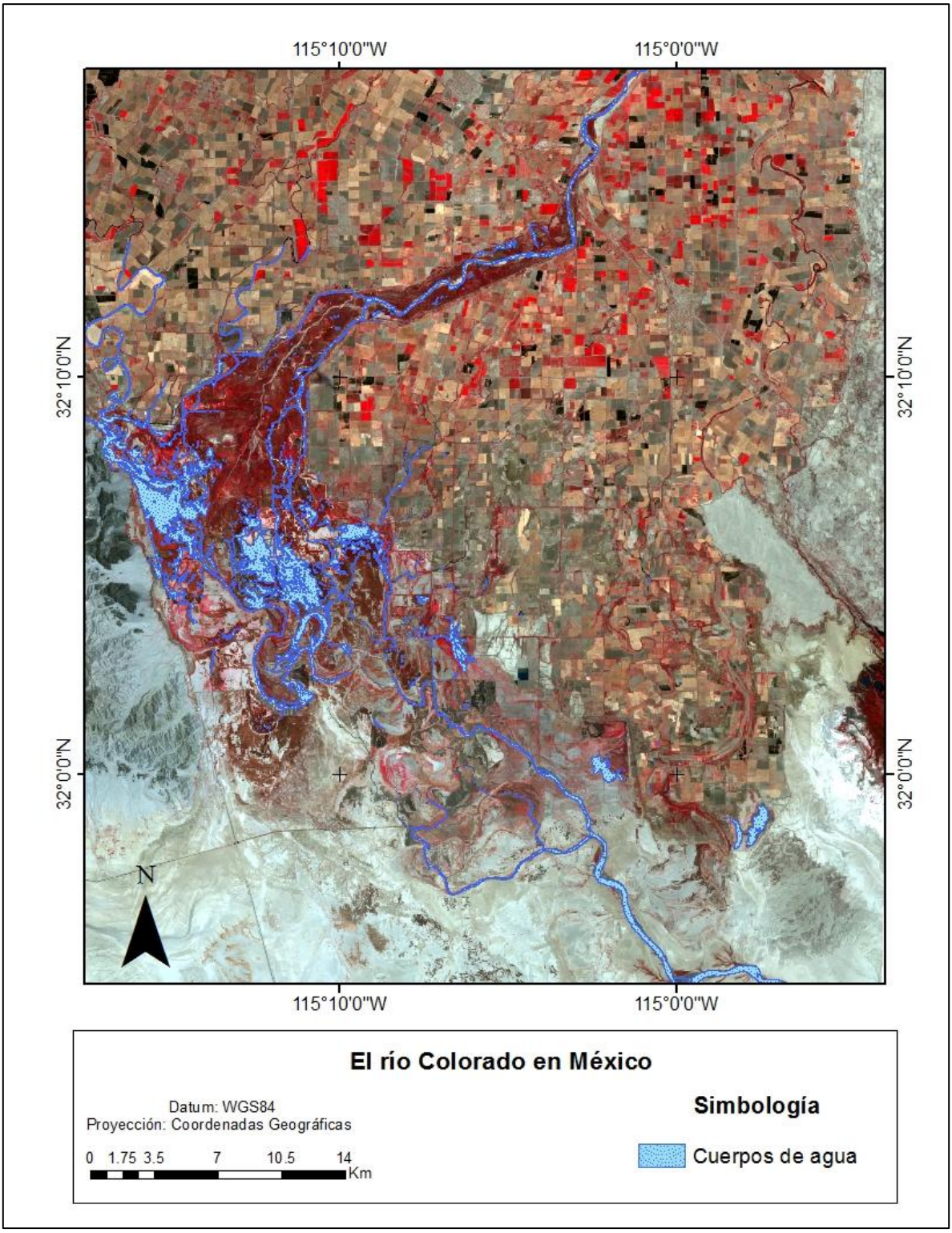


Figura A10.4 . Zona 9: Río Colorad o en México. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1987. La imagen en fa lso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

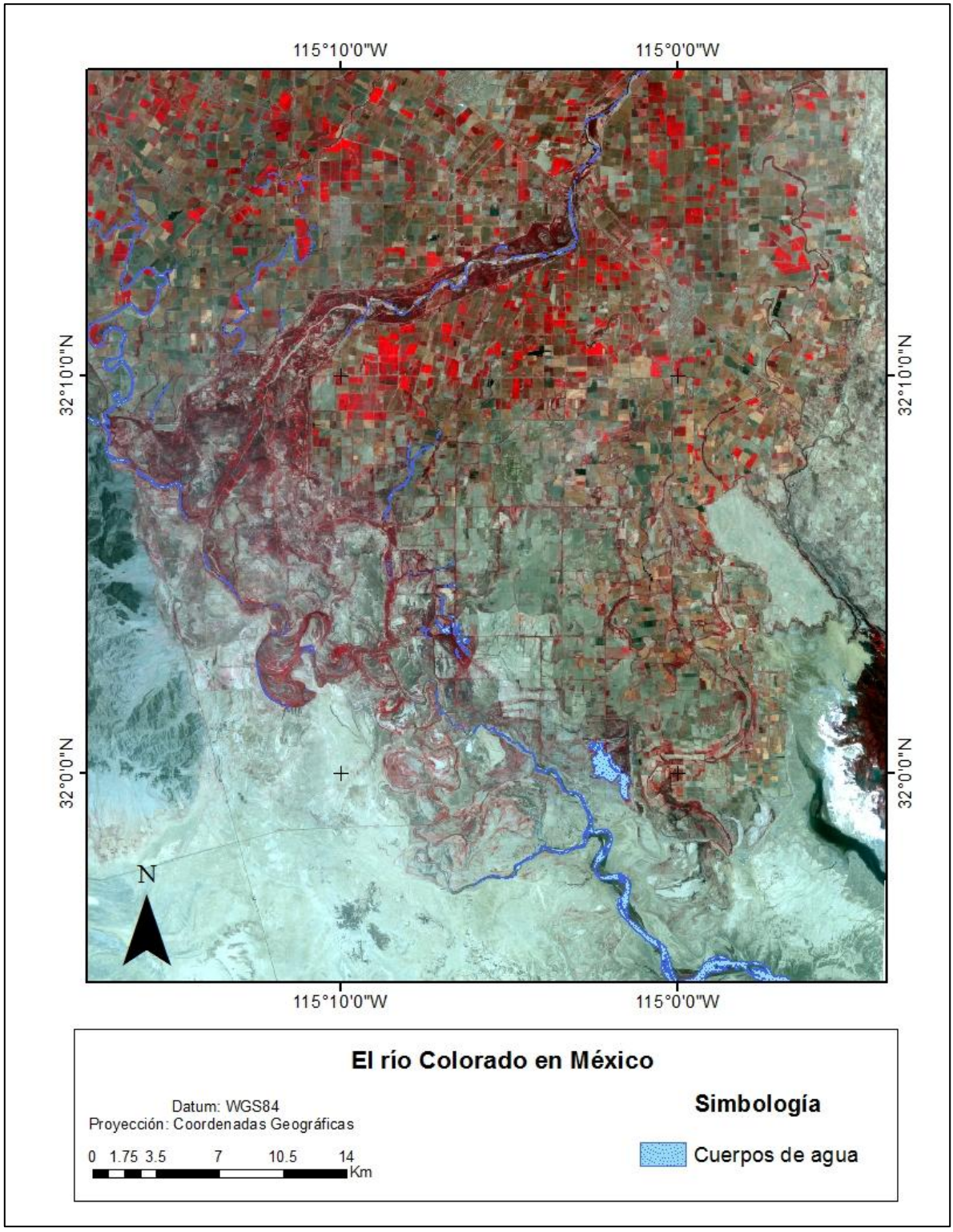


Figura A10.5 . Zona 9: Río Colorad o en México. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1992 . La imagen en fa lso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

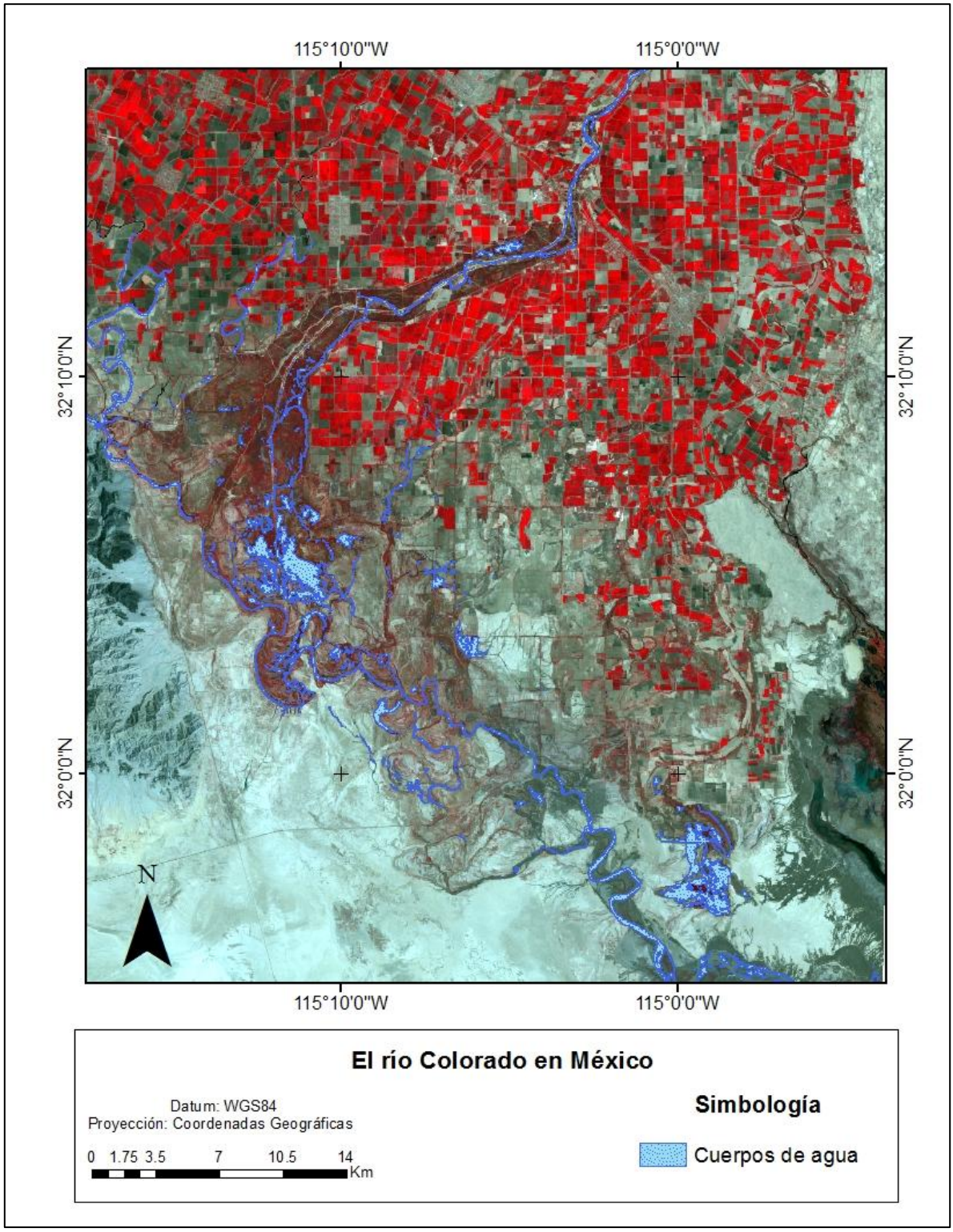


Figura A10.6 . Zona 9: Río Colorad o en México. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 1997 . La imagen en fa lso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se est á usando como fondo.

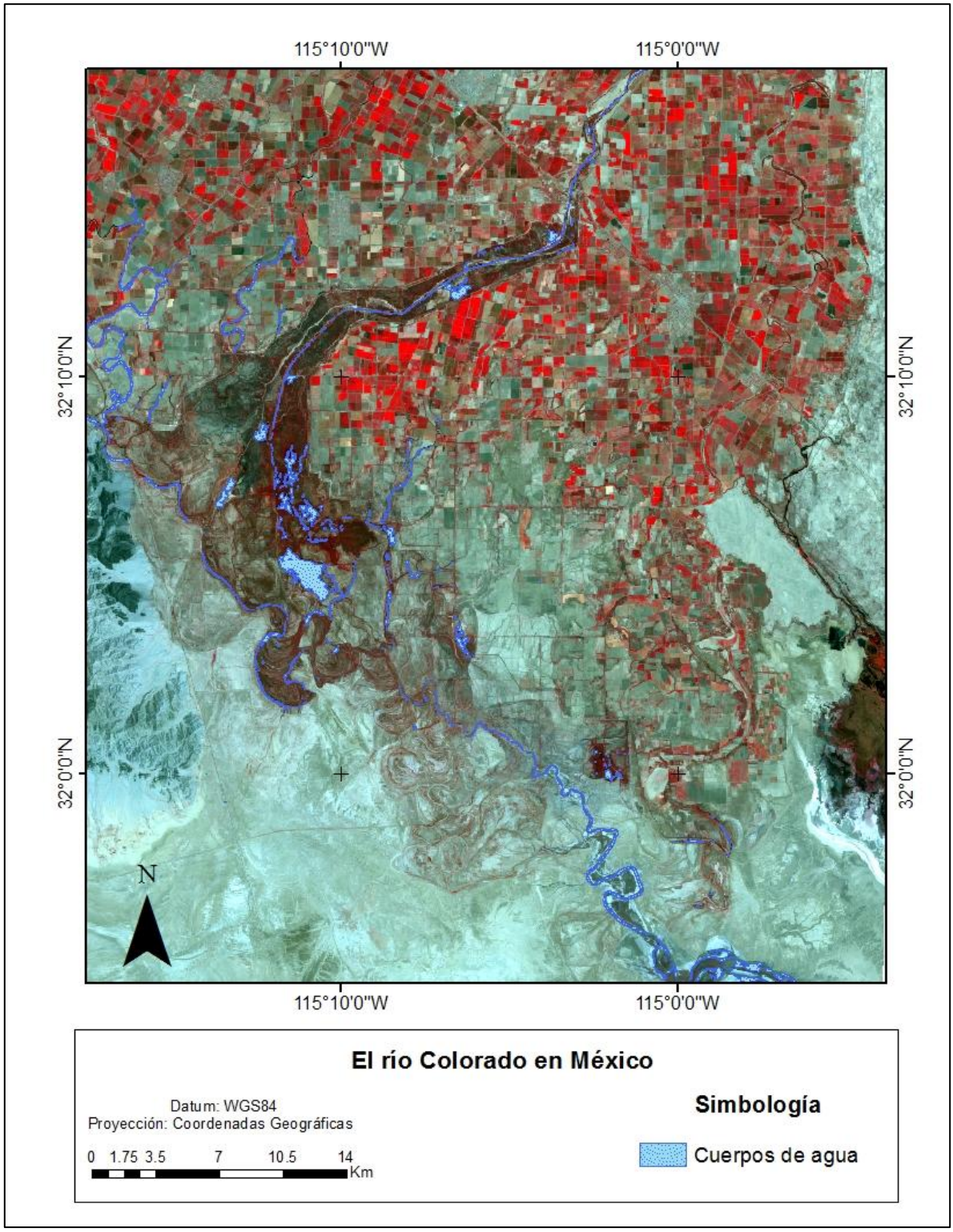


Figura A10.7. Zona 9: Río Colorado en México. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 2002. La imagen en falso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

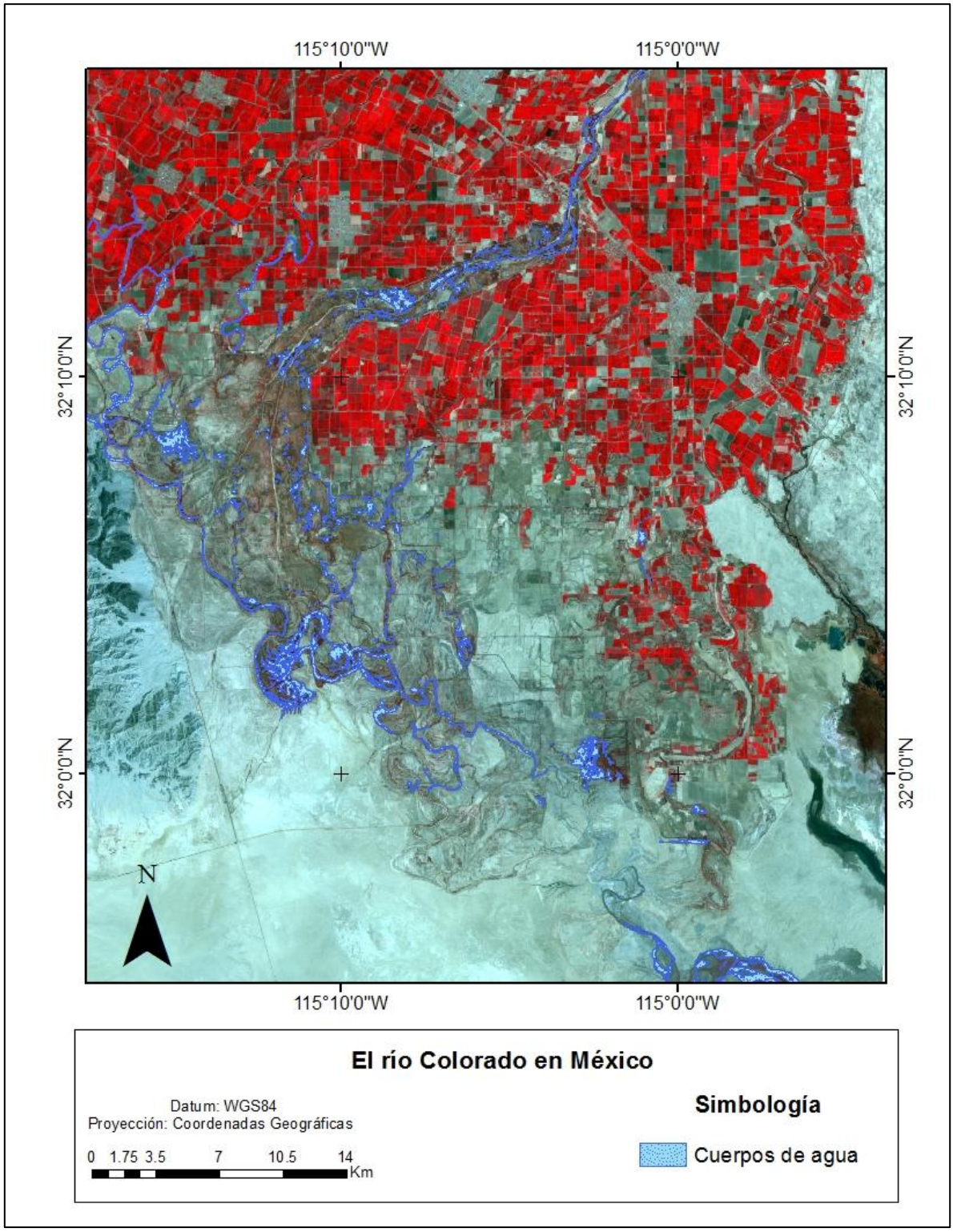


Figura A10.8 . Zona 9: Río Colorad o en México. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 2007 . La imagen en fa lso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

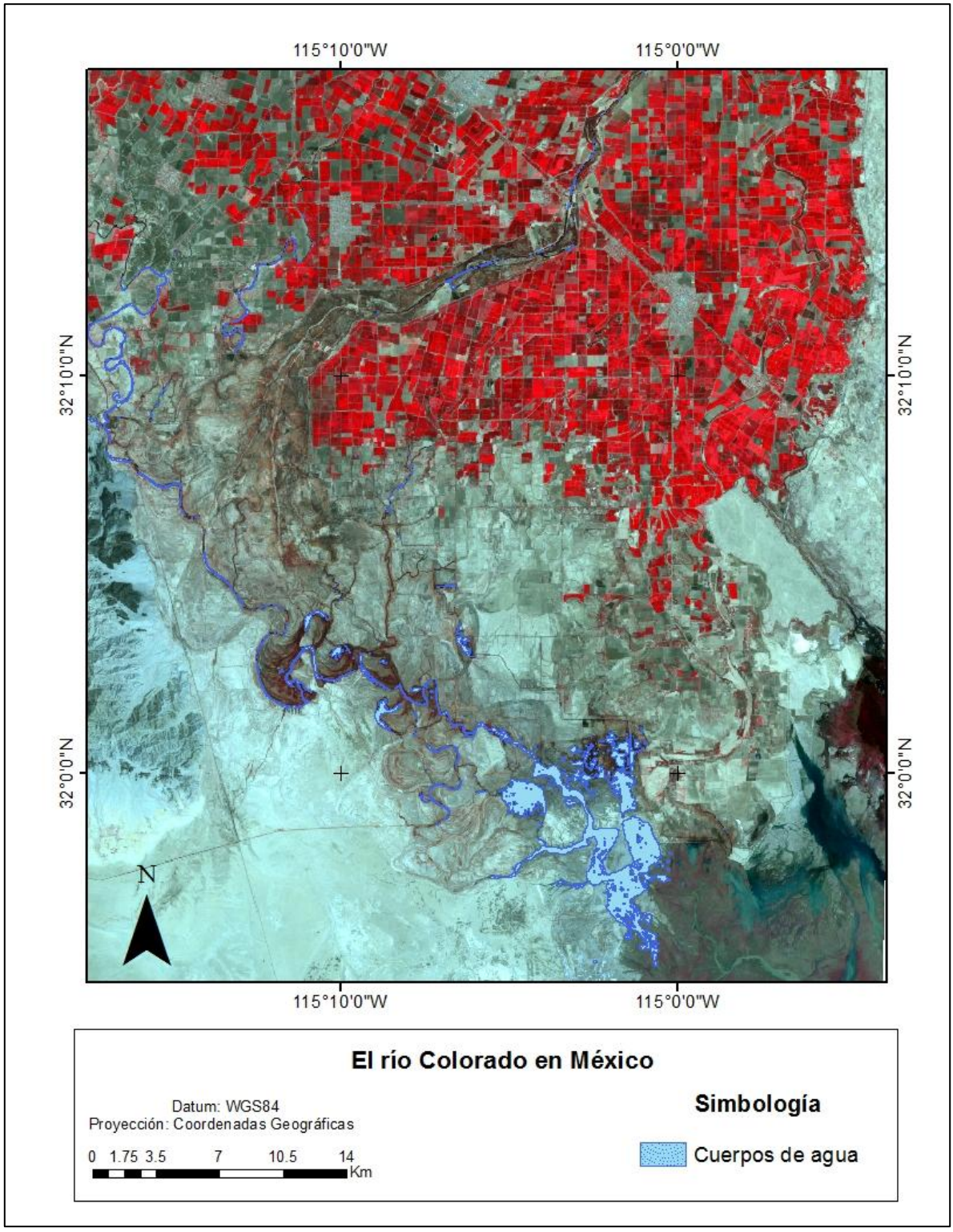


Figura A10.9 . Zona 9: Río Colorad o en México. Resultados de la identificación de los cuerpos de agua para el año 2011 . La imagen en fa lso color infrarrojo RGB 4/3/2 de Landsat 5 TM se está usando como fondo.

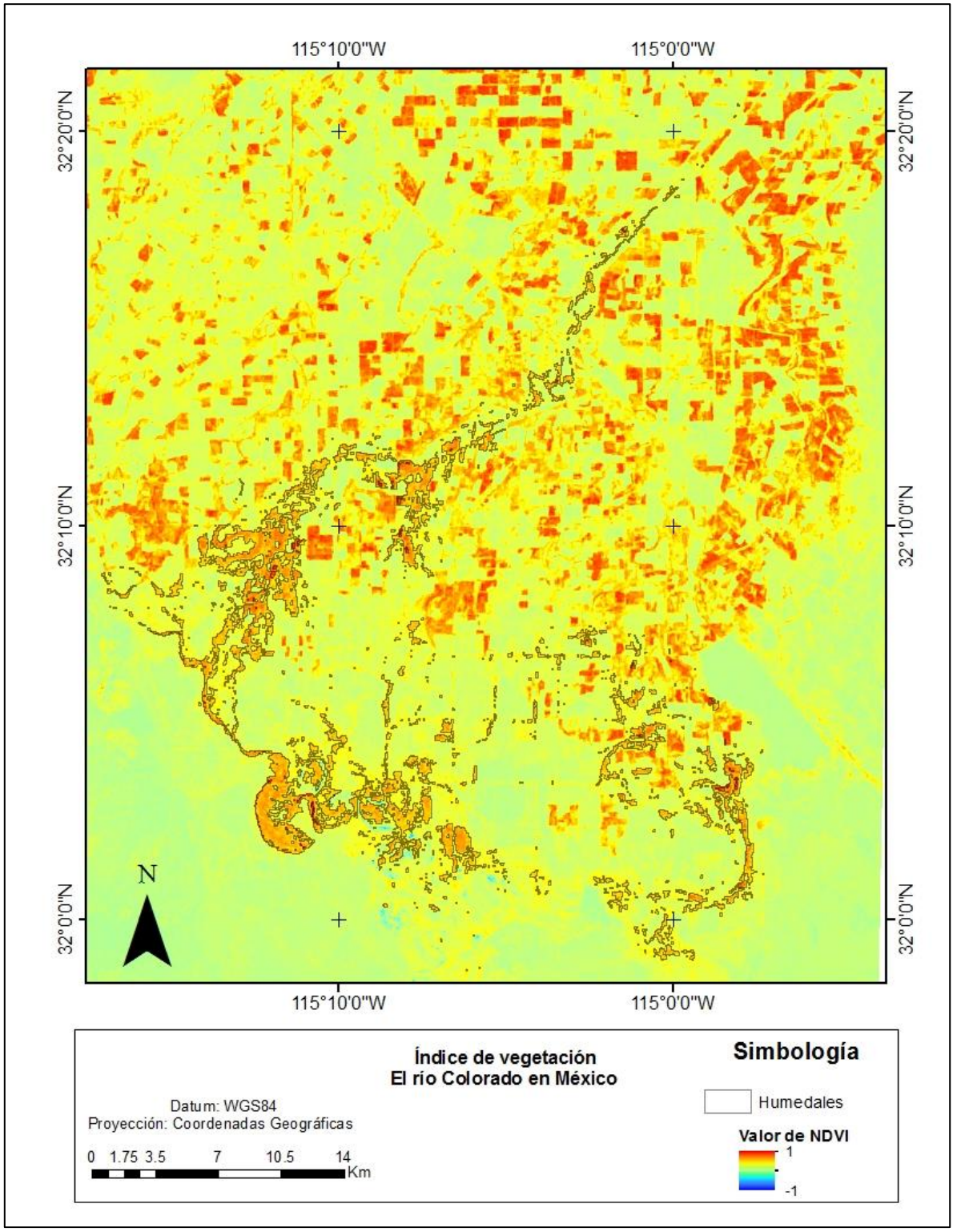


Figura A10.10 . Zona 9: Río Colorad o en México. Imagen de NDVI para el año 1972. Las área s de la cubier ta vegetal de los humedales están vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 1 MSS.

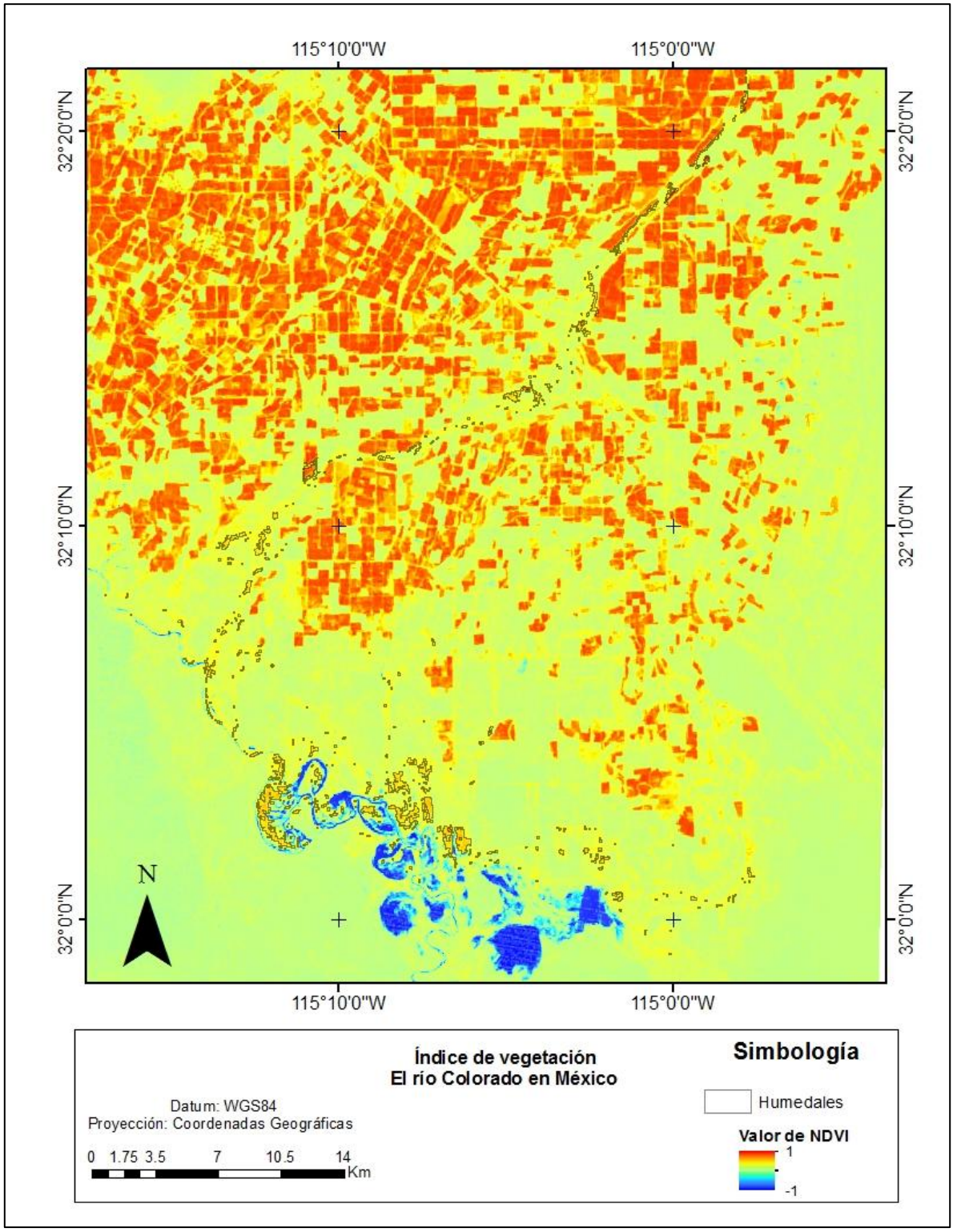


Figura A10.11 . Zona 9: Río Colorad o en México. Imagen de NDVI para el año 1977. Las área s de la cubierta vegetal de los humedales está n vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 2 MSS.

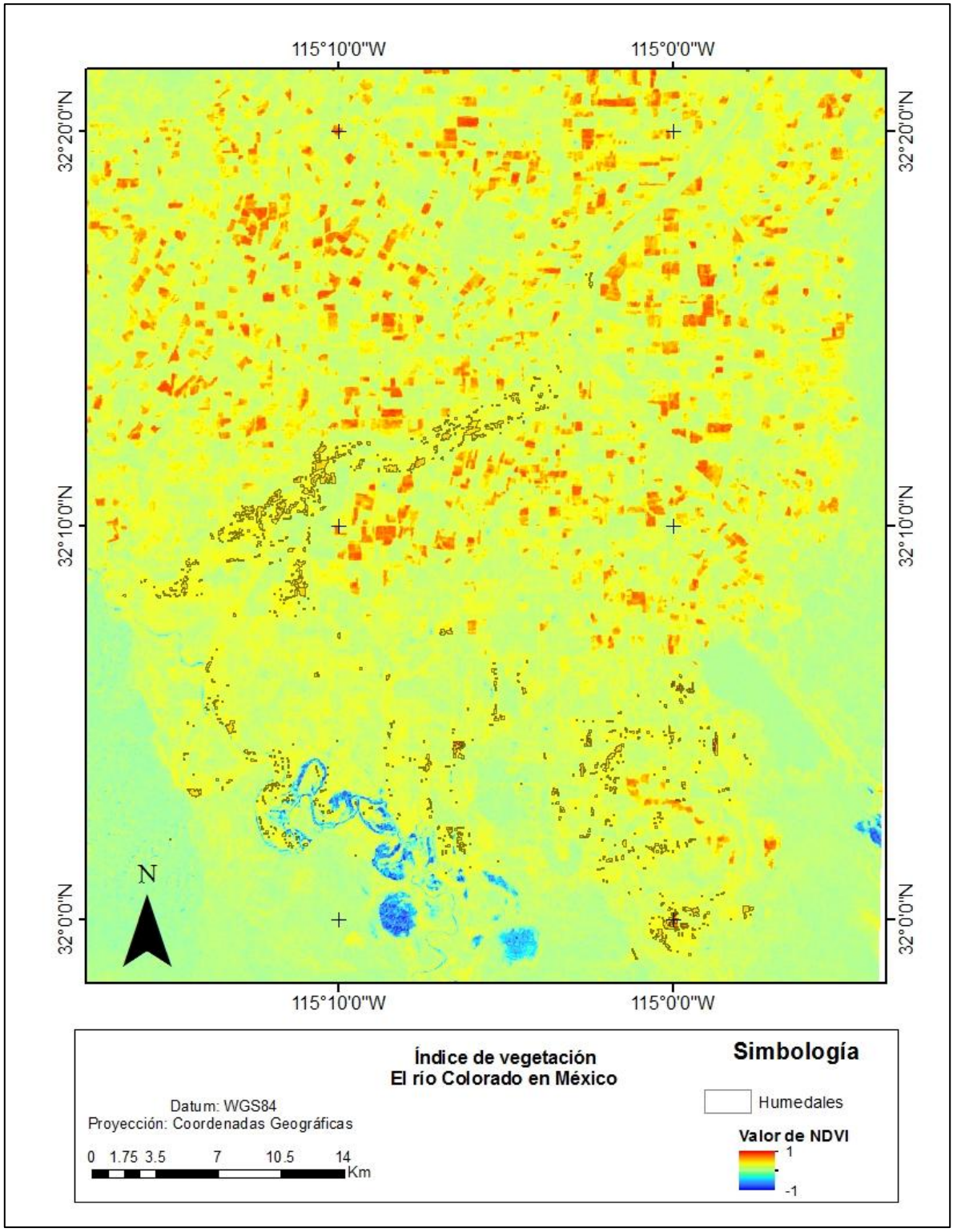


Figura A10.12. Zona 9: Río Colorado en México. Imagen de NDVI para el año 1982. Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 3 MSS.

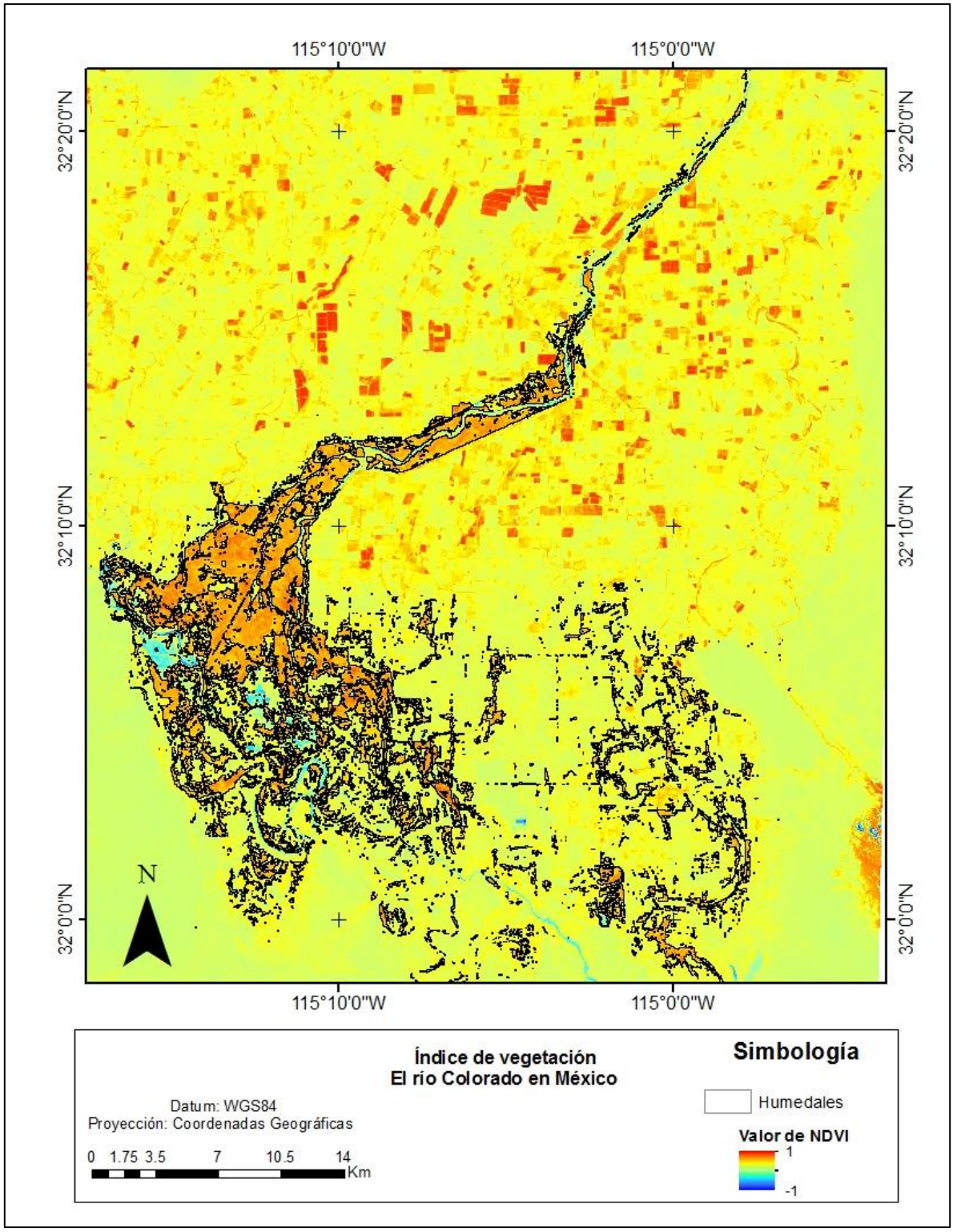


Figura A10.13. Zona 9: Río Colorado en México. Imagen de NDVI para el año 1987. Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 5 TM.

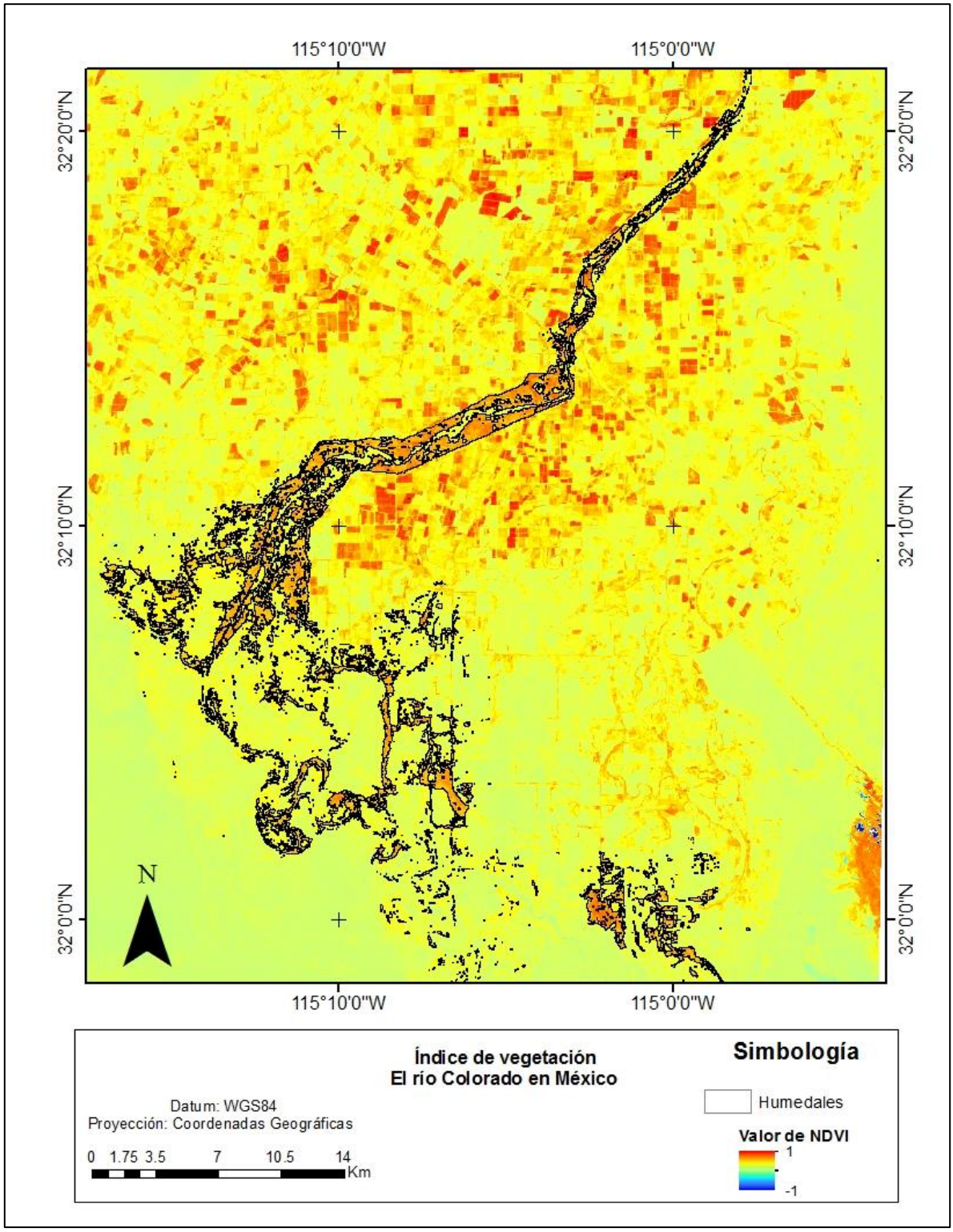


Figura A10.14. Zona 9: Río Colorado en México. Imagen de NDVI para el año 1992. Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 5 TM.

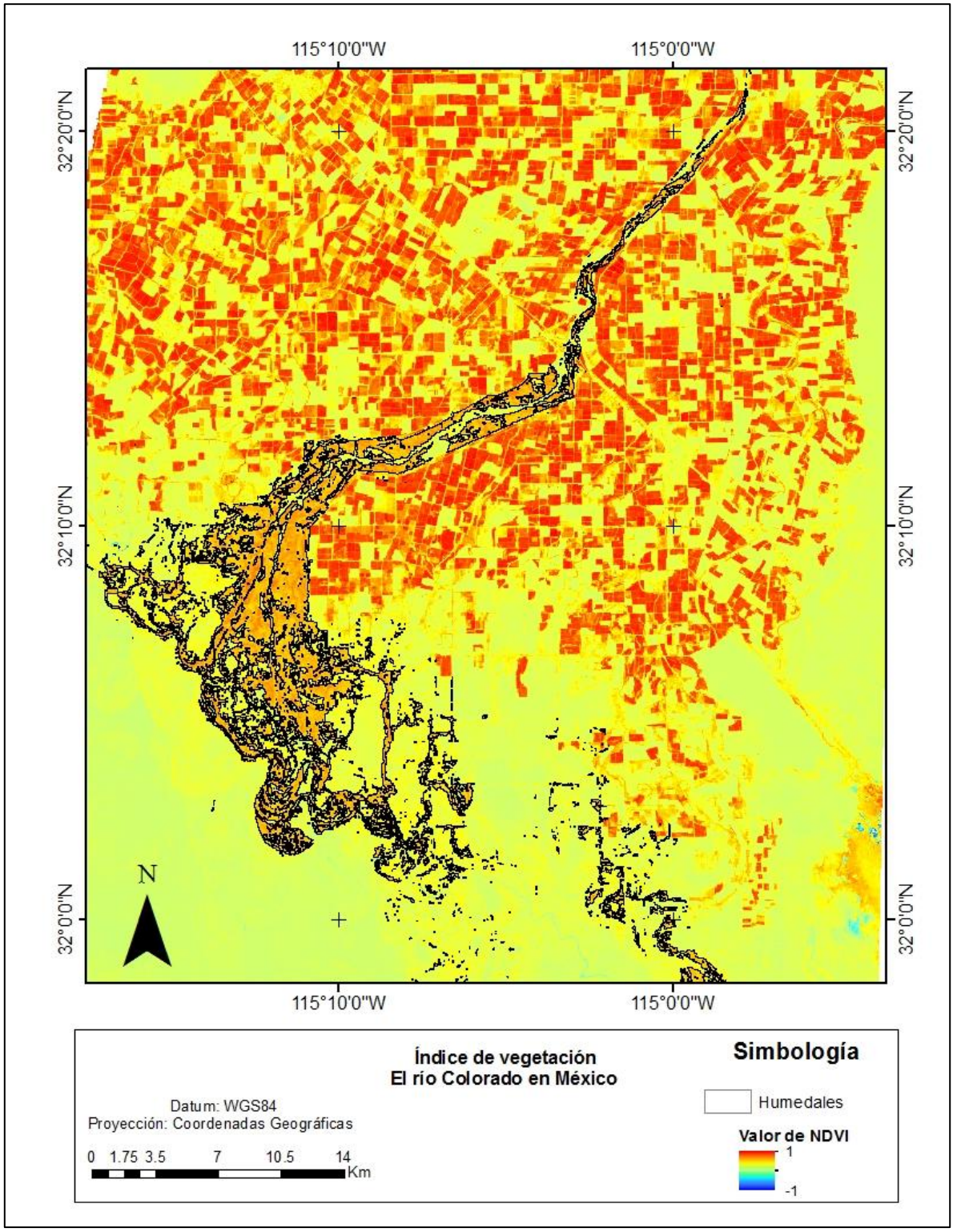


Figura A10.15. Zona 9: Río Colorado en México. Imagen de NDVI para el año 1997. Las áreas de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a partir de la imagen de Landsat 5 TM .

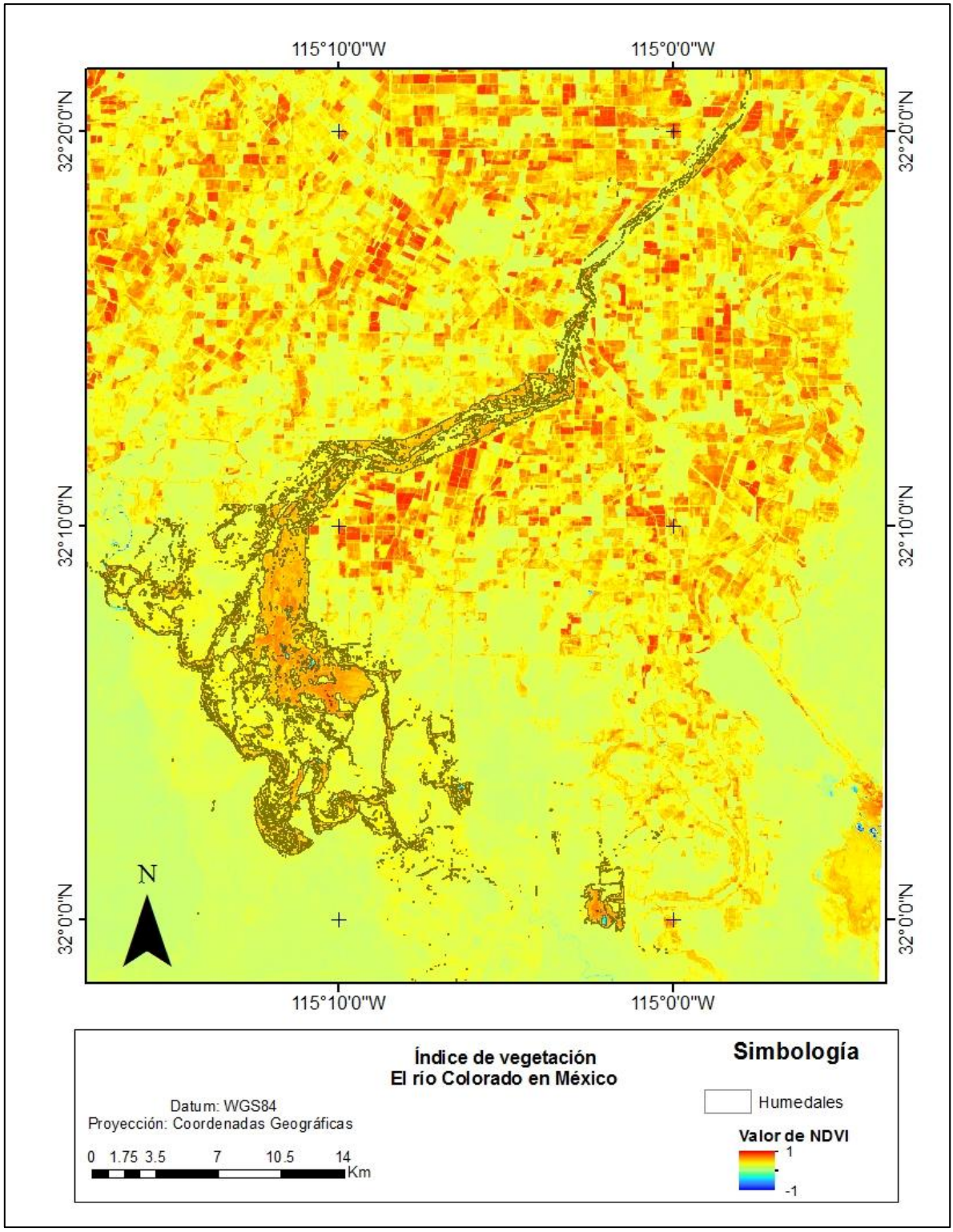


Figura A10.16 . Zona 9: Río Colorad o en México. Imagen de NDVI para el año 2002. Las área s de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a part ir de la imagen de Landsat 5 TM .

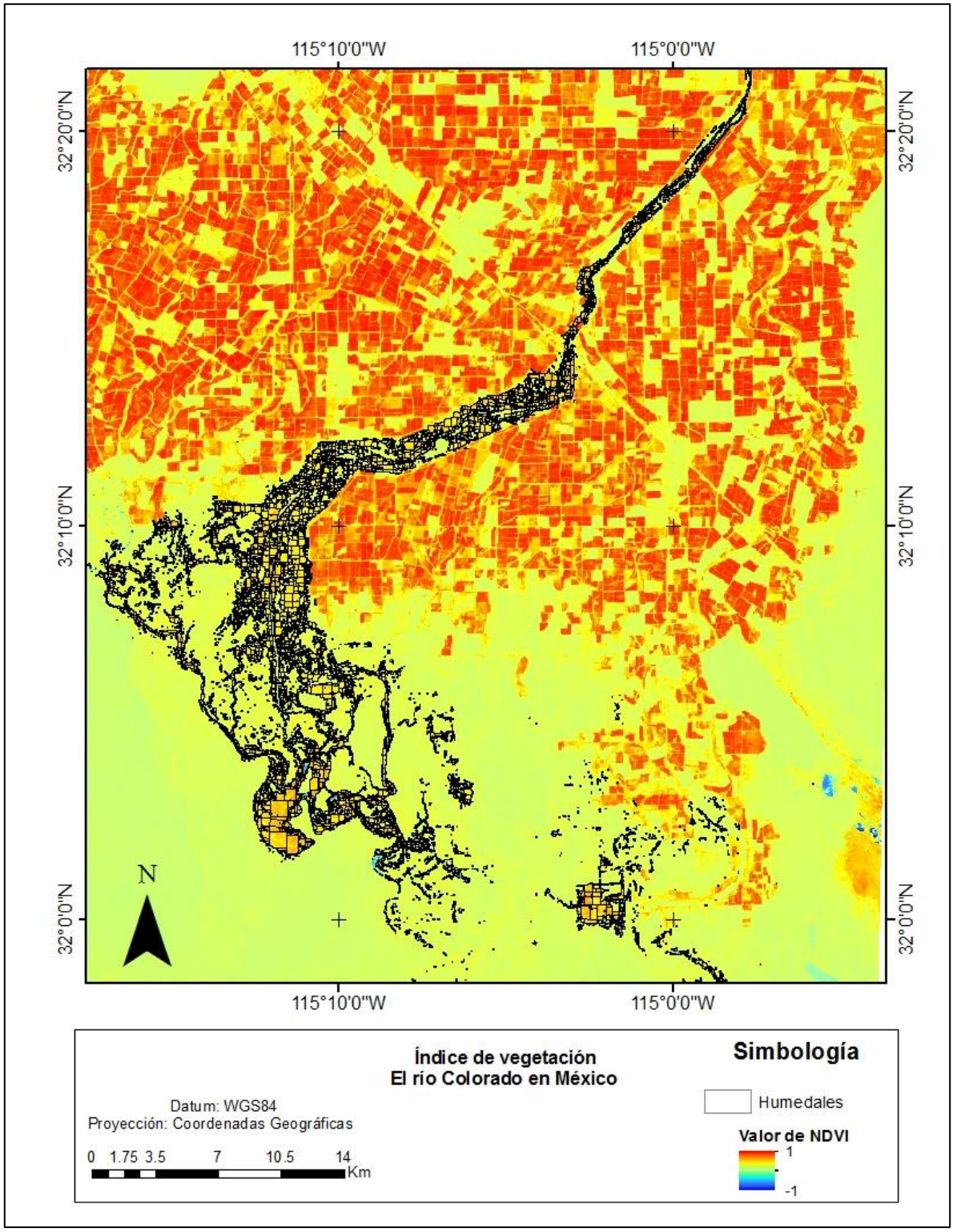


Figura A10.17 . Zona 9: Río Colorad o en México. Imagen de NDVI para el año 2007. Las área s de la cubierta vegetal de los humedales están vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a part ir de la imagen de Landsat 5 TM .

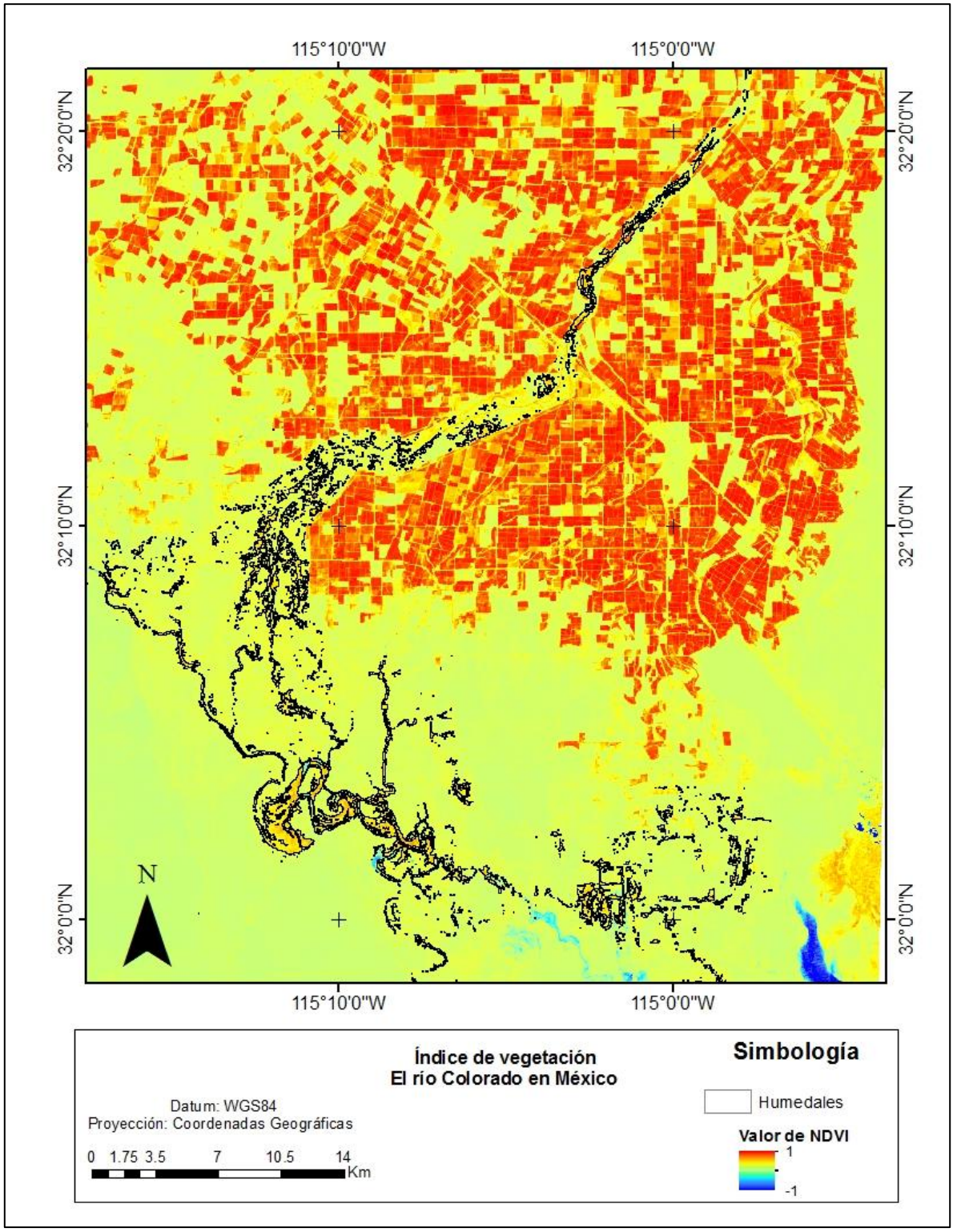
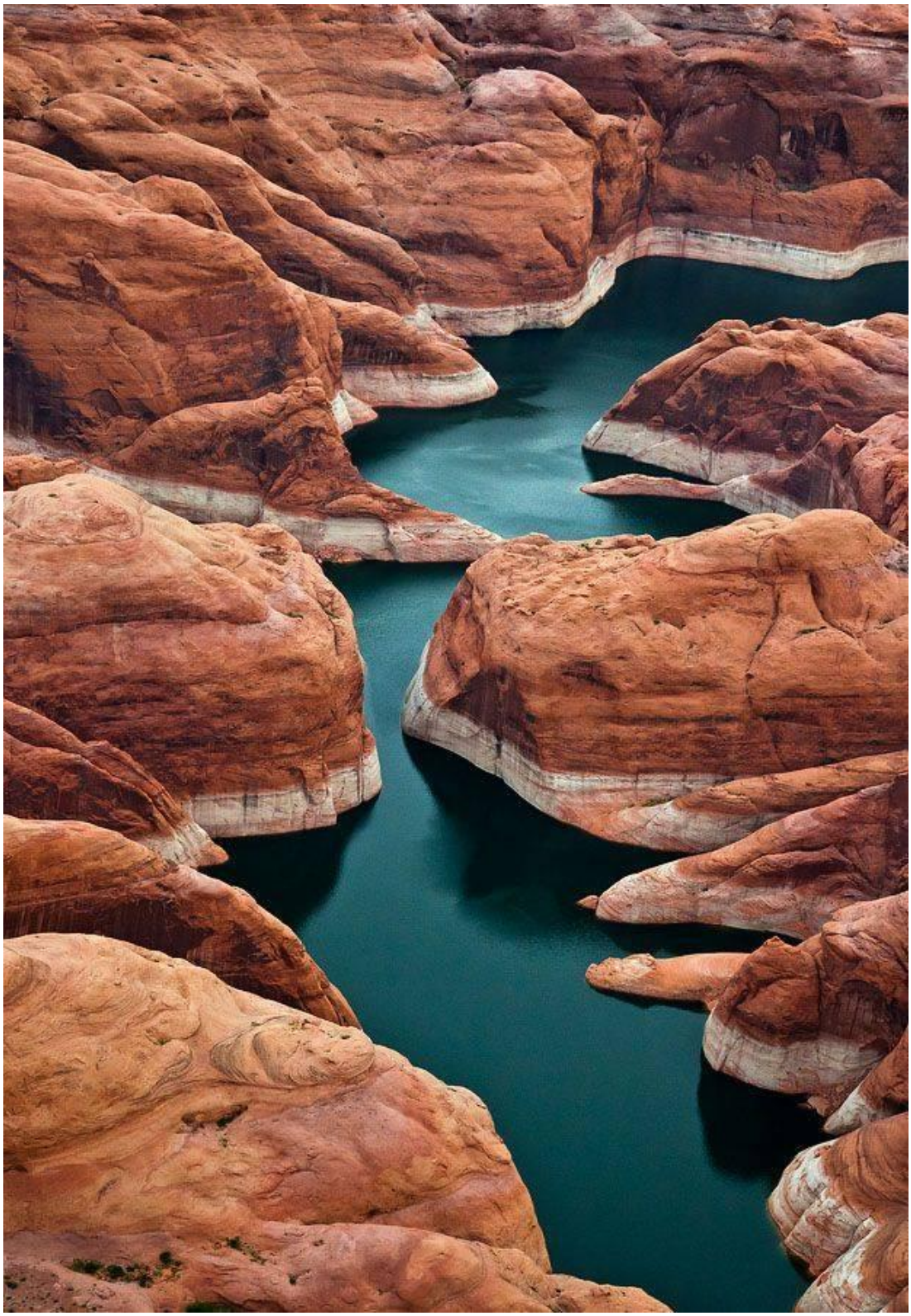
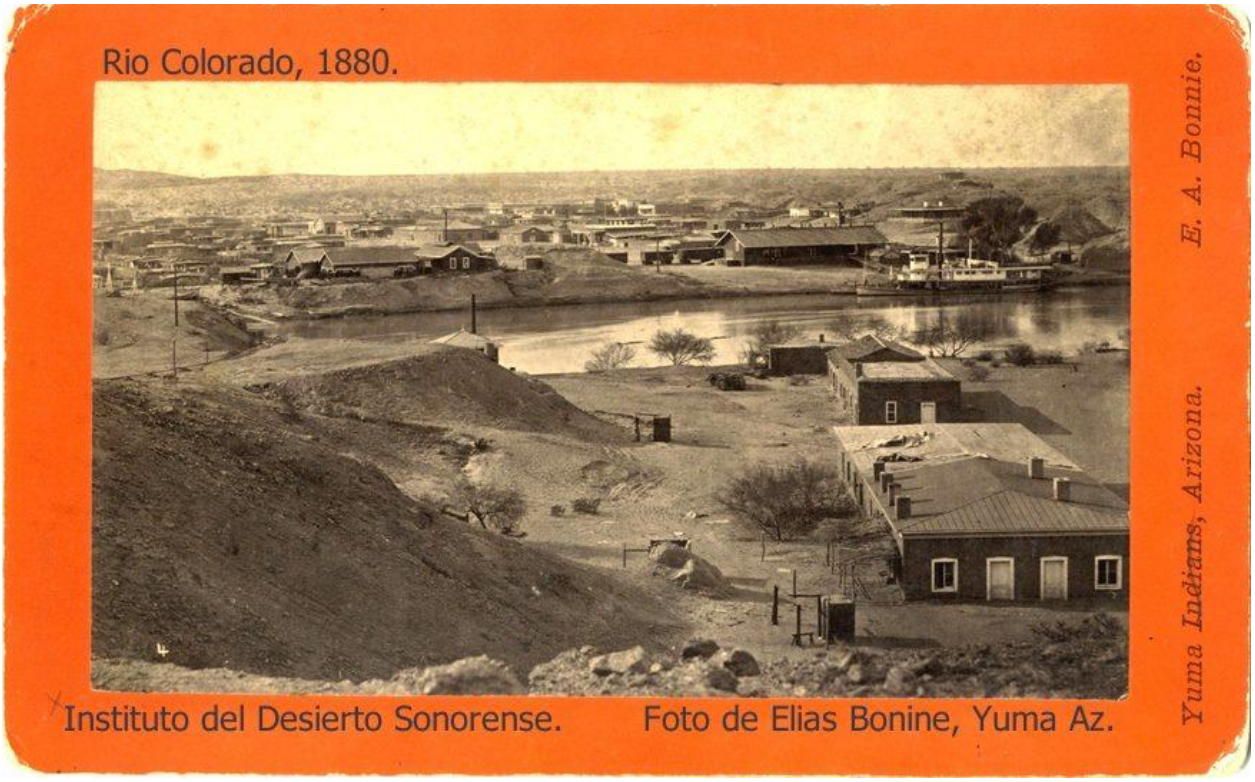


Figura A10.18 . Zona 9: Río Colorad o en México. Imagen de NDVI para el año 2011. Las área s de la cubierta v egetal de los humedales están vectorizadas. El índice de NDVI se calculó a part ir de la imagen de Landsat 5 TM .

ANEXO FOTOGRÁFICO



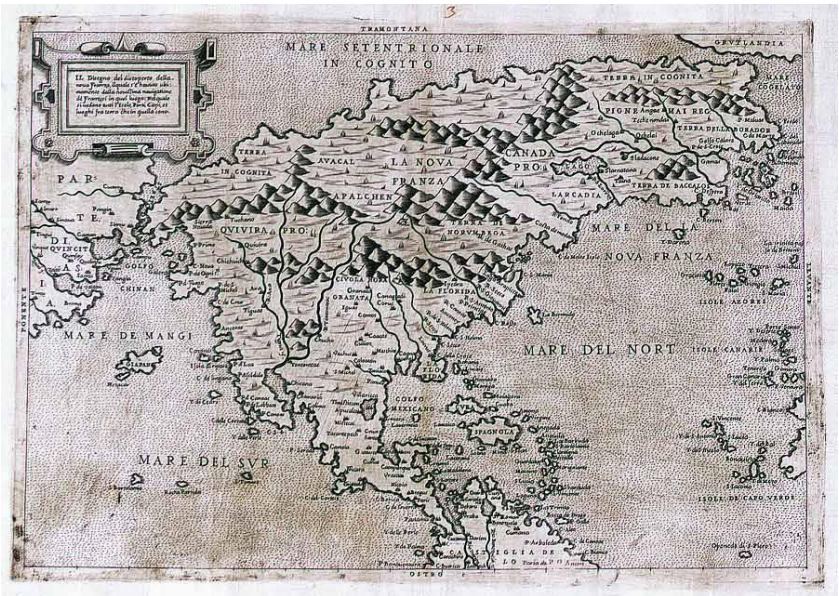
1. Toma de el lago Powell en Arizona que muestra como ha bajado el nivel del agua del Rio Colorado que este lago alberga.



2. Una vista desde la vera occidental del rí o Colorado hacia lo que era el pueblo territorial de Yuma Az . en 1880 mient ras un buque de vapor cruza el río Colorado justo tras la estació n rielera. Foto de Elias Bonine.

3. Río Colorado, Yuma Az 1880. Arc hivo del Estado de Arizona.

4.- A donde va a parar el agua del Rio Colorado?
90% de los cultivos de invierno en EUA son producidos en el área de Yuma y muchos de los cultivos producidos con el cada vez más escaso torrente de agua del río Colorado son exp ortados a lugares como Asia donde no tienen terreno o agua para producir cultivos tales como la alfalfa. En la foto el controversial All American Canal que al ser en cementado por EUA, dejo de filtrar el agua que sostenía el humedal de la Mesa de Andrade e n Baja California, ahora esa agua que se filtraba es llevada a hogares en San Diego. Foto: Cortesía de National Geographic.



5. Mapa de Norteamérica en 1566 donde se aprecia de manera central el gran río Colorado y su desembocadura en el Mar de Cortez. Fo to Wikipedia.

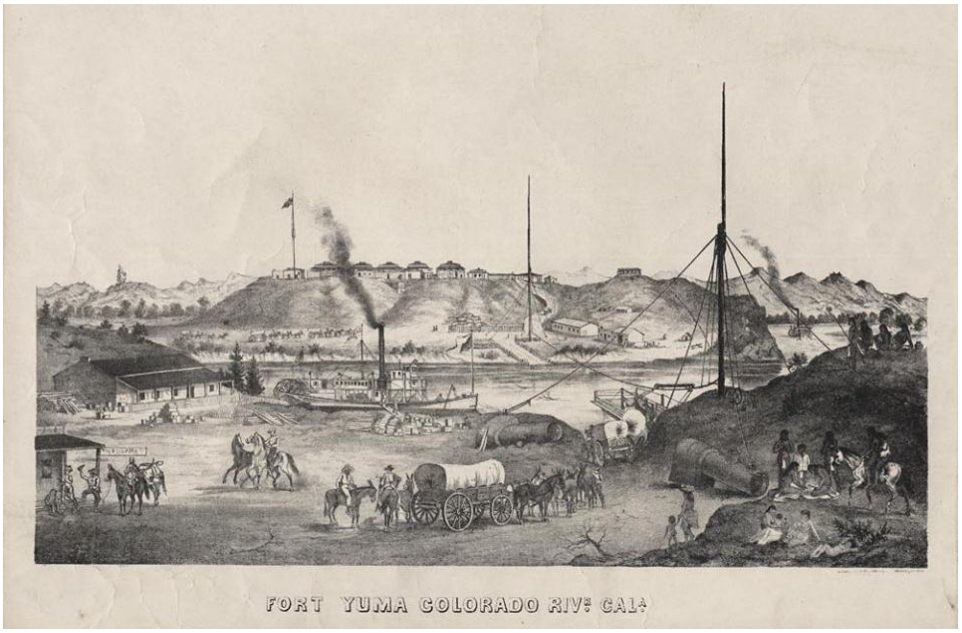
6. En la foto Kevin Moodle que entonces trabajaba en la Universidad de Arizona, mientras fotografía un caparazón completo de tortuga gigante Hesperotestudo encontrado por Richard White en el Golfo de Santa Clara. Este ha sido el único caparazón fosilizado encontrado completo en el Golfo de Santa Clara en la zona deltaica del río Colorado en pleno Desierto Sonorense.

7**. El tren "El Chinero" o, como se le puso después de la guerra: "El Pachuco",** que en realidad fue el Ferrocarril Inter -California que unía a San Diego con Phoenix, que en 1904 empezó a construir la compañía Ferrocarril del Pacífico Sur. Pero apenas una año después, en 1905 se tuvo que suspender el tendido de vías por la inundación provocada por la creciente del río Colorado. Aun se encuentra el bordo de la vía donde pasaba el ferrocarril Intercalifornias que circuló por el valle de Mexicali y el Valle Imperial desde 1909 hasta 1959, este ferrocarril transportaba productos agrícolas, maquinaria ,víveres y personas, a él se le debe gran parte del desarrollo de Mexicali y su valle.

8. Aldo Leopoldo una ve z remó en su canoa a través de "cientos de lagunas verdes" con abundante vida, ahora es una vasta planicie lodosa y vacía.

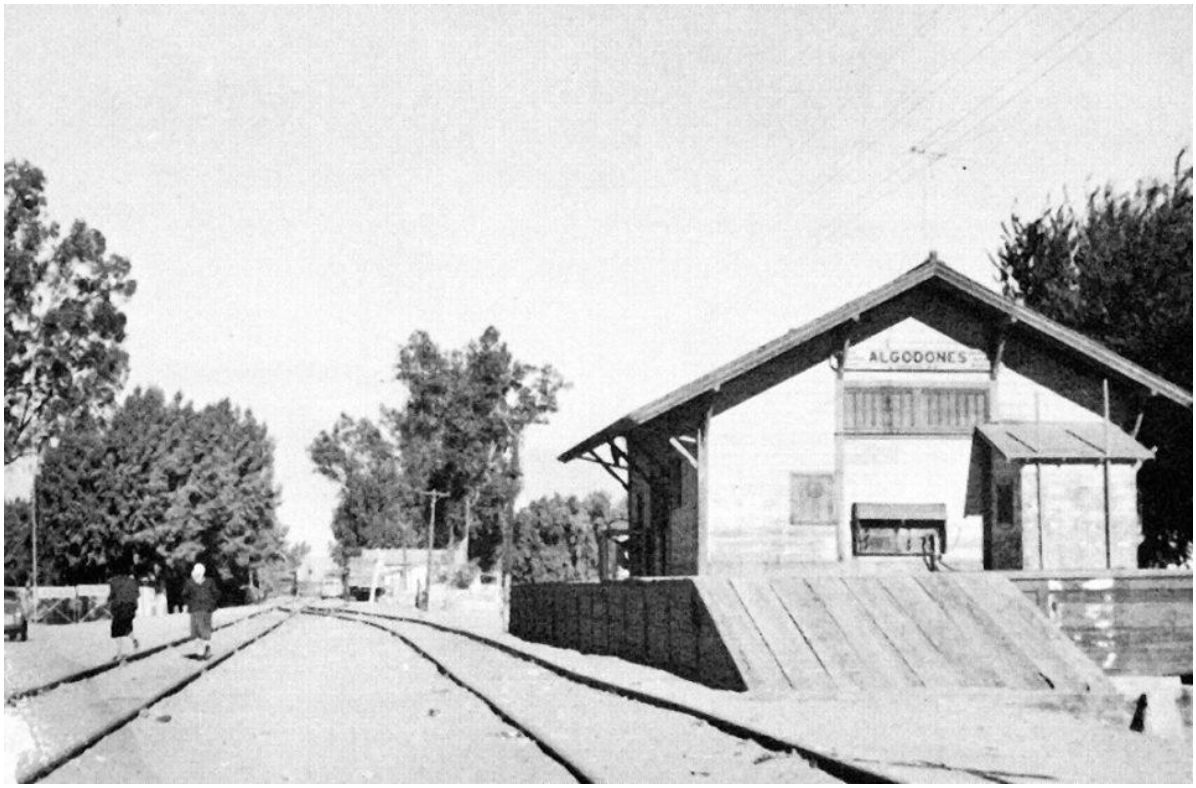
9. En 1906 uno de los últimos grandes y arrasadore s desbordes del río Colorado, así quedaron las vías del tren.

10 Las Arenitas sitio de restauración del Delta del Rio Colorado y futuro parque recreativo en Baja California, con actividades varias de exploración y avistamiento de aves.



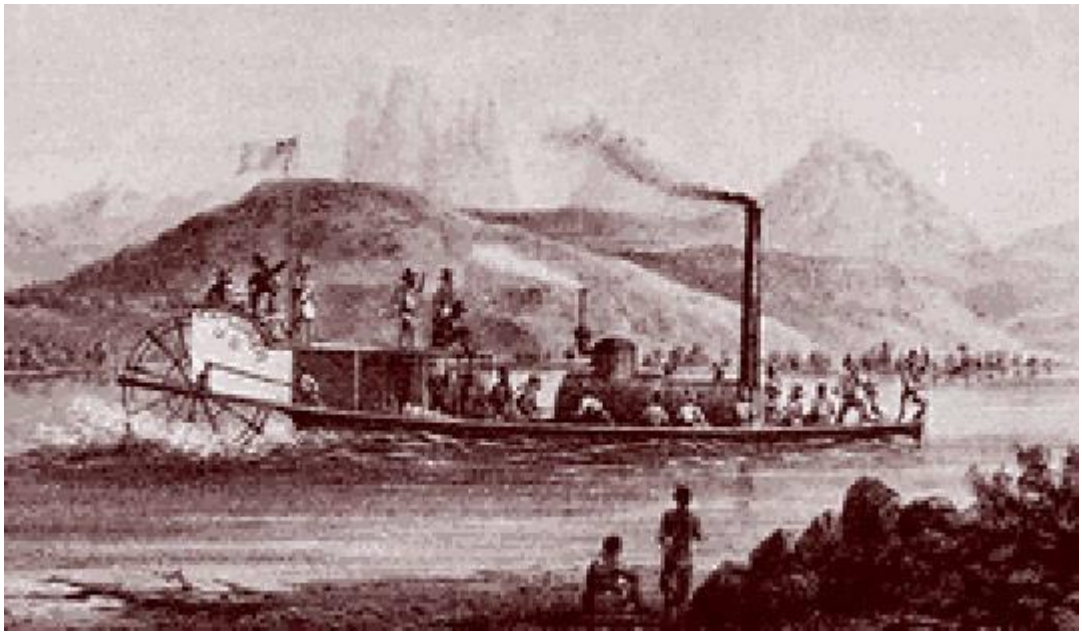
11. El Fuerte Y uma (Yuma Fort) era una base militar del siglo XIX en California frente al cruce de Yuma entre California y lo que era entonces el territorio de Nuevo México (hoy Arizona). Aunque inicialmente se encontraba más al sur donde confluían el río Gila y el río C olorado para defenderse en contra de México, después fue trasladado a una parte más alta. Su operación fue varias veces abandonada debido a los altos costos de trasladar provisiones desde San Diego ya que entonces la ruta era en barco rodeando la península de Baja California y entrando por el Delta del río Colorado río arriba. Fue eventualmente cerrado y ahora queda dentro de la reserva de la etnia de los Quechan. La ilustración corresponde a 1875 (http://bit.ly/MKqXT8).

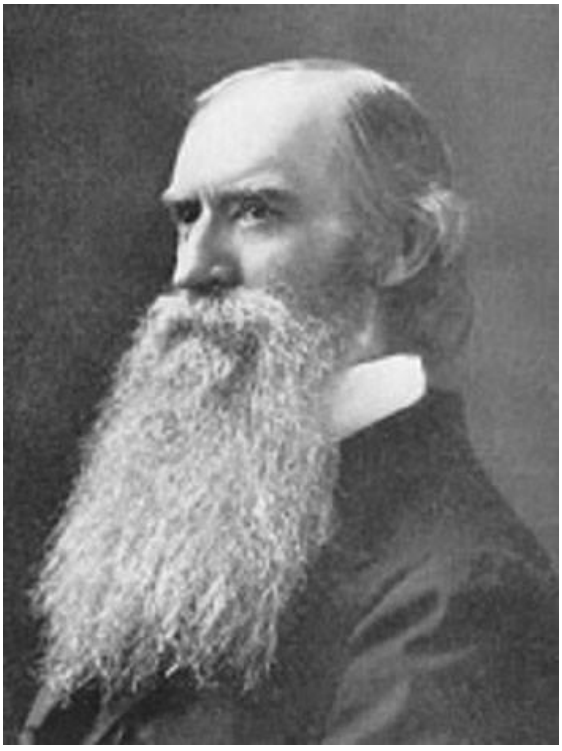
12. La planta desaladora de agua de Yuma que costó más de $250 millones hace mas de 20 años y que ha sido raramente utilizada, empezara pronto a enviar agua tratada del río Colorado a México para enfrentar la dura sequia que afectara a millones de persona s en el sureste de USA y noroeste de México antes del 2016. De esa manera humedales del Delta como la Ciénaga de Santa Clara contaran con el agua necesaria para sus ecosistemas. Esa agua proveniente de los sembradíos de lechuga, llegara hasta el humedal de Santa Clara para sostener los ecosistemas y les ayudara en USA a mantener el nivel de los Lagos Mead y Powell. La operación de esta planta cuesta millones de dólares en impuestos a los norteamericanos y es una de las muchas pequeñas medidas que se tomaran para enfrentar la inminente crisis de falta de agua.



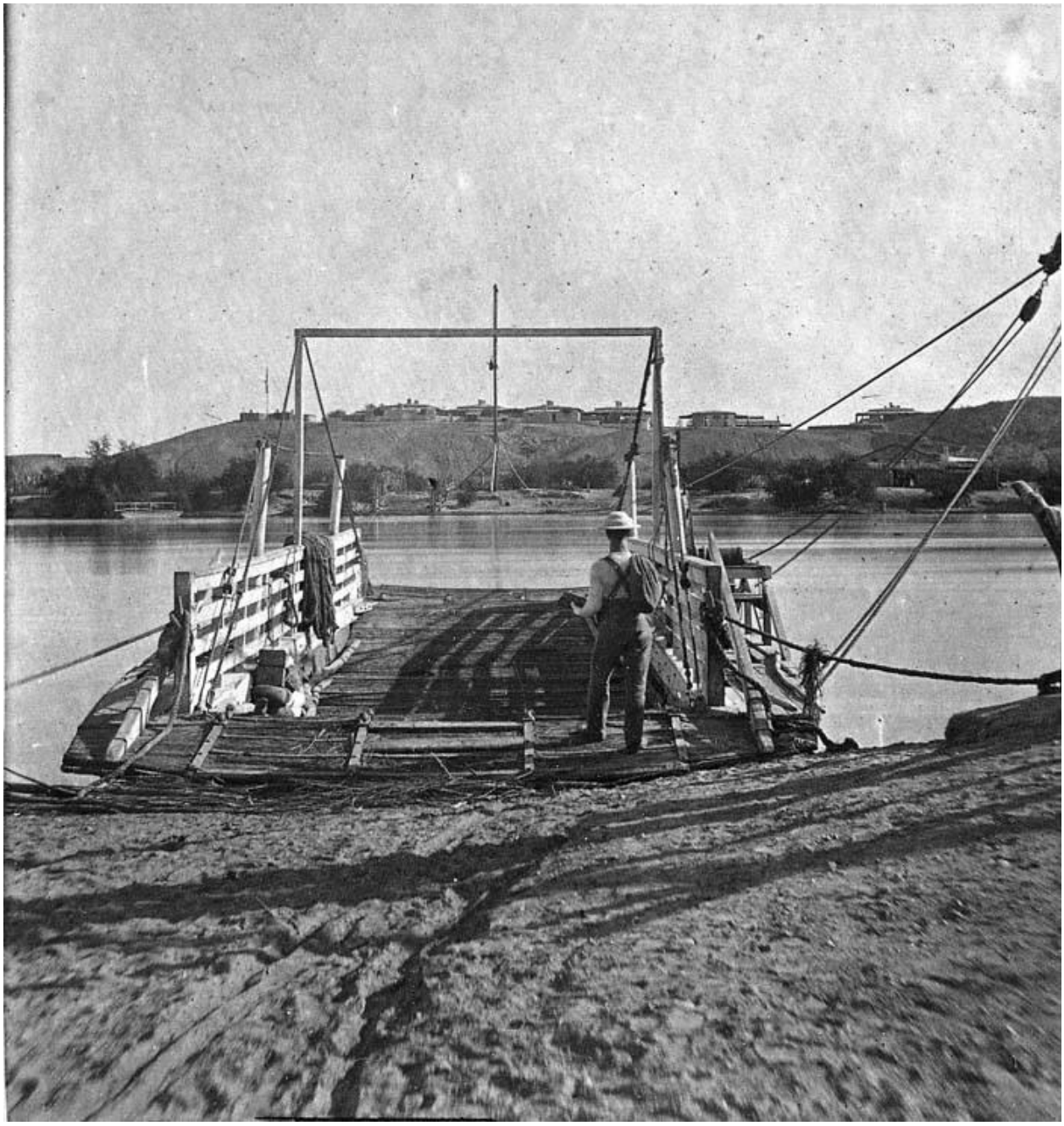
13. Algodones puede ser el primer poblado fundado en el Valle de Mexicali: 17 de Julio de 1894. Estación Los Algodones, a 83 km de Mexicali.

14. El agua del río Colorado es la sobrevivencia del pue blo Cucapa. Doña Hilda. http://www.youtube.com/watch?v=9SnvAf905R8.





15. El Sr John Strong Newberry, un médico y científico que fue de los primeros en explorar el río Colorado y el Gran Cañón. Se i ntegro a la expedición Ives que habiendo desmantelado un buque de vapor, lo embarcaron desde New York navegando hasta el extremo de Suramérica y subiendo por el Pacifico hasta el Golfo de California de donde continuaron río arriba en 1857. Newberry fue de los primeros en dibujar y detallar la geología del Gran Cañón, parte de la expedición se hizo a pie cuando el bote de vapor ya no podía continuar.



16. Un ferry en el cauce del río Colorado que se utilizo en 1880 para cruzar hacia Fort Yuma.

17. Un acercamiento a un barco de vapor que navegaba en 1910 por el río Colorado. Sharlot Hall Museum.

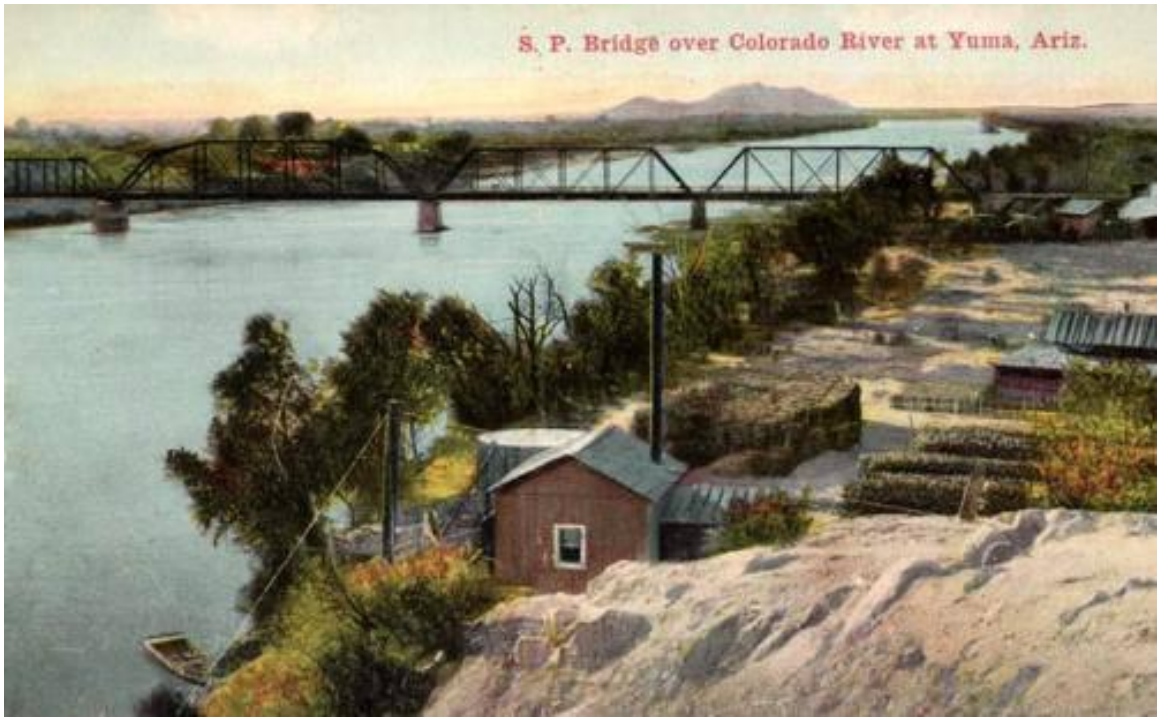
18. Río Colorado: El Cocopah en Yuma 1860. Sharlot Hall Museum .

19. El Searchlight. Río Colorado, Yuma 1910. Sheldon Museum .

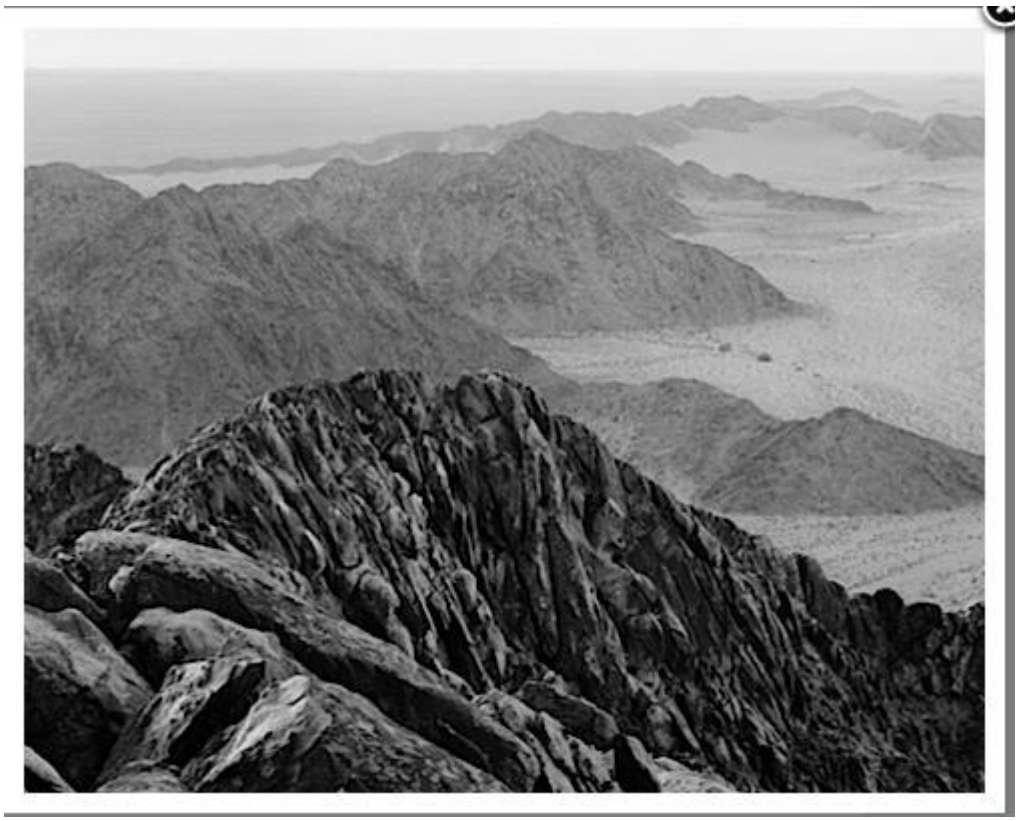
20. Río Colorado. Rancho Bihlers , Sonora.

21. En el río Colorado, Yuma Az 1980.

22. Buque de Vapor cruzando el rí o Colorado en Yuma Az 1910.



23. Puente sobre el rí o Colorado en Yuma, 1940.

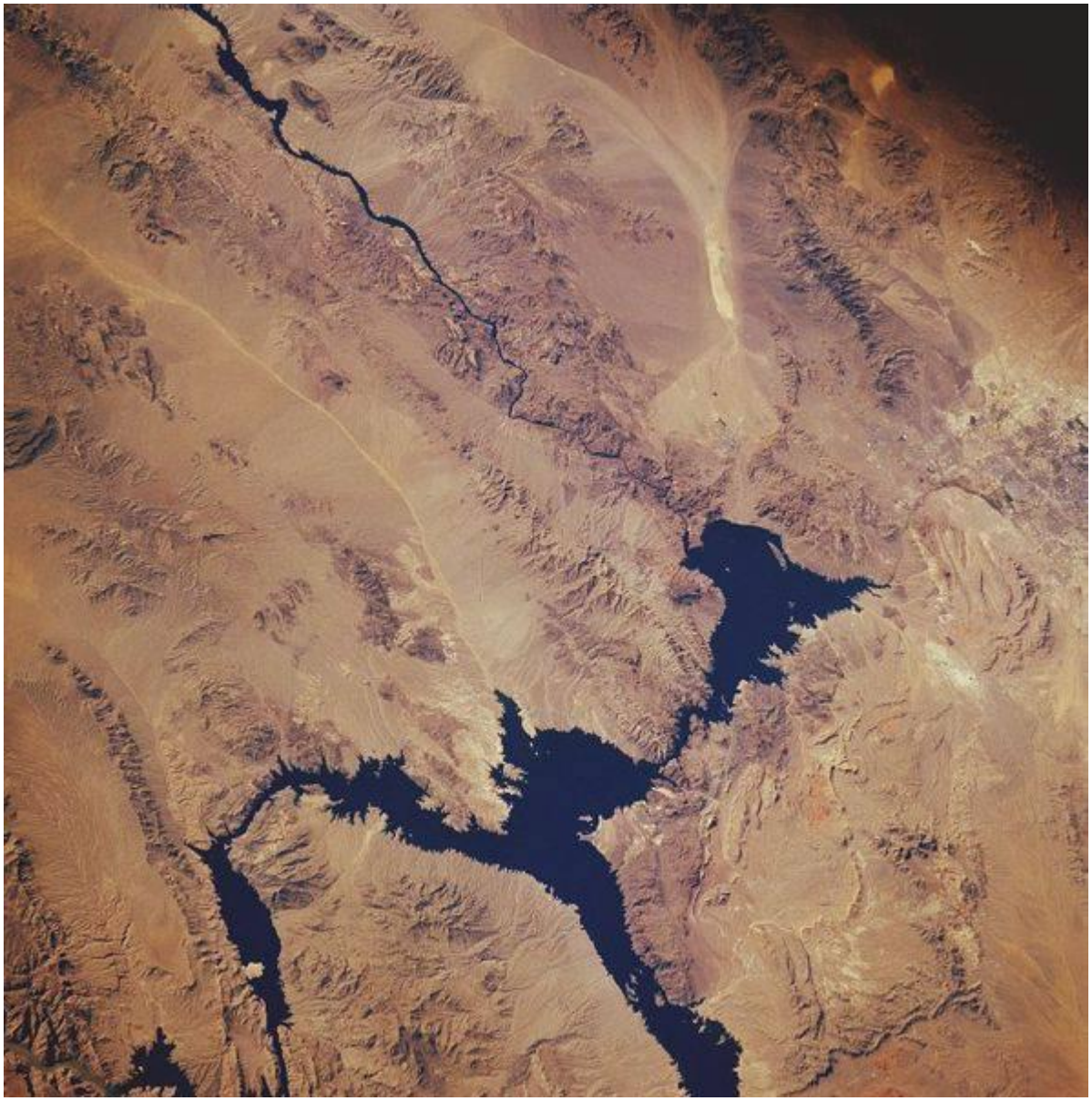


24. Se ha logrado determinar a través de métodos de topografía submarina que durante el Ple istoceno, antes del actual Delta, el río Colorado solía desembocar en la región comprendida entre la Sierra del Rosario y Salina Grande y mucho antes en otro importante sitio. En la foto realizada con pigmentos de carbono por el artista fotógrafo Michael P . Berman y que ahora pertenece a la colección Lannan se aprecia la Sierra del Rosario 2007.

Se han descubierto corrientes pluviales bajo el mar que muestran varios kilómetros cúbicos de material arenoso y limo que solo el magnánimo río Colorado pudo traer a la Bahía de Adair y región próxima a lo que es hoy Puerto Peñasco. Se tiene documentado que en un solo desborde, El río Colorado llego a arrastrar hasta 100,000,000 de metros cúbicos de arena en un solo evento, según un reporte de Sykes en 1937.

25. En la foto una prueba de los efectos del cambio climático que están severamente impactando la disponibilidad de agua del rí o Colorado en el Desierto: la diferencia en el nivel de agua en el reservorio de Lake Mead.

26. La Laguna Salada tiene agua! Ya se es taba secando después de los flujos del río en la década de los 80´s. Después volvió a tener agua en 1997 -2000. Tomada por la NASA en Abril 9 al 20 de 1994.



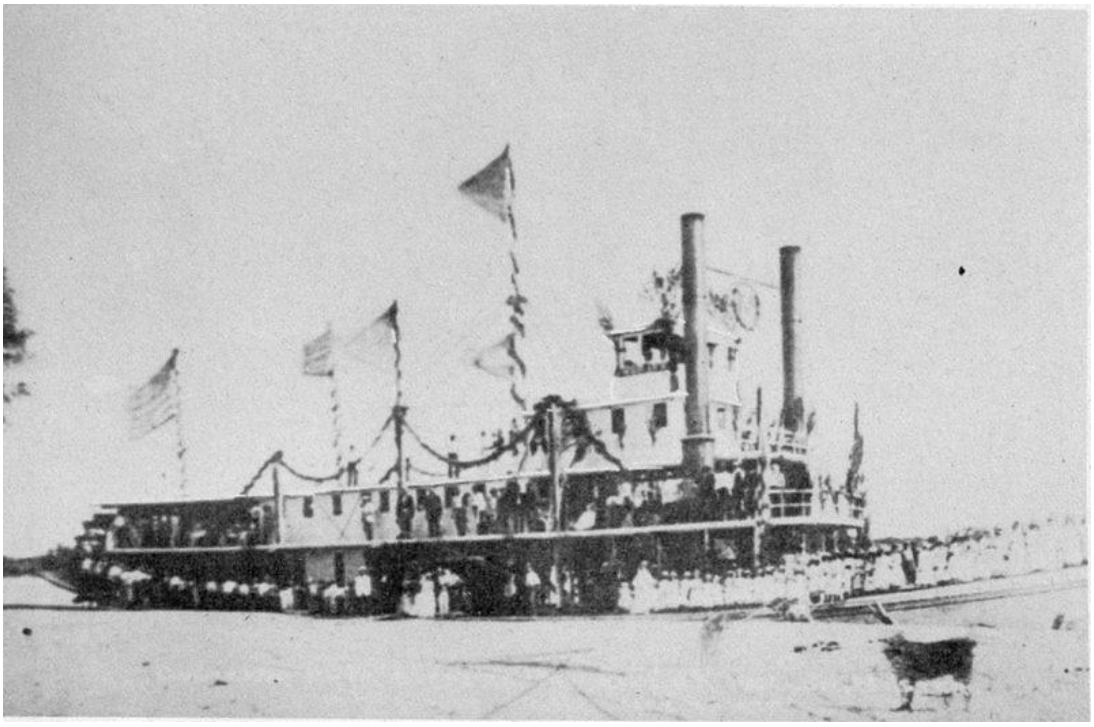
27. Continua la controversia sobre la eventual desaparición del Lago Mead, el más grande reservor io de agua en EUA y que se formo con el agua de la Presa Hoover que almacena el agua del río Colorado. Desde 1963 el Lago ha declinado su nivel de agua con excepción del 2009 y el 2011 en que tuvo ligeros aumentos. Algunos dicen que desaparecerá para el 20 21, otros dicen que el cambio climático que impide la formación de nieve en las Rocallosas y la sequia cíclica "natural" no lo afectaran.

28 Actividades de reforestación que se realizan como parte de las acciones de restauración en el Delta del rí o Color ado.

29. Juanitos en la zona de restauración de ecosistemas del Delta del río Colorado. Foto: Is Boset Saldana.

30. Buques de vapor en el rí o Colorado en Yuma Az .

31. Río Colorado 1880, Yuma Az.



32. Buque de vapor Mohave No. 2 que navegaba las ca udalosas aguas del poderoso ("mighty") río Colorado. Yuma Az, 1876 .

33. **Sitio de restauración en la zona del Río Colorado conocida como sitio CILA. La diferencia de alturas representa la edad de los árboles - los mas altos fueron plantados en el 2011 y los mas péquenos en el 2012.**

34. El rio Colorado a la altura de la carretera Mexicali -SLRC. Se observa un poco de agua en el rio, al parecer debido a desfogues asociados con las lluvias de unos días antes. Diciembre 20, 2012 .

35. El río Colorado visto aguas abajo de unas pocas millas al norte de la ciudad de San Luis Río Colorado. El proyecto de restauración "Hunter Hole" se puede ver a la izquierda - y no hay agua en el río (tomada 20 de diciembre 2012).

36. Compuertas, fundado el 20 de junio de 1901 (Foto: Compuerta Sharp, 1901).

37. Zona conocida como el Chauce en el Rio Colorado, a unos kilómetros al norte del puente del ferrocarril. El agua que se ve proviene del subsuelo, ya que solo unos cientos de metros al norte el río está seco. Francisco Z amora Ago sto 20-2013.