Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

ENGINYERIA TÈCNICA TOPOGRÀFICA
PROJECTE DE FI DE CARRERA

VARIACIÓ ESTACIONAL I TEMPORAL DE LA SUPERFÍCIE DEL LLAC TURKANA A TRAVÉS D'IMATGES DE SATÈL·LIT

Projectista:Pol Puig Conesa
Directora: Càrol Puig Polo
Codirector: Felipe Buill Pozuelo
Convocatòria: Juny 2014

"my attention was first directed to geology in order to understand the geography of the districts through which I rambled, and the, often, apparently erratic course of the rivers … and to understand local topography"

(John Walter Gregory, geòleg i explorador *britànic, 1864-1932)*

RESUM

Aquest projecte estudia l'evolució del llac Turkana mitjançant imatges Landsat, sèries temporals de precipitació i dades SPOT-VGT des de l'any 1984 fins al 2014.

El Turkana és un llac endorreic i eutròfic situat al nord-oest de Kenya. Les fonts principals del llac son la precipitació i els rius Omo, Kerio i Turkwel, però el clima hostil de la zona i la construcció d'una presa al riu Omo fan que el llac s'enfronti a una pèrdua de superfície progressiva.

L'aplicació de diferents tècniques de Teledetecció permeten obtindre resultats òptims sobre l'evolució de la superfície del llac així com l'estudi de sèries de precipitació i vegetació sobre diferents classes d'usos del sòl per a relacionar-los posteriorment i poder analitzar els resultats obtinguts.

ÍNDEX

1 INTRODUCCIÓ 7

1.1 OBJECTIUS 8
1.2 DESCRIPCIÓ DE LA ZONA D'ESTUDI 10

2 DESCRIPCIÓ DE LES DADES UTILITZADES 15

2.1 MODEL DIGITAL D'ELEVACIÓ 15
2.2 LANDSAT 16
2.3 DADES DE PRECIPITACIÓ 21
2.3.1 ESTIMACIONS DE PRECIPITACIÓ PER SATÈL·LIT 21
2.3.2 ESTACIONS METEOROLÒGIQUES 22
2.4 DADES SPOT-VEGETATION 23

3 METODOLOGIA 25

3.1 DELIMITACIÓ DE CONQUES HIDROGRÀFIQUES 25
3.2 ESTUDI DE LA VARIACIÓ DE LA LÀMINA SUPERFICIAL DEL LLAC 30
3.3 ANÀLISI DE PRECIPITACIÓ 32
3.4 ANÀLISI DE VEGETACIÓ 36

4 RESULTATS OBTINGUTS 39

4.1 CONQUES HIDROGRÀFIQUES 39
4.2 ANÀLISI DE PRECIPITACIÓ 40
4.2.1 ESTACIONS METEOROLÒGIQUES DE MOYALE I ELDORET 40
4.2.2 ESTIMACIÓ DE PRECIPITACIONS PER SATÈL·LIT 42
4.2.3 COMPARACIÓ ENTRE DADES DE PRECIPITACIÓ OBSERVADES I DADES DE PRECIPITACIÓ ESTIMADES PER SATÈL·LIT 45
4.3 OBTENCIÓ DE LA SUPERFICIE DEL LLAC TURKANA 47
4.4 COMPARATIVA ENTRE LA DINÀMICA DE LA VEGETACIÓ I LA PRECIPITACIÓ 54

5 CONCLUSIONS 61

6 BIBLIOGRAFIA 63

ANNEXES 67

1 INTRODUCCIÓ

Quan el 5 de març de 1888 el tinent Ludwig von Höhnel i el comte Samuel Teleki van descobrir un dels grans llacs d'Àfrica no van poder expressar el seus sentiments d'altre manera que el text citat:

"*Quedamos absortos mirando, hechizados por la belleza del paisaje […]. En aquel momento, todos los peligros, todas nuestras fatigas, quedaron relegadas al olvido"*

(Citat per A.Moorehead, 1960, p.166).

Van nombrar aquest indret mar de Jade per l'impressionant color turquesa de les seves aigües, més tard li van donar el nom de llac Rudolf en honor del seu amic l'arxiduc Rudolf d'Hasburg i es va mantenir durant tot el període colonial britànic d'Àfrica Oriental .Més tard, després de la independència de Kenya, el president Mzee Jomo Kenyatta el va renombrar com a llac Turkana fent referència a la tribu que habita en les seves ribes.

Situat a l'Àfrica oriental, es troba al Nord oest de l'estat de Kenya amb un extrem nord dins Etiòpia i és el llac endorreic més gran del món amb una superfície mitjana de 6750 kilòmetres quadrats, el que equival més o menys al 20% de la superfície de Catalunya. El terme endorreic fa referència al fet de que és una àrea sense sortida fluvial cap a l'oceà i prové dels termes grecs *endo*, "interior" y *rhein*, "fluir". Encara que segueix sent una enorme extensió d'aigua dintre d'un entorn i un clima tant hostils com els del Vall del Gran Rift, sec i calorós, es coneix que fa quatre mil·lennis era casi el doble de gran i estava comunicat amb el mateix riu Nil.

La naturalesa d'aquest tipus de llacs fa que qualsevol precipitació que caigui dins la conca endorreica romangui allí, abandonant el sistema únicament per infiltració o evaporació, la qual cosa contribueix a la concentració de sals i si parlem d'una conca endorreica en la que l'evaporació és major que l'alimentació, el llac salat acaba desapareixent i es formen salines.

Les aigües del massís Etiòpic arriben a la conca del llac a través del riu Omo i el seu intricat curs ple de meandres. Tots plegats, el riu i el llac, formen part del Patrimoni de la Humanitat per ser ecosistemes únics en el món i albergar cultures humanes de gran valor antropològic; A pesar d'això el llac s'enfronta a una catàstrofe ambiental ja que el govern etíop està construint una presa en el riu Omo, que actualment és la font principal del llac, i degut al clima hostil de la zona, pot arribar a desaparèixer i deixar un llegat de salines en un paisatge àrid i dessolat on abans hi havia aigües plenes de vida.

1.1 OBJECTIUS

L'objectiu principal d'aquest Projecte Final de Carrera és l'estudi i anàlisi de la variació de la superfície del llac Turkana. Per aconseguir aquest objectiu s'han definit els següents objectius específics:

- **Definició de les conques hidrogràfiques:** Una conca hidrogràfica és una superfície de drenatge natural on convergeixen les aigües que flueixen per vaguades i congosts, formant d'aquesta manera una xarxa de drenatge o afluents que alimenten un desguàs principal.

  Es vol delimitar les conques que proveeixen al llac per a poder utilitzar aquesta informació com a regió per extreure dades de precipitació i vegetació.

- **Estudi de la variació temporal i estacional de les superfícies d'aigua del llac amb imatges del satèl·lit Landsat des de 1984 fins 2013:** El llac s'enfronta a una disminució del cabal de l'aigua de les seves fonts principals, el riu Omo y Turkwel, degut principalment a l'explotació de l'aigua d'aquests per a usos ramaders i agrícoles.
  L'aigua del llac no és potable degut majoritàriament a un elevat contingut de sòlids en suspensió y una elevada alcalinitat, aquest fet provoca que la població es proveeixi dels rius de la zona.
  Es pretén seguir l'evolució de la superfície del llac en una franja de 30 anys mitjançant imatges Landsat.

- **Anàlisis climatològic de la zona a través de 30 anys de dades de precipitació:** El clima de la zona no ajuda a la preservació del llac i es pretén dur a terme un estudi de les precipitacions a la zona en una franja de 30 anys. S'avaluen sèries temporals de precipitació des de l'any 1984 fins al 2013 i es comparen amb dades de precipitació d'estacions de la zona.

- **Anàlisi de la variació temporal i estacional de la precipitació i la vegetació a l'àrea d'estudi:** La pluja, en molts indrets d'Àfrica com el nord-oest de Kenya regió en la qual s'ha dut a terme l'estudi, és una benedicció i a l'hora una maledicció. Parlem de benedicció ja que augmenta l'esperança d'alleujar les prolongades sequeres de la zona i maledicció perquè la terra resseca no pot absorbir els aiguats sobtats, augmentant així el risc d'inundacions i de malalties transmeses per l'aigua.

En el cas del llac Turkana, és de vital importància la pluja per mantenir el volum del llac, per això s'ha decidit dur a terme un estudi de la precipitació a la zona durant 29 anys, del gener de 1984 al desembre de 2013. A més a més s'estudien sèries temporals de vegetació des de l'any 1999 al 2013 per a predir la relació que hi ha entre la vegetació a la zona i la precipitació.

1.2 DESCRIPCIÓ DE LA ZONA D'ESTUDI

Per a dur a terme l'estudi del llac s'ha triat cautelosament una extensa àrea que avarca el llac, part de Kenya, Etiòpia i Uganda ja que l'estudi es basa en part en l'entorn del llac, en concret, les conques hidrològiques d'aquest.

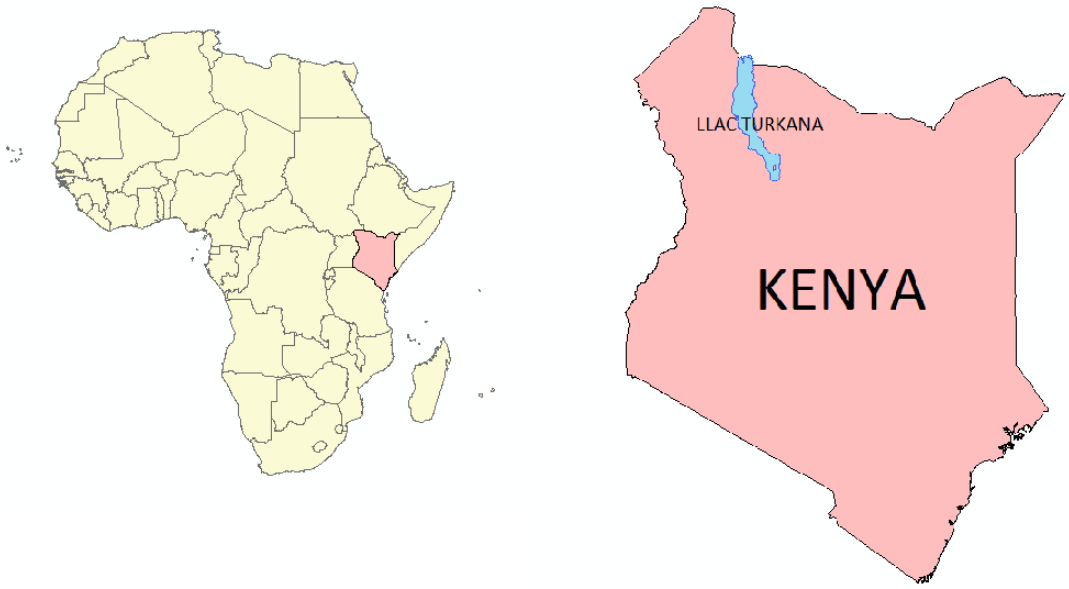

Figura 1. Situació sobre el mapa d'Àfrica de Kenya i el llac Turkana

El llac Turkana està situat a la regió nord oest de Kenya , estenent-se pel gran vall del Rift amb un extrem dins del sud d'Etiòpia. Es tracta del major llac endorreic del món, propagant-se més de 240 kilòmetres de nord a sud i menys de 55 kilòmetres d'ample, degut a que està bordejat per la vall. Té una superfície mitjana de 6750 kilòmetres quadrats i es troba ubicat geogràficament entre la latitud 3 ºN i la longitud 36 ºE . L'aigua flueix cap al llac principalment per el riu Omo, situat a l'extrem nord dins d'Etiòpia i secundàriament pels rius Turkwel i Kerio situats al sud.

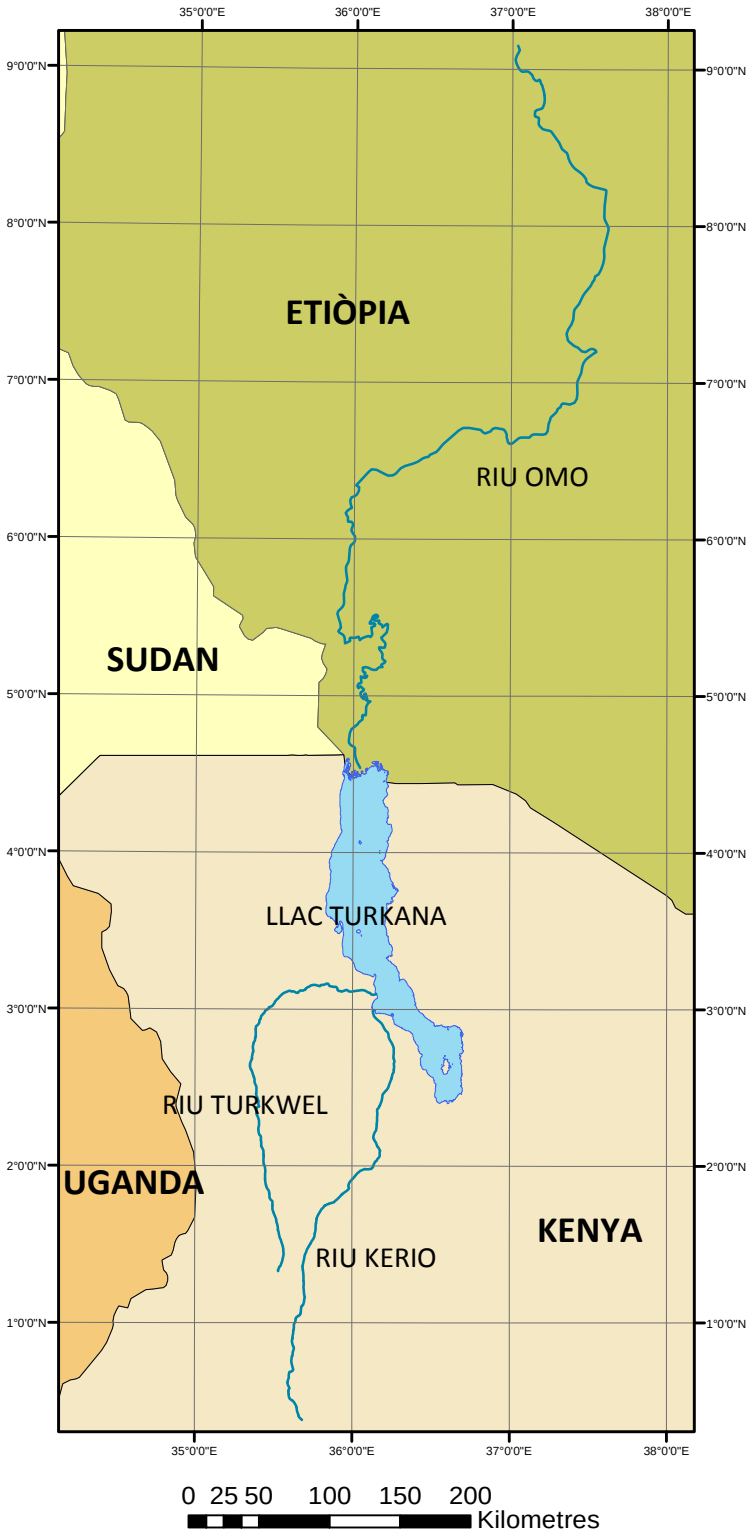

Figura 2. Situació del llac Turkana juntament amb els rius Omo, Turkwel i Kerio

El llac a més a més també és un llac eutròfic. El terme eutròfic fa referència a la resposta dels ecosistemes a la adició de substàncies artificials o naturals a un sistema aquàtic i prové del mot grec *"eutrofia"* que significa nutrició adequada. La eutrofització natural es produeix en situacions d'acumulació de nutrients o desembocadura d'aquests sobre sistemes, fet que promou el creixement excessiu de plantes i algues. Aquestes plantes i algues assimilen els nutrients per a altres espècies i quan moren es dipositen al fons on es descomponen. El procés de descomposició utilitza oxigen i deixa les aigües més profundes del llac amb escassetat d'aquest gas vital, fet que provoca la mort de peixos i altres organismes, ampliant així el procés de descomposició i convertint-se en un cicle.

Turkana a més a més és el nom de la tribu de pastors nòmades que habiten la vora del llac ja que l'aigua del llac és sinònim de vida i per això la zona del llac té designades tres àrees com a parcs nacionals de Kenya que formen part de la llista del Patrimoni de la humanitat de la UNESCO des de 1997.

La zona del llac Turkana ha proporcionat importants restes d'homínids, un d'ells, de més de dos milions d'anys d'edat, l'*Homo Rudolfensis,* trobat l'any 1972 i dit així fent referència al nom que tenia el llac en l'any del descobriment, llac Rudolph. L'any 1984 es va trobar el *nen de Turkana*, un esquelet casi complet d'un homínid mort entre els 11 o 12 anys d'edat fa aproximadament 1,6 milions d'anys.

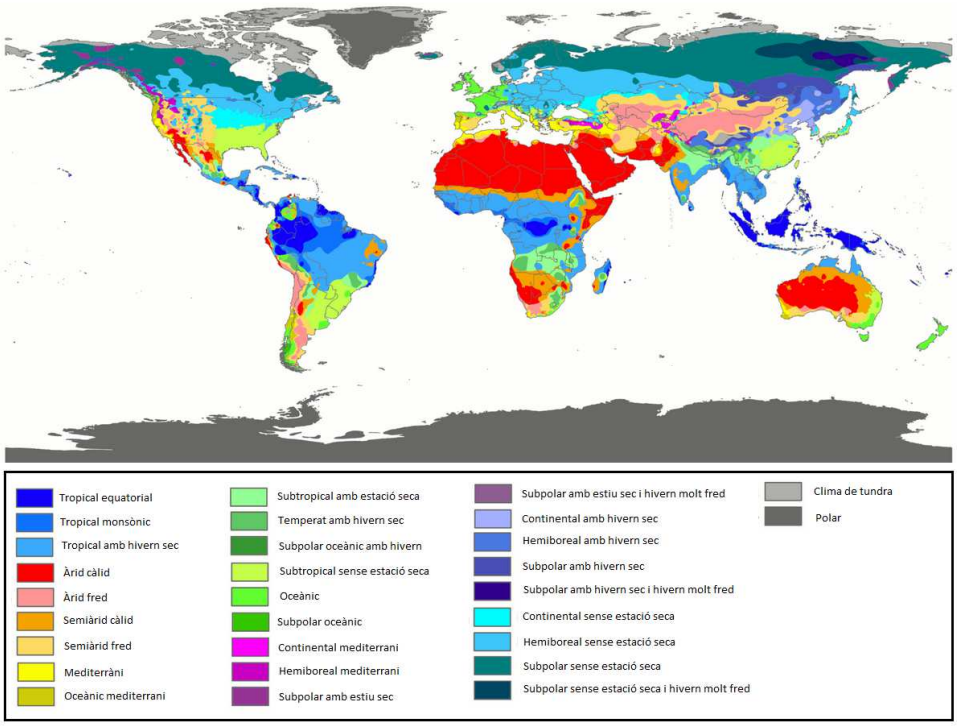

Figura 3. Classificació climàtica de Köppen

Segons s'ha consultat prèviament (Meteorology & Climate (2007)) , la regió on està situat el llac Turkana té un clima àrid càlid, característic per tenir una temperatura mitjana anual per sobre dels 18 °C.

La radiació solar que es produeix sobre la regió, casi perpendicular al sòl tot l'any, fa que les temperatures siguin altes juntament amb el flux d'evaporació, fet que provoca que la humitat sigui alta.

Pel que fa a la zona d'estudi, pateix dues estacions plujoses, una molt abundant teòricament entre el març i el juny i una altre de menor entre octubre i desembre.

2 DESCRIPCIÓ DE LES DADES UTILITZADES

2.1 MODEL DIGITAL D'ELEVACIÓ

Per a l'anàlisi de les conques hidrogràfiques s'ha fet servir un model digital d'elevacions elaborat a partir de les imatges ASTER. Les imatges ASTER són captades des de el 1999 per el satèl·lit Terra. Aquestes imatges posseeixen 14 bandes separades en 3 grups, el primer grup amb una resolució de 15 metres on es troben les bandes del visible i l'infraroig proper, el segon amb una resolució de 30 metres compost per 6 bandes de l'infraroig i un tercer grup termal amb una resolució de 90 metres. Les principals aplicacions d'aquestes imatges estan en l'anàlisi de sòls, cossos d'aigua, geologia i medi ambient, entre altres. A més a més té també dues bandes estereoscòpiques a partir de les quals es poden generar models digitals d'elevació. Cada escena ASTER té una extensió de 60x60 kilòmetres quadrats.

El model digital d'elevació es pot descarregar des de la següent web previ registre gratuït: http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp.

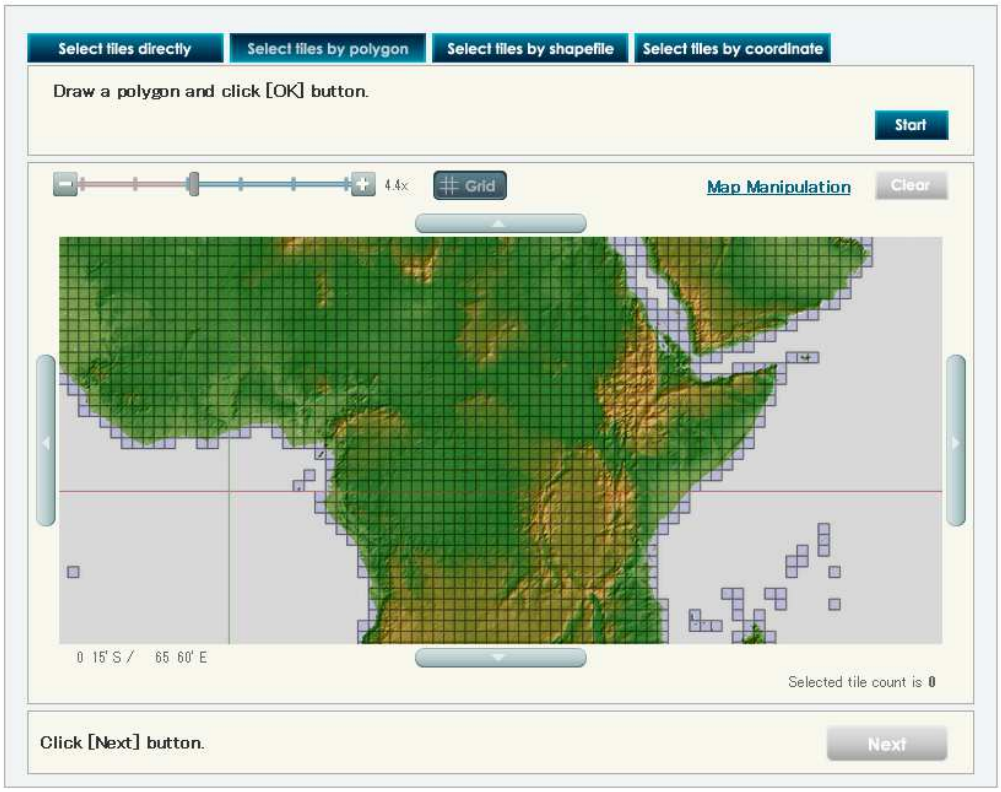

Figura 4. Exemple de la web de descàrrega de dades ASTER. Font: ASTER GDEM, http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/

2.2 LANDSAT

Els satèl·lits Landsat són una sèrie de satèl·lits passius construïts i posats en òrbita per els Estats Units per a la observació en alta resolució de la superfície terrestre i estan equipats amb instruments específics per a la teledetecció multiespectral.

Landsat ha estat testimoni de molts canvis en el món, des de el creixement de grans ciutats fins a la reducció dels boscs més importants del nostre món. La informació fins ara recol·lectada és de vital importància per a múltiples àrees com la gestió hídrica i forestal, energia, gestió de riscos, agricultura i urbanisme entre moltes altres. El fet de que la gratuïtat d'aquestes dades de tant ampli rang temporal i d'un mateix territori resulta de molt interès per analitzar les variacions i prendre les millors decisions de gestió territorial.

Tots els satèl·lits són controlats per la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) tot i que les imatges són processades per el USGS (*United States Geological Survey*).

En aquest TFC s'han utilitzat els següents satèl·lits:

-Landsat 5

Posat en òrbita al 1984, ja no segueix operatiu. Estava proveït amb el sensor Thematic Mapper (TM) d'escombra multiespectral concebut per proporcionar una millor resolució espacial, millor discriminació espectral entre els objectes de la superfície terrestre, millor fidelitat geomètrica i millor precisió radiomètrica en relació amb el sensor dels altres Landsat anteriors. Treballava simultàniament en set bandes espectrals, tres en el visible, una en l'infraroig proper, dos en l'infraroig mitjà i una en l'infraroig tèrmic.

LANDSAT TM							
Banda	1	2	3	4	5	6 Tèrmica	7
Resolució espacial (m)	30	30	30	30	30	120	30
Resolució espectral (nm)	450 520	530 610	630 690	780 900	1550 1750	10400 12500	2080 2350
Resolució radiomètrica	8 bits/píxel						
Ample de mostreig	180 Km						
Off-NADIR	98,2°						
Mida d'escena	~180 x 172 Km						
Altura	705 Km						
Format de dades	GeoTIFF o TIFF						
Posada en òrbita	1 de Març de 1984						

Taula 1. Característiques tècniques del sensor Landsat Thematic Mapper.

-Landsat 7

El satèl·lit Landsat 7 va ser posat en òrbita el 15 d'abril de 1999 i estava dissenyat per tenir una vida útil de cinc anys. Les imatges de Landsat 7 estan formades per 8 bandes espectrals que poden ser combinades entre elles per obtenir composicions de color o diferents opcions de processament. El instrument essencial a bord del satèl·lit és el sensor *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) a més d'una sèrie de millores tècniques respecte el seu antecessor, el satèl·lit Landsat 5, com ara una banda espectral (banda pancromàtica) amb una resolució de 15 metres, millores en les característiques geomètriques i radiomètriques i una millor resolució espacial de la banda tèrmica que passa de 120 metres a 60 metres. Aquests avenços converteixen el satèl·lit en una molt bona eina per obtenir cartografia 1:25000 ja que la resolució de 15m de la banda pancromàtica permet ampliacions fins a una escala de 1:25000.

L'any 2003 va tenir un problema en el sensor que fa que les escenes estiguin ratllades, així que les dades del Landsat 7 només estan disponibles entre els anys 1999 i 2003.

LANDSAT ETM+								
Banda	1	2	3	4	5	6 Tèrmica	7	8 Pan
Resolució espacial (m)	30	30	30	30	30	60	30	15
Resolució espectral (nm)	450 520	530 610	630 690	780 900	1550 1750	10400 12500	2080 2350	520 900
Resolució radiomètrica	8 bits/píxel							
Ample de mostreig *(Swath Width)*	183 Km							
Off-NADIR	98,2°							
Mida d'escena	180 x 180 Km							
Altura	705 Km							
Format d'entrega	GeoTIFF o TIFF							
Posada en òrbita	15 d'Abril de 1999							

Taula 2. Característiques tècniques del sensor Landsat *Enhanced Thematic Mapper Plus.*

-Landsat 8

L'onze de febrer del 2013 es va posar en òrbita el satèl·lit Landsat 8 que substitueix els satèl·lits Landsat 5 i Landsat 7. La principal aportació d'aquest satèl·lit és els dos nous sensors que du incorporats: el OLI (*Operational Land Imager* o Generador Operacional de d'imatges de la Terra) y el TIRS (*Thermal Infrared Sensor* o Sensor Infraroig Tèrmic).

Les escenes de Landsat 8 tenen un total de 11 bandes espectrals, 9 generades a partir del sensor OLI i 2 generades a partir del TIRS.

Bandes Landsat 8	Funció
banda 1	Aerosol
banda 2	Blau
banda 3	Verd
banda 4	Vermell
banda 5	Infraroig proper
banda 6	Infraroig d'ona curta
banda 7	Infraroig d'ona curta
banda 8	Pancromàtic
banda 9	Cirrus
banda 10	Infraroig tèrmic
banda 11	Infraroig tèrmic

Taula 3. Bandes del Landsat 8

Les dues noves bandes respecte a Landsat 7, són la banda 1, dissenyada específicament per als recursos hídrics i la investigació de zones costeres, i un nou canal infraroig a la banda 9 especial per a la detecció de núvols cirrus, que són núvols d'una altitud compresa entre els 6.000 i 10.000 metres, formats per partícules de glaç molt fines i disperses. Aquestes noves bandes ajudaran als científics a mesurar la qualitat de l'aigua i facilitarà la detecció de núvols alts i prims que prèviament han estat difícils de detectar en les imatges Landsat.

Figura 5. Nuvols Cirrus. Font: http://www.xtec.cat/~ftrillo/imatges%20nuvols/cirrus.jpg

El sensor OLI va ser dissenyat per tenir una vida útil de cinc anys i detectar les mateixes bandes espectrals que els anteriors sensors TM i ETM+ amb una excepció d'una banda en l'infraroig tèrmic.

LANDSAT OLI									
Banda	1	2	3	4	5	6 Tèrmica	7	8	9
Resolució espacial (m)	30	30	30	30	30	30	30	15	30
Resolució espectral (nm)	433 453	450 515	525 600	630 680	845 885	1560 1660	2100 2300	500 680	1360 1390
Resolució radiomètrica	8 bits/píxel								
Ample de mostreig	180 Km								
Off-NADIR	98,2°								
Mida d'escena	~180 x 172 Km								
Altura	705 Km								
Format de dades	GeoTIFF o TIFF								
Posada en òrbita	11 de Febrer de 2013								

Taula 4. Característiques tècniques del sensor Landsat *Operational Land Imager.*

El sensor TIRS es basa en el fet de que en el planeta Terra tot emet radiació tèrmica o calor i la física ens diu que la quantitat de radiació emesa és proporcional a la temperatura de l'objecte. Així doncs, el sensor tèrmic va ser afegit al Landsat 8 quan es va fer evident que els gestors dels recursos hídrics es basen en les mesures d'alta precisió de l'energia tèrmica de la Terra obtinguda per els anteriors sensors Landsat (TM i ETM+), amb la finalitat de fer un seguiment dels usos de la Terra i l'aigua.

LANDSAT TIRS		
Banda	10	11
Resolució espacial (m)	100	100
Resolució espectral (nm)	1030 1130	1150 1250

Taula 5. Característiques tècniques del sensor Landsat *Thermal Infrared Sensor.*

Cal afegir que les bandes del TIRS s'adquireixen amb una resolució de 100 metres però després es tornen a remostrejar a 30 metres.

IMATGES	SATÈL·LIT
1984	Landsat 5
1989	Landsat 5
1995	Landsat 5
1999	Landsat 7
2001	Landsat 7
2009	Landsat 5
2010	Landsat 5
2014	Landsat 8

Taula 6. Imatges utilitzades per dur a terme l'estudi.

Les escenes emprades en aquest TFC han estat descarregades directament, previ registre gratuït, del visor GLOVIS (*Global Visualization Viewer*) del USGS, eina molt útil per a la descàrrega de dades ja que té varies col·leccions de satèl·lits disponibles i mostra una gran facilitat per l'usuari a l'hora de previsualitzar les dades.

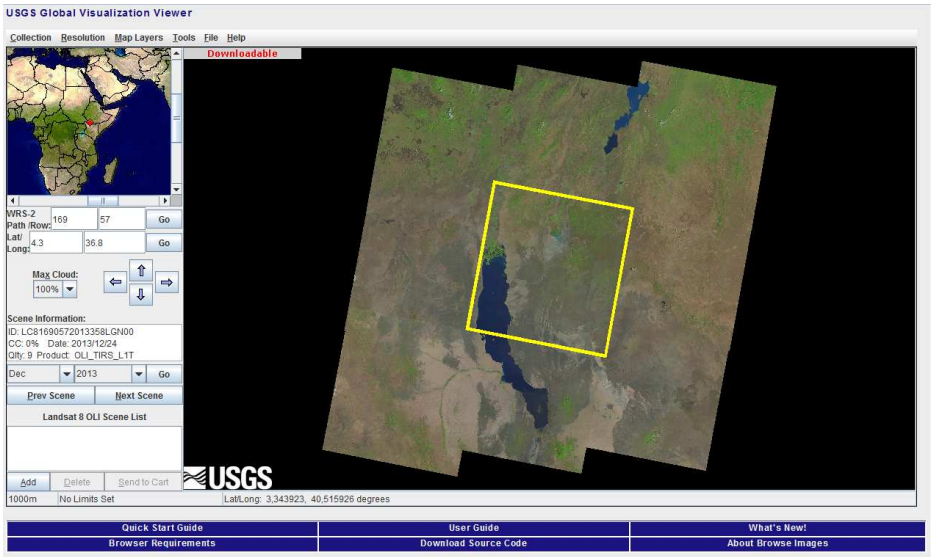

Figura 6. Exemple de la web de descàrrega del USGS Glovis. Font: http://glovis.usgs.gov/.

2.3 DADES DE PRECIPITACIÓ

2.3.1 ESTIMACIONS DE PRECIPITACIÓ PER SATÈL·LIT

Les dades d'estimació de precipitació utilitzades han estat les de l'agència FEWS NET. L'agència dels Estats Units per al Desenvolupament Internacional (USAID, U.S. Agency for International Development) per la alerta primerenca de la fam (FEWS NET, Famine Early Warning Systems Network) és un sistema d'informació dissenyat principalment per identificar problemes en el sistema de subministrament d'aliments que potencialment porta a la fam o altres condicions desfavorables al continent Africà, Amèrica llatina i central i part d'Àsia.

El Portal de Dades FEWS NET Àfrica proporciona accés a la informació espacial, imatges de satèl·lit i altres dades i productes gràfics en suport del projecte del FEWS NET. Aquest portal està gestionat per el USGS (United States Geological Survey) I el seu objectiu és reduir la incidència de la fam induïda per les inundacions o sequeres oferint als usuaris informació precisa i oportuna.

Les dades de precipitació es poden descarregar gratuïtament del portal FEWS NET i ofereix la opció de descarregar les dades globalment, per continents o per regions ja delimitades. També ens ofereix la possibilitat de descarregar dades d'un dia concret o bé sèries temporals de 10 dies consecutius. En aquest TFC s'han utilitzat dades del gener de 1984 fins al desembre de 2013.

Figura 7. Exemple de la web de descàrrega de les dades d'estimació de precipitació. Font: http://earlywarning.usgs.gov/fews/downloads/index.php

2.3.2 ESTACIONS METEOROLÒGIQUES

Com a complement a les estimacions de precipitació per satèl·lit s'han descarregat dades de precipitació acumulada en estacions meteorològiques.

Les bases de dades que contenen les dades meteorològiques de les estacions de la WMO (*World Meteorological Organization*) es poden descarregar de diferents organismes internacionals i són de fàcil i lliure accés.

En aquest cas s'han descarregat des de la pàgina web de l'agència meteorològica japonesa: http://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/products/climate/climatview/frame.php

Ens ofereixen dades puntuals de pluja preses en un lloc concret durant una sèrie de temps continuat.

Així doncs, s'han triat les següents estacions per la seva proximitat amb la zona d'estudi (figura 8).

- Moyale (Kenya):
  Latitud: 3,58°N
  Longitud: 39,05°E
  Altura: 1112m

- Eldoret (Kenya):
  Latitud: 0,48°N
  Longitud: 35,30°E
  Altura: 646m

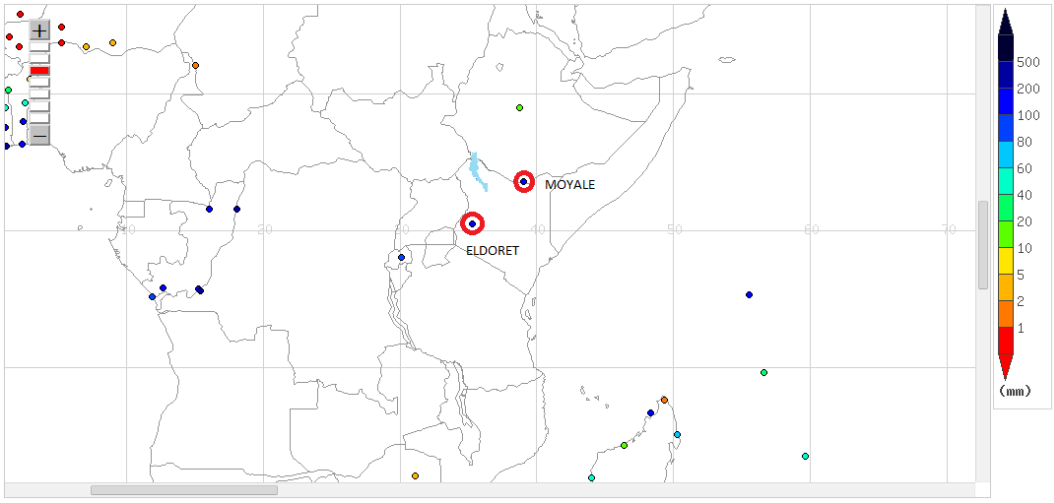

Figura 8. Visualitzador d'estacions i situació de les estacions meteorològiques de Moyale i Eldoret a Kenya. Font: Agència Meteorologia del Japó (http://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/products/climate/climatview/frame.php)

2.4 DADES SPOT-VEGETATION

En aquest estudi s'han descarregat les dades de vegetació procedents del sensor SPOT-VEGETATION 2 des de la següent pagina web: http://www.vgt.vito.be/index.html ja que ofereixen dades periòdiques de 10 dies consecutius dins d'un mateix mes processades i georeferenciades per proporcionar una resolució d'un kilòmetre.

Els productes VGT-S són una síntesi entre òrbites successives i les dades han estat processades per extreure la millor mesura possible per a un període determinat. La síntesi es fa a través de la selecció de la millor mesura adquirida durant un dia o una dècada i el mètode més comunament utilitzat és la selecció del valor màxim que conté el valor més alt de l'índex de vegetació NDVI calculat a partir de les reflectàncies a la part superior de l'atmosfera.

S'han utilitzat dades del gener de 1999 fins al desembre de 2013.

3 METODOLOGIA

3.1 DELIMITACIÓ DE CONQUES HIDROGRÀFIQUES

Una conca, geogràficament parlant, és una zona extensa amb una altitud inferior a les formacions de relleu que l'envolten. Sovint es formen com a resultat de l'acció erosiva d'un riu i els seus afluents i altres vegades com a conseqüència de l'enfonsament d'una falla.

Així doncs entenem com a conca hidrogràfica el conjunt territorial que vessa les seves aigües superficials i el seu aqüífer dins una mateixa conca, alimentant d'aquesta manera un riu principal que recorre aquesta conca i recull al seu pas les aportacions de qualsevol afluent que hi vagi a parar.

Una conca hidrogràfica desguassa les seves aigües en un mar, un llac, o en el cas de no haver-hi sortida, les aigües es filtren al subsòl o s'evaporen, formant-se així les anomenades conques endorreiques.

Per a estudiar les conques hidrogràfiques que proveeixen al llac Turkana primer s'ha descarregat un model digital d'elevació del terreny, en concret el *DEM ASTER (Digital Elevation Model* Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*),* amb una resolució de 30m i editat per la NASA.

Per a crear la zona d'estudi sobre el llac Turkana es va crear un mosaic ràster amb el software ArcGis 10.1 que proveís la zona i acte seguit es va dur a terme la següent metodologia:

1.Fill sinks: el primer pas consisteix en omplir les imperfeccions que ens presenta el mosaic ràster a estudiar. Amb aquesta eina de geoprocesament s'omplen els píxels sense valor assolint així el nivell del terreny dels píxels del voltant, amb l'objectiu de poder determinar de forma adequada la direcció del flux.

2. Flow direction: es defineix la direcció del flux buscant el camí descendent d'una cel·la a una altra. Ve a ser com simular una pluja uniforme en tot el model d'elevació digital per així conèixer cap a on es decanta l'aigua vessada.

Hi ha vuit direccions de sortida vàlides relatives a les vuit cel·les adjacents en les que el flux pot viatjar. Aquest fet es denomina col·loquialment com model de flux de vuit direccions. La direcció del flux es determina buscant la direcció de descens més aguda, o màxima caiguda, a partir de cada cel·la amb la següent expressió

$$màxima\ caiguda = \frac{\Delta z}{d}$$

La distancia es determina entre els centres de les cel·les. Suposant que la mida de la cel·la és un, la distància entre dues cel·les ortogonals és un i la distància entre dues cèl·lules diagonals és 1.414216, l'arrel quadrada de dos. Si el descens màxim entre diverses cèl·lules és el mateix, el conjunt s'amplia fins que es troba el descens més agut.

Quan es troba una direcció de màxima caiguda, la cel·la de sortida es codifica amb el valor que representa aquesta direcció (figura 9Figura 9).

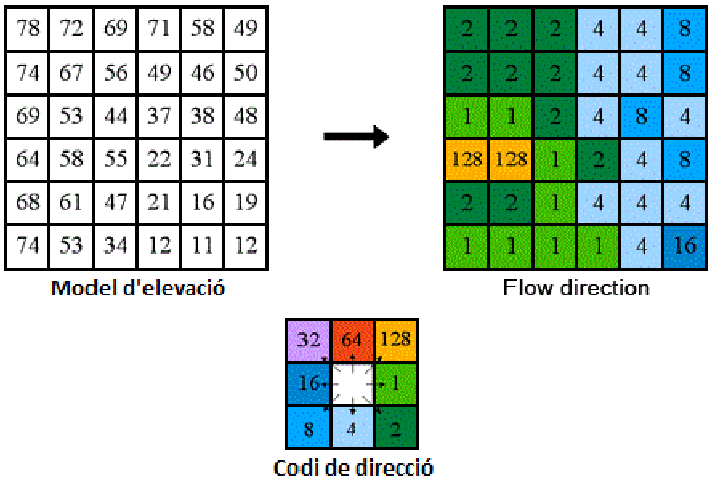

Figura 9. Gràfic del funcionament del *flow direction*. Font: http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/printBooks_topics.cfm?pid=6050

3. Flow accumulation: un cop coneguda la direcció de l'aigua dins la conca, amb aquesta eina de geoprocesament es crea un ràster d'acumulació de flux en cada cel·la i es determina el nombre de cel·les d'amunt que aboquen sobre cadascuna de les cel·les situades exactament a sota.

La funció d'acumulació de flux calcula el cabal acumulat com el pes de totes les cel·les que flueix en cada cel·la costa avall en el ràster de sortida. Si no es proporciona cap trama de pes, un pes de valor un s'aplica a cada cel·la, i el valor de les cel·les en la trama de sortida serà el nombre de cel·les que flueixi dins de cada cel·la.

En la figura 10, la imatge esquerra mostra la direcció de desplaçament de cada cel·la i la imatge dreta el nombre de cel·les que flueixen en cada cel·la.

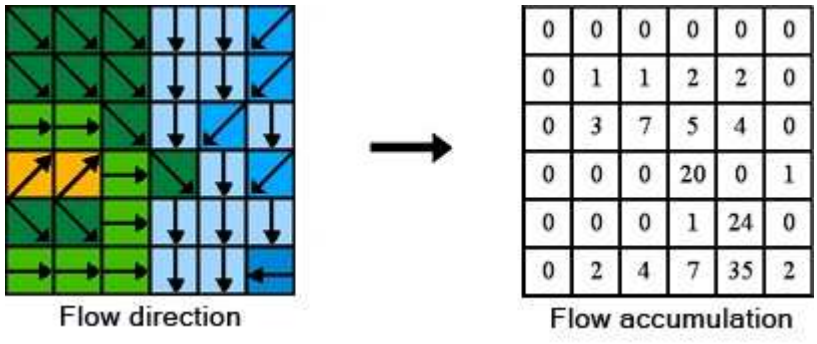

Figura 10. Gràfic del funcionament del *flow accumulation*. Font: http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/printBooks_topics.cfm?pid=6050

4. Stream definition: a partir del ràster d'acumulació de fluïts generat en el pas anterior es classifiquen les cel·les amb acumulació de flux superior a un llindar especificat per nosaltres com a cel·les pertanyents a la xarxa de flux. El llindar triat és el valor a partir del qual un píxel pertany o no pertany a la xarxa de drenatge. Si triem un valor de llindar baix obtindrem petits afluents a la nostra xarxa de drenatge i en canvi amb un valor alt modelarem els drenatges de major grandària com s'observa a la figura 11. És molt important per a realitzar aquest pas que coneguem la mida del píxel i en aquest cas és 0,00027777778 x 0,00027777778 graus.

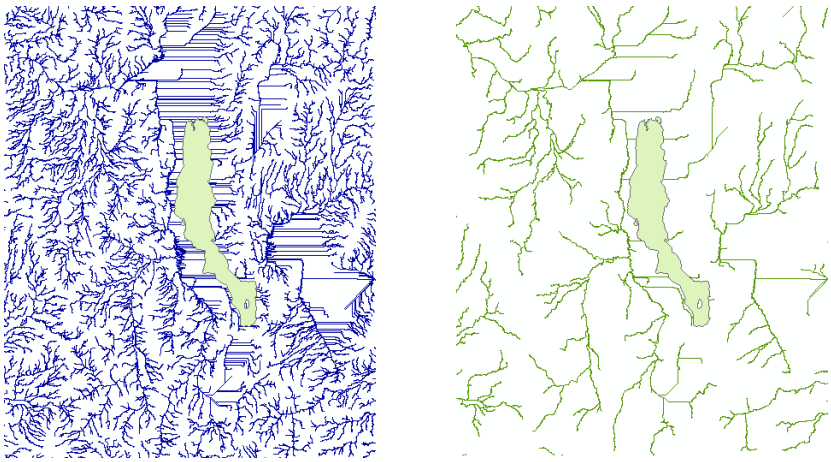

Figura 11. *Stream definition* generat amb un llindar baix (20000) i llindar alt (400000).

5. Stream link: un cop conegudes les seccions per on es divideix el recorregut del flux, es creen segments no interromputs que connecten dues unions successives, una unió i un punt de desguàs o una unió i una divisió de l'àrea de drenatge.

6. Stream order: creat els vectors que defineixen el recorregut del flux, es procedeix a ordenar aquests per delimitar quins segments predominen sobre els demes.

S'ha utilitzat el mètode proposat per Strahler al 1952. La classificació d'un corrent només augmenta quan els corrents del mateix ordre interseccionen, d'aquesta manera, la intersecció d'un vincle de primer ordre i un de segon ordre manté un vincle de segon ordre en comptes de crear un vincle de tercer ordre. (imatge)

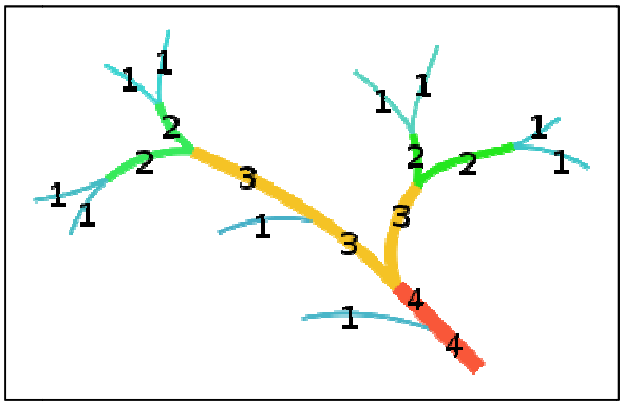

Figura 12. Mètode Strahler. Font: http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/printBooks_topics.cfm?pid=6050

7. Strean to Feature: coneixent l'ordre dels vectors es procedeix a vectoritzar-los.
Una xarxa lineal ràster es pot convertir amb precisió a les funcions de representació d'una xarxa lineal utilitzant l'eina de geoprocesament Stream to Feature. Funciona amb un algoritme de vectorització dissenyat especialment per a la vectorització de xarxes de transmissió d'una trama la qual es coneix la direccionalitat.

L'algoritme utilitzat està optimitzat per utilitzar una direcció de trama per ajudar en la vectorització de les interseccions i les cel·les adjacents.

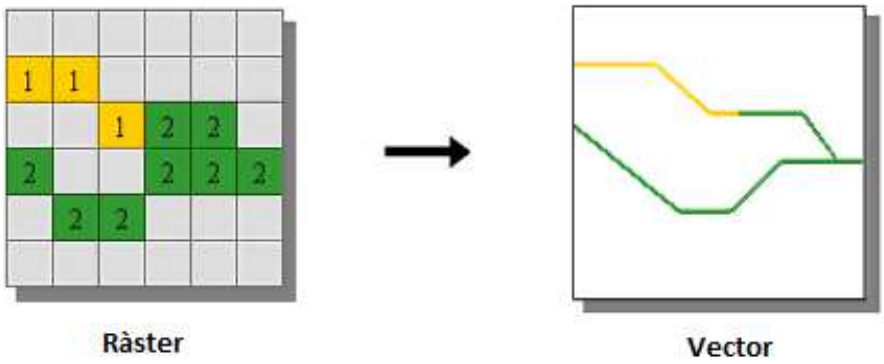

Figura 13. Conversió de ràster a vector. Font: http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/printBooks_topics.cfm?pid=6050

8. Feature Vertice to Point: Aquesta eina permet determinar els punts on es tallen cadascun dels drenatges, és a dir converteix els vèrtexs a punts. Podem determinar un punt a l'inici, la meitat o al final de cada tram de corrent, per a aquest cas ens interessen els punts finals que és on hi ha acumulació de flux i és el punt important per a determinació de les conques.

9. Watershed deliniation: El pas final consisteix a delimitar les conques a partir de l'arxiu ràster de direcció de flux i l'arxiu vectorial de punts creat en l'anterior pas. L'arxiu final serà un ràster on es quedaran delimitades les conques que nodreixen els corrents de flux.

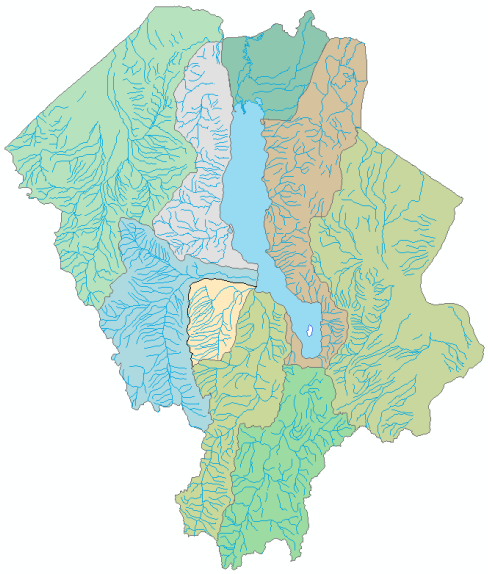

Figura 14. Exemple de delimitació de conques amb l'eina *watershed deliniation.*

3.2 ESTUDI DE LA VARIACIÓ DE LA LÀMINA SUPERFICIAL DEL LLAC

El principal objectiu de la teledetecció es centra en la identificació dels materials de la superfície terrestre i els fenòmens que en ella tenen lloc mitjançant la seva signatura espectral. D'aquesta manera estudia les variacions espectrals , espacials i temporals de les ones electromagnètiques i posa de manifest les correlacions existents entre aquestes i las característiques dels diferents materials terrestres. (Chuvieco, 2002)

El període d'estudi compren des de l'any 1984 fins al 2014 així que s'han utilitzat imatges dels tres satèl·lits (taula 6). El període entre anys per la selecció d'imatges no segueix cap patró concret, sinó el fet de disponibilitat i qualitat de les dades, triant minuciosament aquelles imatges que permetessin mosaicar i estudiar la làmina d'aigua del llac sense problemes tals com excés de nuvolositat sobre el llac o baixa qualitat gràfica de les imatges.

El llac ocupa dues escenes Landsat, per la qual cosa, el primer pas ha estat mosaicar cada parell d'imatges de cada any de la làmina per generar una sola imatge resultant i retallar la zona d'interès per poder centrar l'atenció principalment en el llac.

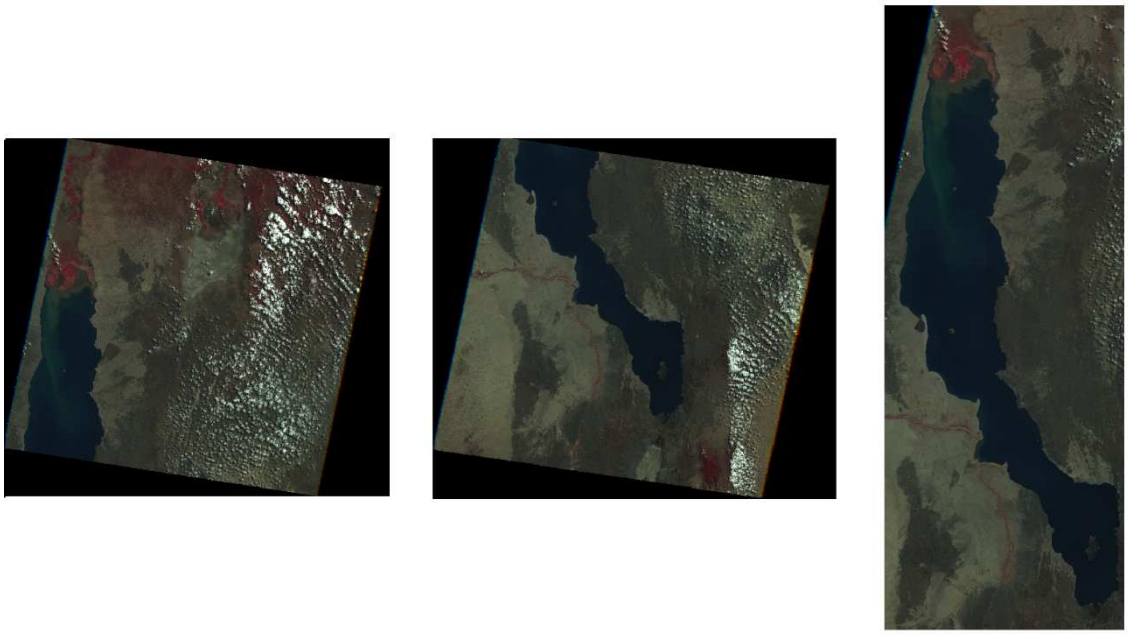

Figura 15. Mosaic i retall del llac Turkana a partir de dues imatges de satèl·lit

Obtingut el mosaic, s'utilitza la calculadora de ràsters i s'aplica el següent índex d'aigua per delimitar clarament la làmina del llac:

$$Index\ d'aigua = \frac{(\ verd - \ infrarroig\ proper)}{(\ verd + \ infrarroig\ proper)}$$

Utilitzem aquesta operació entre bandes perquè la reflectivitat de l'aigua entre aquestes bandes ens permet discriminar el que és aigua del que no ho és ja que la reflectivitat de l'aigua a la banda 2 és molt més baixa que a la banda 5 del satèl·lit Landsat.

Aplicat el càlcul, es fa una selecció per atributs per marcar la superfície d'interès, al utilitzar aquest càlcul, les zones de terra quedaran marcades amb valors negatius i pròxims al zero, mentre que les zones aquoses variaran entre els llindars 0,2 i 1. És de molta importància dedicar temps a l'hora de triar els valors que es seleccionaran en el llindar de delimitació, doncs en funció d'aquest paràmetre es definirà la superfície final del llac. Realitzat això s'obtindrà una mascara de la superfície del llac.

Creada la mascara de la superfície d'aigua, es procedeix a aplicar un filtre de mitjana. Aplicar un filtre a una imatge es simplement aplicar una transformació a la imatge mitjançant operacions locals; el filtre de mitjana s'utilitza principalment per suavitzar una imatge treient-li els sorolls. El soroll es la variació aleatòria que no es correspon amb la realitat de la brillantor o el color en les imatges digitals produït per el dispositiu d'entrada, en aquest cas, el sensor del satèl·lit. En aquest mètode de filtrat cada píxel central d'un conjunt de 3x3 es substitueix per la mitja dels 9 píxels (A. Arozarena Villar). Aplicat el filtre obtindrem una nova màscara.

Realitzat el càlcul, es vectoritzarà la làmina d'aigua resultant. Tot aquest procediment s'aplica a tots els anys obtenint així un arxiu vectorial per a cada any analitzat.

Un cop creades totes les màscares de la làmina per cada any d'estudi, es procedeix fer a una combinació analítica entre capes per poder comparar les variacions de la superfície del llac i mesurar en cadascuna d'elles la superfície total i l'increment o disminució del llac sabent que cada píxel té una resolució de 30m x 30m, és a dir 900 metres quadrats.

3.3 ANÀLISI DE PRECIPITACIÓ

El software utilitzat ha estat SPIRITS (*Software for the Processing and Interpretation of Remotely Sensed Images Time Series*). Es tracta d'un programari lliure basat en Windows amb l'objectiu d'analitzar les dades d'observació de la Terra obtingudes per teledetecció. Tot i que inclou una àmplia gamma de funcionalitats d'ús general, l'atenció se centra en el tractament de sèries temporals d'imatges, que derivin dels sensors de baixa resolució, com ara SPOT-Vegetation, NOAA-AVHRR, METOP-AVHRR, TERRA-MODIS, ENVISAT-MERIS i MSG-SEVIRI (Herman Eeren & Dominique Haesen,2013).

Un cop conegut àmpliament tota la funcionalitat i possibilitats que ens ofereix el programa s'ha seguit una metodologia concreta amb l'objectiu d'extreure estadístiques de precipitació i estadístiques de vegetació.

1. Extracció d'estadístiques de precipitació mensuals mitjanes:

El primer pas per a extreure estadístiques de precipitació a estat importar i renombrar els fitxers de dades ja que el programari utilitza una menció especial per als seus fitxers basada en la següent estructura:

$$prefixDATAsubjecte.format$$

En aquest cas s'ha optat per nombrar els arxius seguint una estructura fixa de data i subjecte i nomes variant el nom del prefix per indicar l'acció realitzada pel programa. En el cas per exemple de l'extracció de les dades s'han renombrat de la següent manera, fent el valor *DATA* referència a l'any i al mes de la dada:

$$extract19890101turk.img$$

Un cop renombrats els fitxers de dades de precipitació, el següent pas consisteix en extreure la regió d'interès o zona d'estudi i en aquest cas s'ha optat per utilitzar la regió de les conques hidrogràfiques del Llac.

Definides les àrees d'estudi per extreure estadístiques dins el programa és necessari disposar de cartografia de la zona. Ens demana un mapa de la regió, creat anteriorment en l'apartat de delimitació de conques hidrogràfiques i un mapa d'usos del sòl,

descarregat prèviament el GLC2000 (Diversos autors, 2003. A land cover map of Africa, European Commission - JRC). El mapa d'usos del sòl descarregat s'ha editat amb ArcMap 10 per extreure exactament la mateixa àrea de les conques hidrogràfiques que s'ha fet servir com a regió d'interès de la zona d'estudi. A més a més de retallar la zona d'estudi s'ha fet una agrupació dels usos del sòl en cinc: bosc, arbustos, praderies, terres de cultiu i aigua.

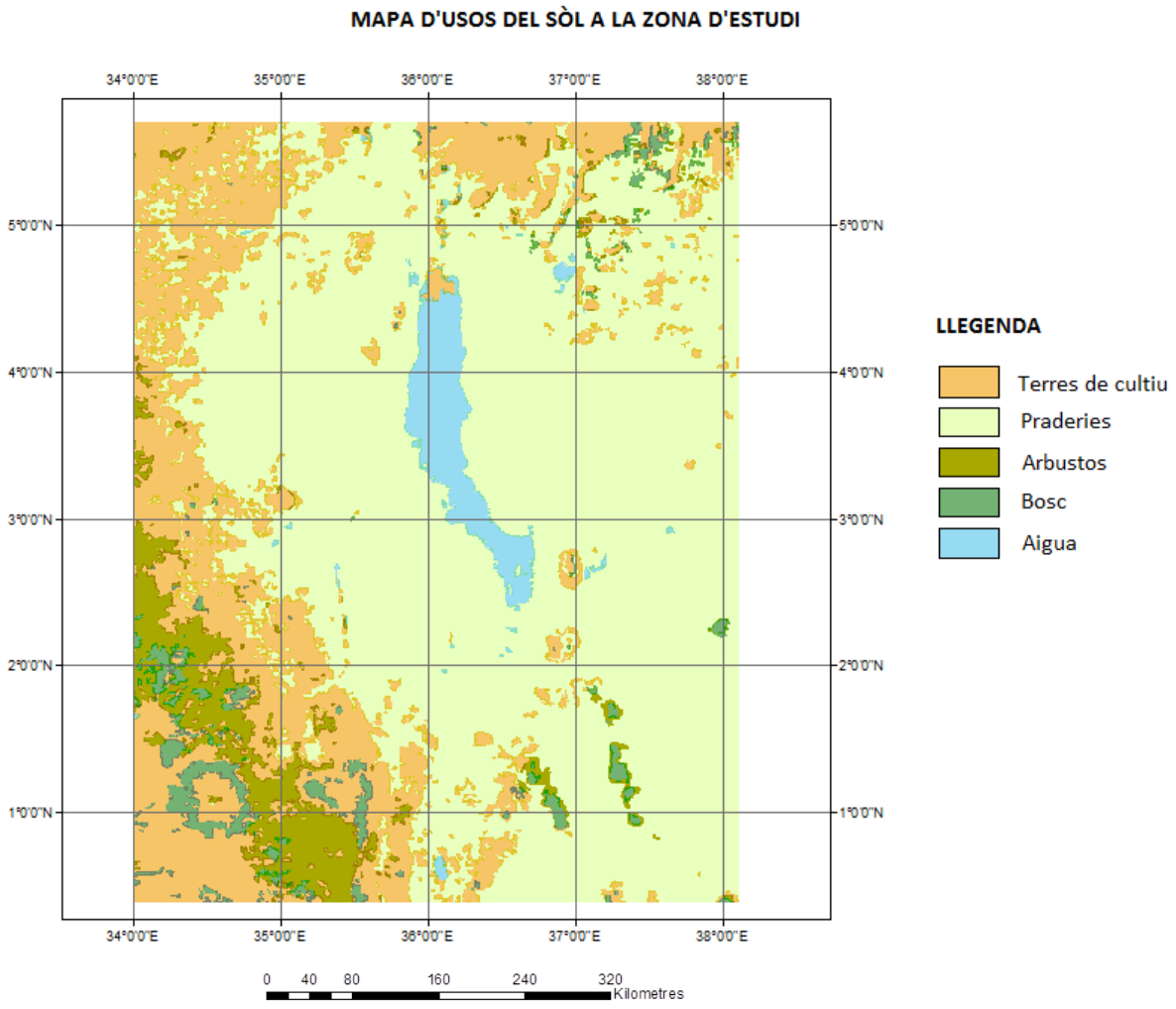

Figura 16. Mapa d'usos del sòl generat a partir del *Global Land Cover* 2000

Introduint aquesta cartografia, el programari ens deixa llibertat per triar certes possibilitats a l'hora d'extreure les estadístiques com la periodicitat d'aquestes, incloure nomes estadístiques de la regió o extreure-les conjuntament sobre els usos del sòl,

carregar els fitxers resultants al processador d'estadístiques propi del programa i una llarga llista d'opcions.

En aquesta primera extracció s'ha optat per utilitzar directament les dades de precipitació, amb una periodicitat mensual al llarg dels 29 anys de la seqüència de dades i s'ha extret una sèrie temporal mensual de pluja al llarg dels anys de l'estudi per obtindré les precipitacions mitjanes de cada mes.

Obtingudes les dades mensuals de precipitació s'ha decidit processar-les amb Excel per extreure una mitjana de tots els mesos:

$$\bar{X} = \frac{X_1 + \cdots + X_n}{n}$$

I la desviació estàndard per al total de mostres obtingudes, en aquest cas 348 ja que tenim mostres durant 29 anys i 12 mesos cadascun:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(X_i - \bar{X})^2}$$

Calculades la mitjana i la desviació estàndard, a cada mostra mensual se li ha aplicat el següent càlcul per extreure les anomalies de pluja:

$$anomalia\ estandaritzada = \frac{(mostra\ mensual - mitjana)}{desviació\ estandard}$$

Les anomalies són un indicador destinat a expressar el comportament pluviomètric d'un més en relació amb el que es considera que hauria de ser normal per aquell mes.

Conegudes les dades de precipitació mitjana de cada mes i les anomalies mensuals procedim a crear un gràfic general de precipitació mensual al llarg de tota la sèrie temporal i un altre gràfic amb les anomalies obtingudes per a una posterior comparació i anàlisis.

2. Extracció d'anomalies

A pesar de que hem calculat les anomalies de precipitació amb l'ajuda d'Excel, el programa SPIRITS també ens ofereix l'interessant opció de calcular en funció d'un més en concret; així doncs, amb les mateixes dades ja renombrades i retallada la regió d'interès procedim a aplicar un càlcul històric per anys.

L'objectiu d'aquest TFC és crear una sèrie d'imatges amb la mitjana a llarg termini per cada mes de l'any. Això generalment és necessari per a totes les operacions que computen anomalies, comparar l'estat actual amb la mitjana a llarg termini, com ara imatges de diferència o perfils estacionals.

Normalment s'utilitza la definició d'any històric per definir una mitjana per a una sèrie temporal. Sovint és útil en l'estudi de precipitacions comparar la temporada actual amb situacions de referència anteriors. (Herman Eeren & Dominique Haesen,2013).

Obtinguts els fitxers resultants es pot observar els següents resultats amb una nomenclatura pròpia del programa que no ens indica uns anys concrets de l'estudi sinó un nom per definir quin càlcul d'any històric s'ha dut a terme:

- Anys 1950-1960: els fitxers renombrats amb aquest nom contenen les imatges de mínims i màxims, respectivament, per cada any de la sèrie temporal.
- Any 1961: nombre de mesures vàlides de sèrie plurianual.
- Any 1962: mitjana.
- Any 1963: la desviació estàndard.

El següent pas consisteix en calcular les anomalies a partir de l'any històric 1962 i 1963, és a dir, mitjana i desviació estàndard. La diferència estandarditzada dóna una idea de l'excepcionalitat que presenten les dades mitjanes de cada mes comparades amb les sèries històriques.

Com a arxiu de sortida obtenim arxius d'anomalies per a cada més de la sèrie temporal. Aquesta sèrie de mapes es pot agrupar per obtenir la freqüència de les anomalies i poder crear mapes de freqüència d'anomalies positives i negatives.

3.4 ANÀLISI DE VEGETACIÓ

No és fàcil parlar de la vegetació que predomina a la regió del llac Turkana, degut al clima hostil de la zona, però s'ha aprofitat la bona funcionalitat de SPIRITS per seguir estudiant el llac amb sèries temporals de vegetació per a la futura comparació i anàlisis juntament amb els resultats obtinguts de les dades de precipitació i la variació de la capa superficial del llac.

El *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) serveix bàsicament per a mesurar el creixement de les plantes, determinar cobertes vegetals i controlar la producció de biomassa. Els sensors dels satèl·lits obtenen informació de regions de l'espectre electromagnètic. Doncs bé, l'NDVI es calcula a partir de la informació obtinguda del vermell i de l'infraroig proper, amb la següent fórmula:

$$NDVI = \frac{infraroig\ proper - vermell}{infraroig\ proper + vermell}$$

El càlcul del NDVI produeix una mitjana quantitativa que està relacionada amb les condicions de la vegetació i la biomassa. Els valors d'aquest índex oscil·len entre -1 i 1 i diversos estudis i publicacions científiques assenyalen que els valors per sobre de 0,1 indiquen presència de vegetació i quan més alt sigui el valor indicarà la presència de més frondositat i qualitat de la vegetació (Compton J. Tucker).

1. <u>Preparació de les dades</u>

Així doncs, un cop tenim les dades SPOT-VGT descarregades , s'extrauran mitjançant el programari VGTExtract, disponible gratuïtament des de la següent pàgina web: http://www.agricab.info/software/Pages/VGTExtract.aspx.

VGTExtract és un programa senzill, útil i gratuït que s'utilitza per la integració automatitzada dels productes bases i derivats de SPOT-VGT per a la seva posterior anàlisi, processament o visualització amb altres eines de Teledetecció (Herman Eeren & Dominique Haesen,2013).

Les dades descarregades comprenen tot el continent Àfrica i es retallen directament en l'extracció, per la qual cosa s'han marcat com a valors de retall les coordenades geogràfiques següents:

X màxima: 38,1 E Y màxima: 5,7 N

X mínima: 34 E Y mínima: 0,4 N

Cal remarcar en les especificacions tècniques el format de sortida dels arxius, en aquest cas ENVI i el nom de sortida de la sèrie de dades temporals que s'obtindrà.

2. Prepocessat de les dades de vegetació

Seguint el mateix procés utilitzat anteriorment amb les dades de precipitació, es procedeix a extreure gràfiques NDVI mensuals per al conjunt d'anys que avarca des del gener del 1999 fins al desembre de 2013.

Es procedeix a editar les metadades dels arxius ja que em de fer constar valors de píxel de les imatges que SPIRITS no reconeixeria, així dons introduïm la informació corresponent per deixar constància al programari dels següents valors de píxel:

- 251: sense dades
- 252: núvols
- 253: neu
- 254: aigua
- 255: fons d'imatge

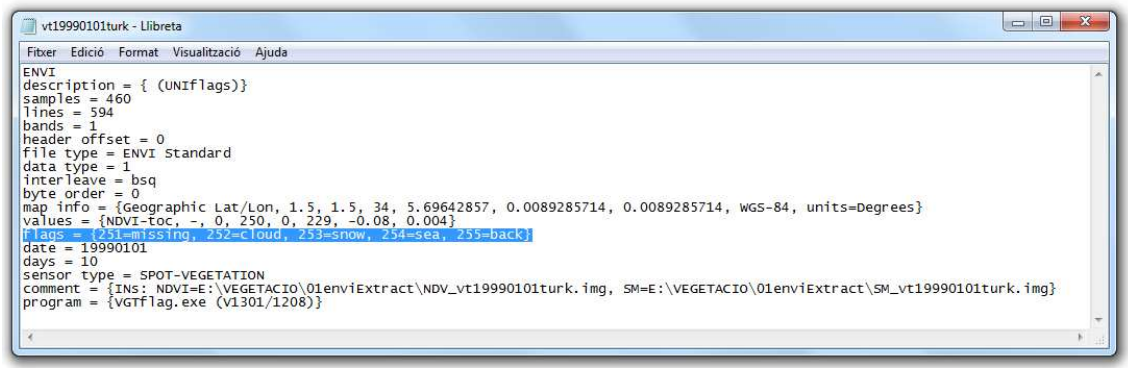

Figura 17. Exemple de l'edició de les metadades

Les dades SPOT-VGT són de 10 dies consecutius durant un mes i les dades de precipitació les obtenim en mensualitats, s'agruparan en mesos per al futur estudi i comparació. Per a crear aquests nous arxius, les dades d'NDVI s'agrupen a mensuals aplicant el criteri de màxim valor per a cada un dels píxels.

Un cop s'obtenen les dades mensuals, es procedeix a calcular les anomalies en funció del mateix mes per a tot el període de temps, per tant es necessita la mitjana de cadascun dels mesos (gener, febrer...) i la desviació estàndard. Aconseguit això s'han realitzat dues estadístiques, una per tota la zona d'estudi i una altra en funció dels usos del sòl.

A més a més s'ha obtingut un mapa de freqüència d'anomalies positives i negatives per la zona d'estudi.

4 RESULTATS OBTINGUTS

En aquest apartat es mostra un resum dels resultats obtinguts com són la delimitació de les conques hidrogràfiques, la delimitació de la superfície del llac i els anàlisis de precipitació i vegetació.

4.1 CONQUES HIDROGRÀFIQUES

Amb el fitxer resultat obtingut en l'extracció de les conques hidrogràfiques, que no implica que aportin aigua al llac tot l'any, podem apreciar que el llac Turkana està proveït per nou conques amb multitud d'afluents. Aquest fet comportaria esperança a la no desaparició del llac si no fos perquè el clima de la zona amb una combinació d'altes temperatures i fortes brises afavoreixen l'evaporació de qualsevol gota d'aigua. Així doncs la generació de les conques ha servit per a poder estudiar sobre elles mateixes les sèries temporals de precipitació.

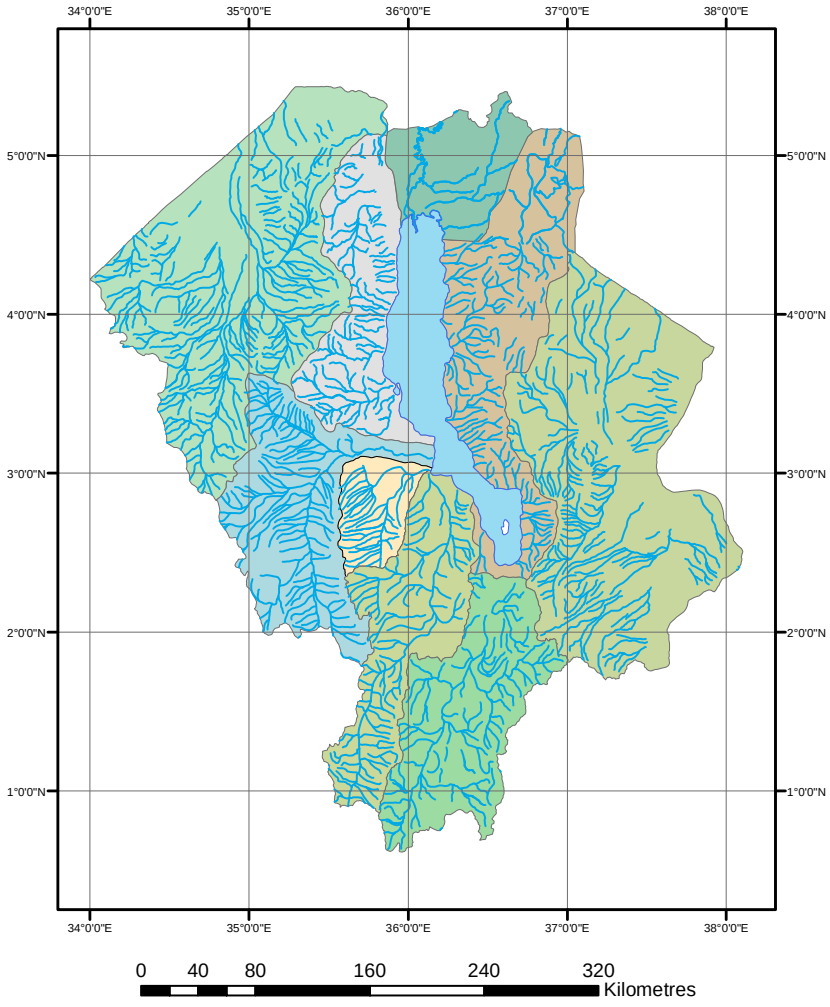

Figura 18. Imatge resultat de les conques hidrogràfiques

4.2 ANÀLISI DE PRECIPITACIÓ

Inicialment estudiarem les dades procedents de les estacions meteorològiques per comparar-les posteriorment amb les estimacions de precipitació per satèl·lit.

4.2.1 ESTACIONS METEOROLÒGIQUES DE MOYALE I ELDORET

Els resultats obtinguts mitjançant dades de precipitació de les estacions de Moyale i Eldoret són les figures 19 i 20 que mostren la precipitació mesurada comparant-la amb una estimació teòrica proporcionada per l'estació meteorològica de com hauria de ploure a la zona:

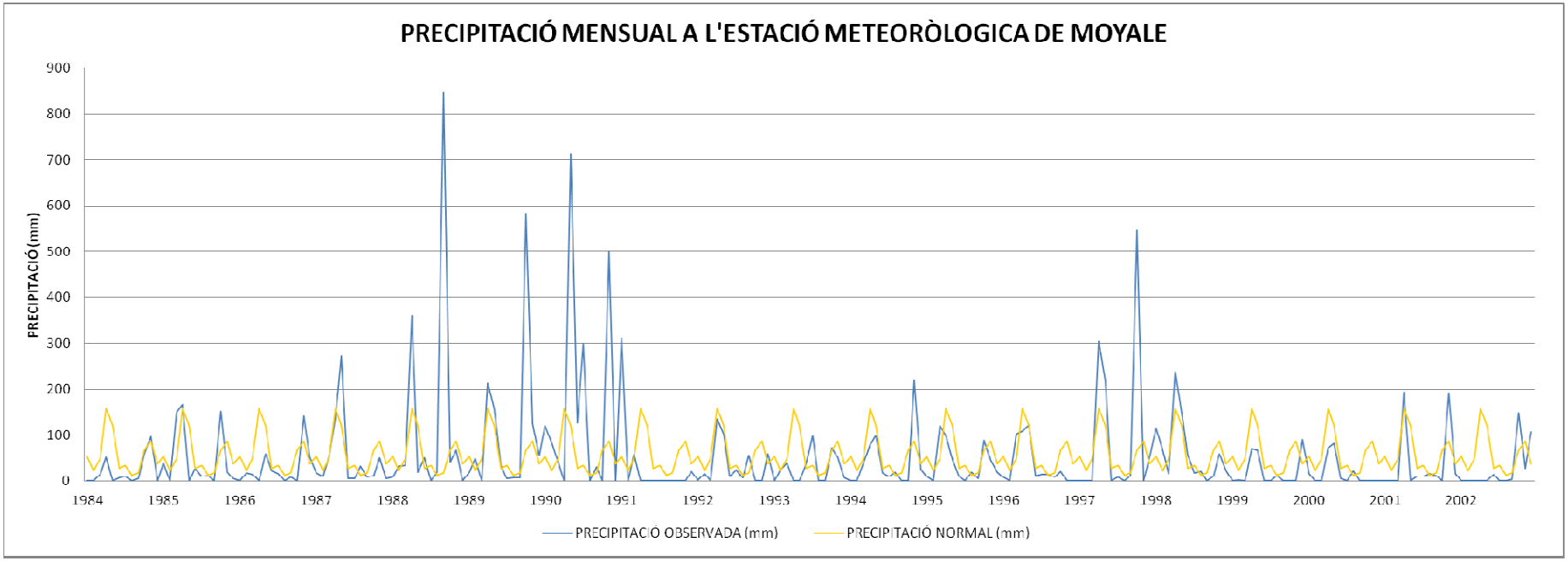

Figura 19. Precipitació mensual a l'estació meteorològica de Moyale (Kenya) entre els anys 1984 i 2002

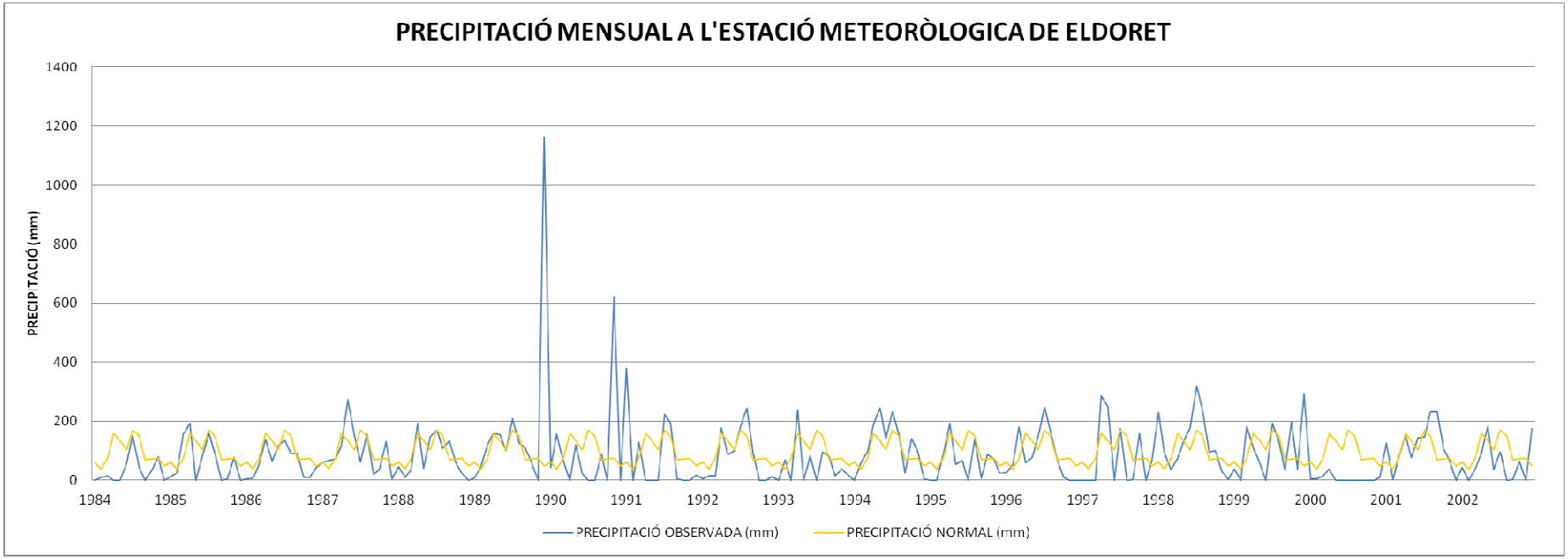

Figura 20. Precipitació mensual a l'estació meteorològica de Eldoret (Kenya) entre els anys 1984 i 2002

El fet de que les dades vagin de l'any 1984 al 2002 es deu a la disponibilitat d'aquestes ja que no hi han dades disponibles als anys posteriors al 2002. Aquest fet però no impedeix veure l'històric de precipitació en les corresponents estacions meteorològiques i es pot comprovar que les dues segueixen més o menys l'estacionalitat de les pluges però que en molts mesos es donen pics màxims i mínims no previstos en l'estimació de precipitació teòrica proporcionada per l'estació meteorològica.

4.2.2 ESTIMACIÓ DE PRECIPITACIONS PER SATÈL·LIT

Amb les dades de precipitació obtingudes per satèl·lit i proporcionades per el USGS FEWS NET, s'han pogut extreure els següents gràfics d'estimació de precipitació a la zona:

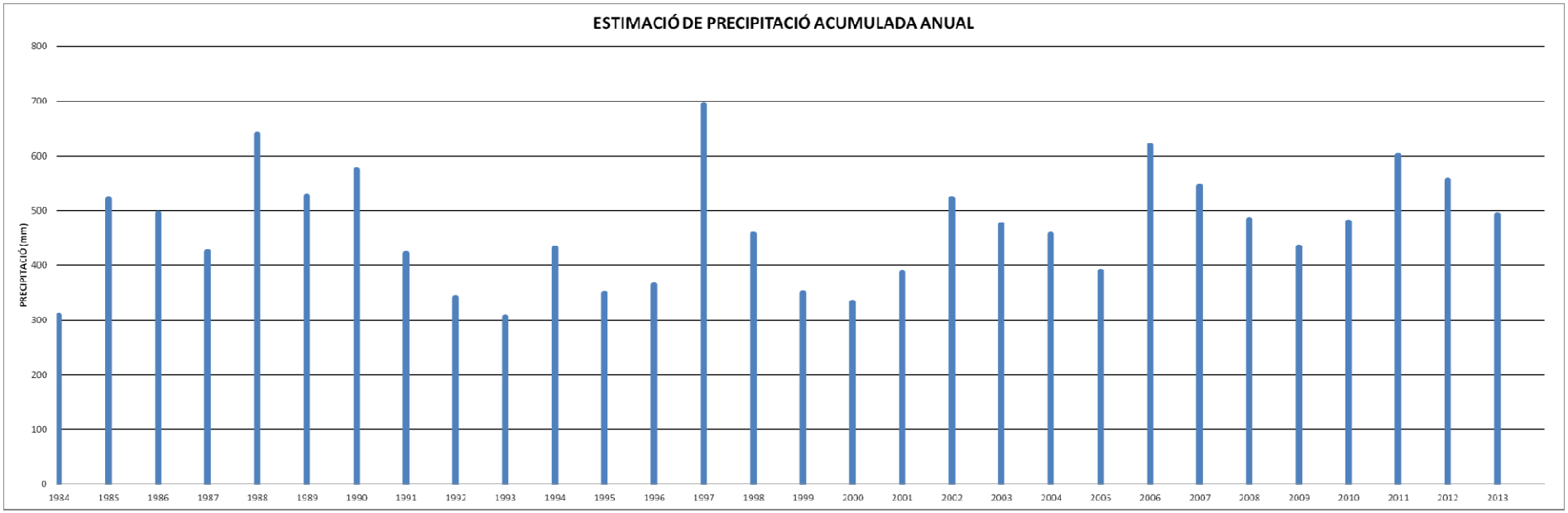

Figura 21. Estimació de precipitació acumulada anualment (1984-2013)

Com es pot veure en la figura 21, l'any que va ploure més és el 1997 amb un valor de 694,18 mm acumulats durant l'any. Els valors mínims els tenim en els anys 1984 i 1993 amb uns valors de 309,58mm I 306,56mm respectivament.

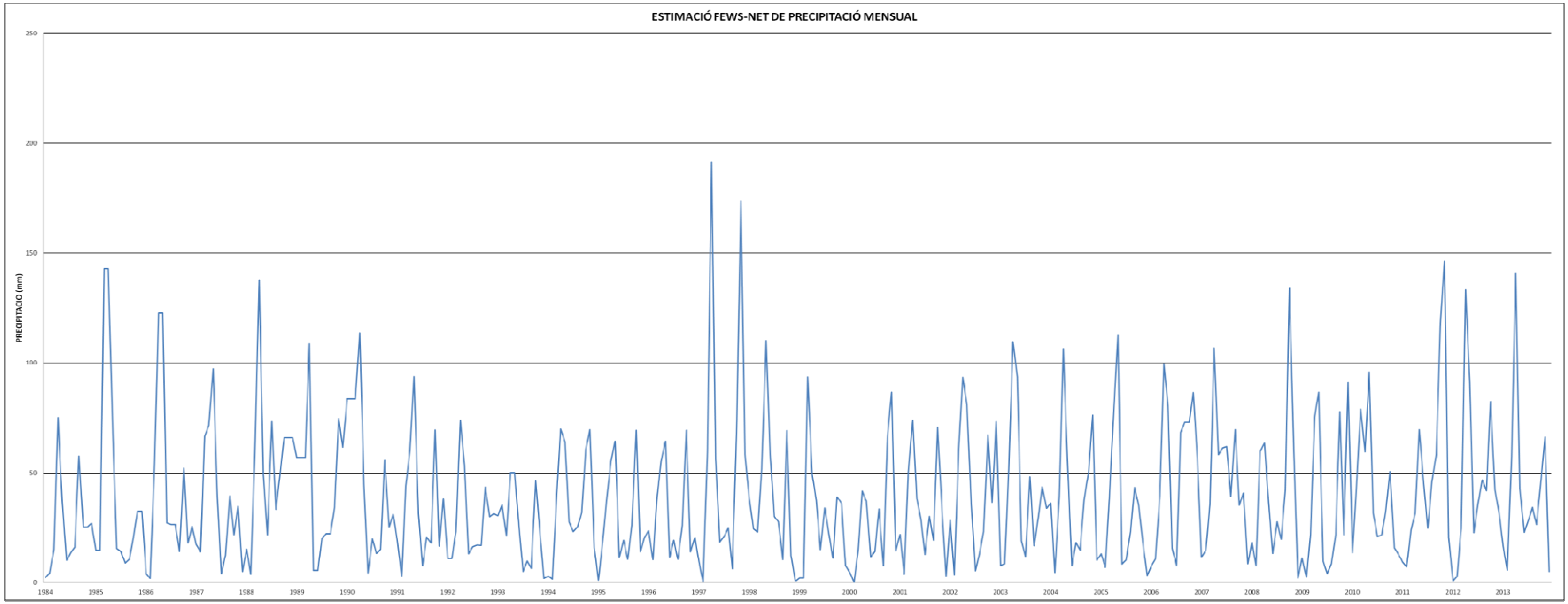

Figura 22. Estimació de precipitació mensual (1984-2013)

En la figura 21, es pot comparar la precipitació acumulada anualment i es pot veure que efectivament, el pic màxim de la figura 21 corresponent a l'any 1997 concorda amb el pic màxim de precipitació mensual on es veu clarament que les dues estacions de pluges de l'any 1997 es marquen com pics màxims. En la figura 22 es pot observar clarament l'estacionalitat de pluges de la zona amb una estació plujosa entre març i juny i una estació menor entre octubre i desembre. No obstant tenint dues estacions plujoses, els nivells de pluja presenten valors molt petits fet que indica que plou molt poc a la zona on les sequeres són molt freqüents.

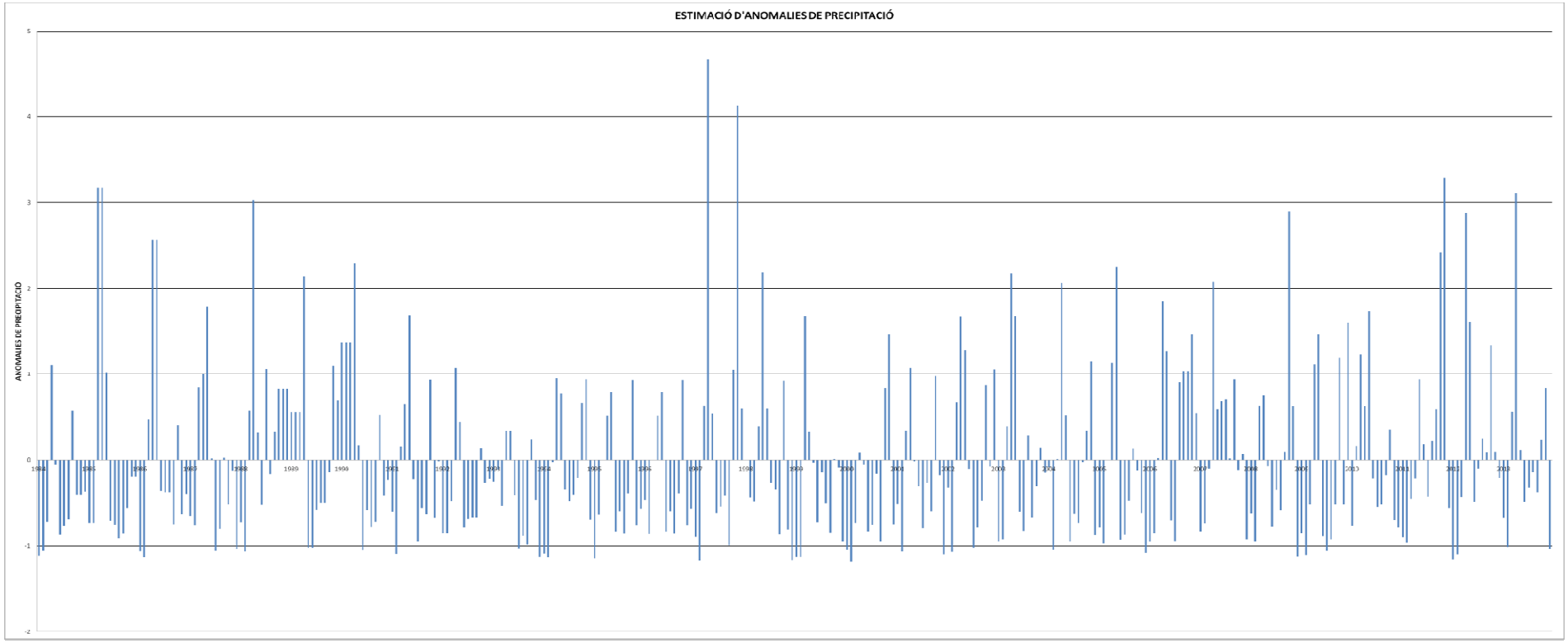

Figura 23. Estimació d'anomalies mensuals de precipitació (1984-2013)

Com es pot apreciar en la figura 23 , es produeixen dos pics d'anomalies positives mensuals de pluja exactament en els mateixos pics màxims de precipitació mensual vistos en la figura 22. Es pot observar que les anomalies negatives tenen una forta presència, fet que remarca les constants sequeres per falta de pluja a la zona tot i que en les èpoques d'estacions plujoses, les anomalies positives incrementen.

4.2.3 COMPARACIÓ ENTRE DADES DE PRECIPITACIÓ OBSERVADES I DADES DE PRECIPITACIÓ ESTIMADES PER SATÈL·LIT

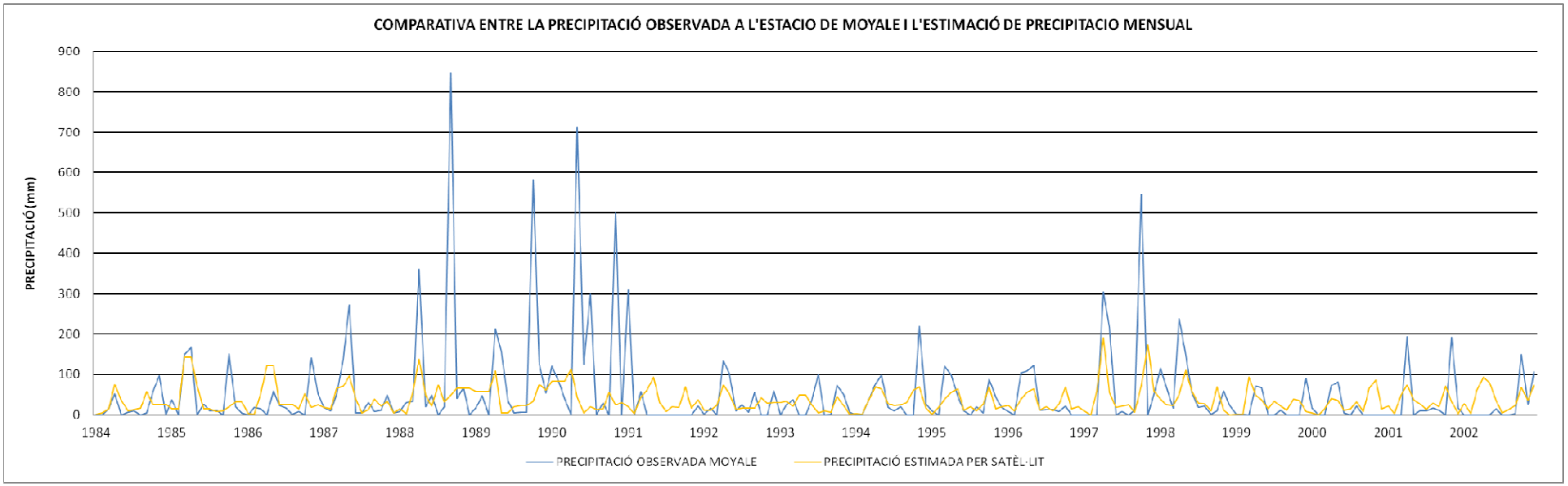

Figura 24. Comparació entre la precipitació mensual observada a l'estació de Moyale i la precipitació estimada (1984-2002)

A l'hora de comparar les dades observades de l'estació de Moyale amb l'estimació calculada, es pot veure que en l'interval dels anys 1988 al 1990, es van registrar importants quantitats de precipitació. A més a més s'observen també els pics màxims de l'any 1997 comentats anteriorment.

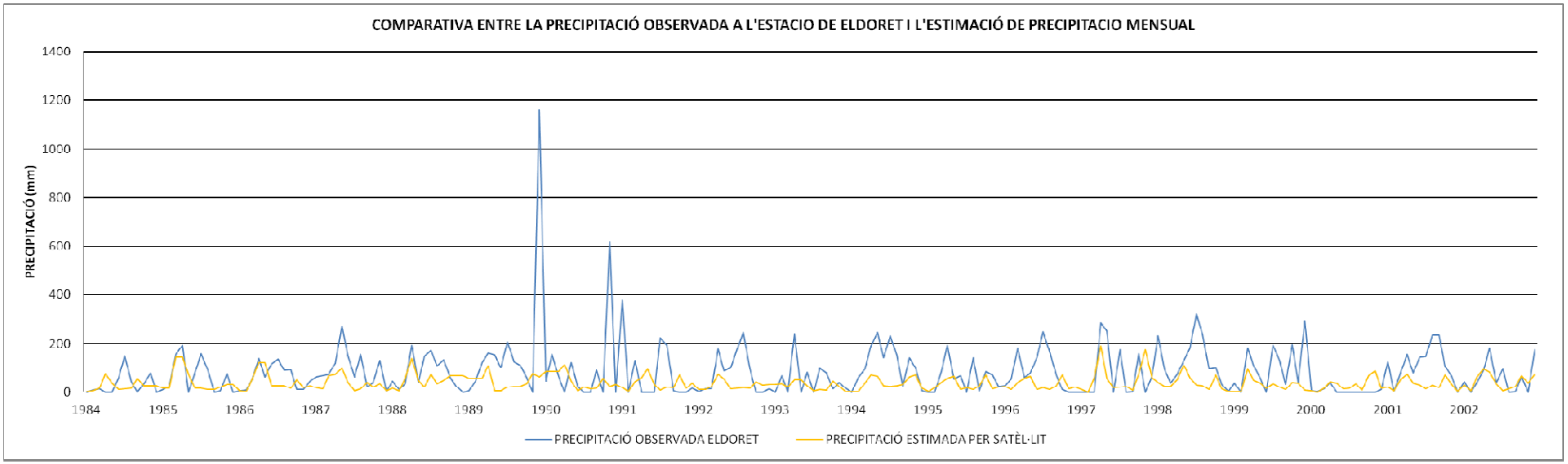

Figura 25. Comparació entre la precipitació mensual observada a l'estació de Eldoret i la precipitació estimada (1984-2002)

L'estació de Eldoret al trobar-se allunyada de la zona d'estudi no presenta uns resultats acord amb la precipitació obtinguda per satèl·lit a la zona d'estudi. Aquest fet doncs segueix una clara lògica ja que no plou mai exactament igual sobre dos llocs diferents i, per altre part, s'ha pogut observar que en les dades d'ambdues estacions els valors corresponents a zero no representen la nul·la observació de precipitació sinó la manca de dades del més corresponent.

4.3 OBTENCIÓ DE LA SUPERFICIE DEL LLAC TURKANA

Obtinguda la superfície del llac per als anys corresponents i efectuades les mesures de la superfície coneguda, els resultats obtinguts s'han comparat entre ells en anys consecutius i finalment s'ha comparat la làmina del primer any de l'estudi amb la làmina de l'últim any per a poder veure així la diferència final.

Com es pot veure en les làmines extretes, en la figura 26 a la dreta es mostra la pèrdua de superfície que va patir el llac entre els anys 1984 i 1989 i a l'esquerra de la mateixa figura es mostra la disminució que es va produir entre els anys 1989 i 1995.

La figura 27 a la dreta mostra una important inundació que va tenir lloc entre l' interval dels anys 1995 i 1999 on s'ha vist que és un interval on hi van haver importants pics d'anomalies positives de precipitació a la zona. La figura de l'esquerra en canvi torna a mostrar nivell d'assecament al llac entre els anys 1999 i 2001.

La figura 28 segueix mostrant la tendència de pèrdua de superfície tant entre els anys 2001 al 2010 i la figura 29 a la dreta mostra encara més pèrdua de superfície entre els anys 2010 fins al 2014.

Finalment s'ha fet una comparació entre les làmines del 1984 i el 2014 com es pot veure en figura 29 a l'esquerra en la qual es s'aprecia amb claredat la superfície total assecada al llarg dels 30 anys.

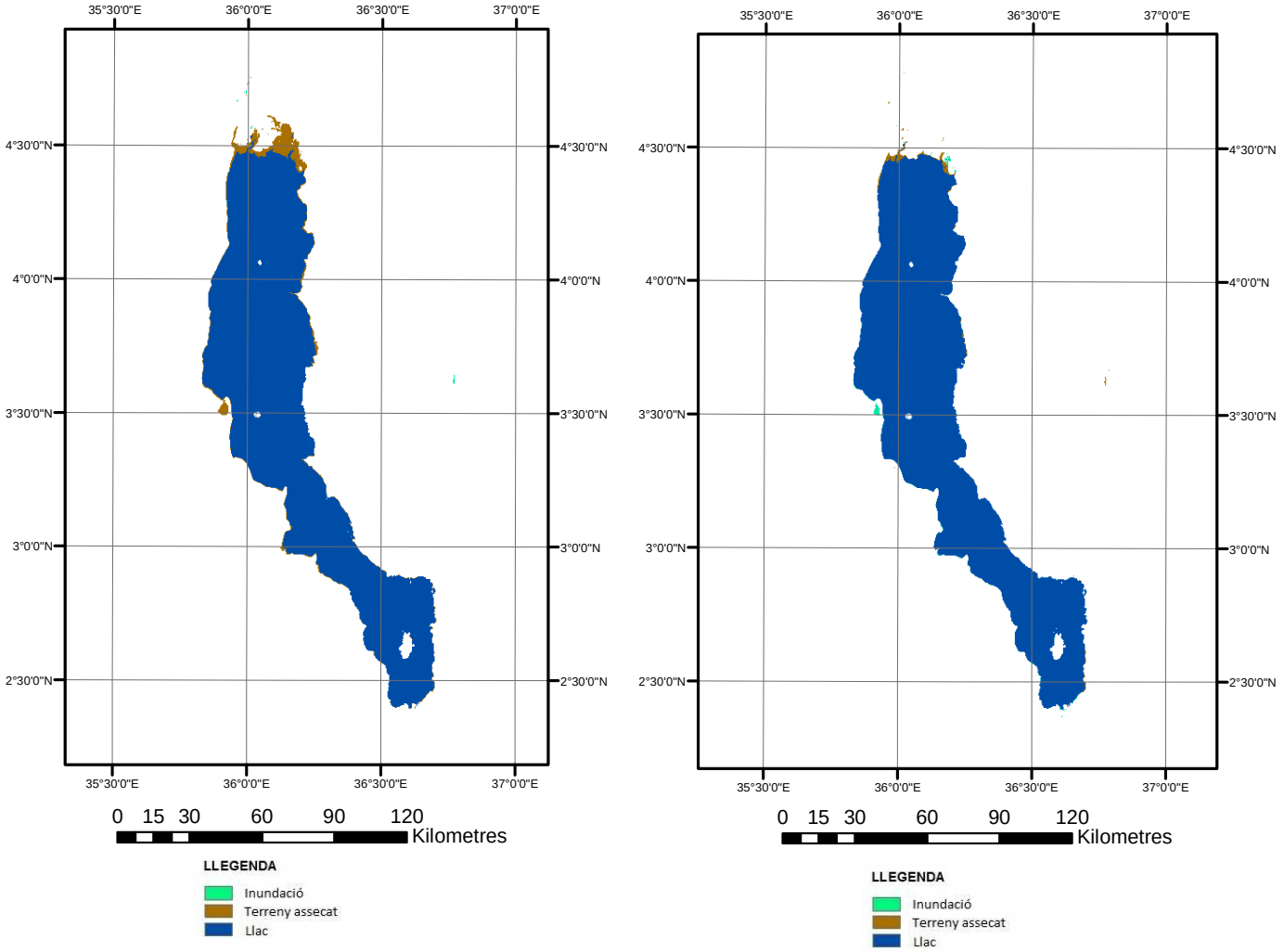

Figura 26. Dreta: comparativa entre les làmines dels anys 1984 i 1989. Esquerra: comparativa entre les làmines dels anys 1989 i 1995

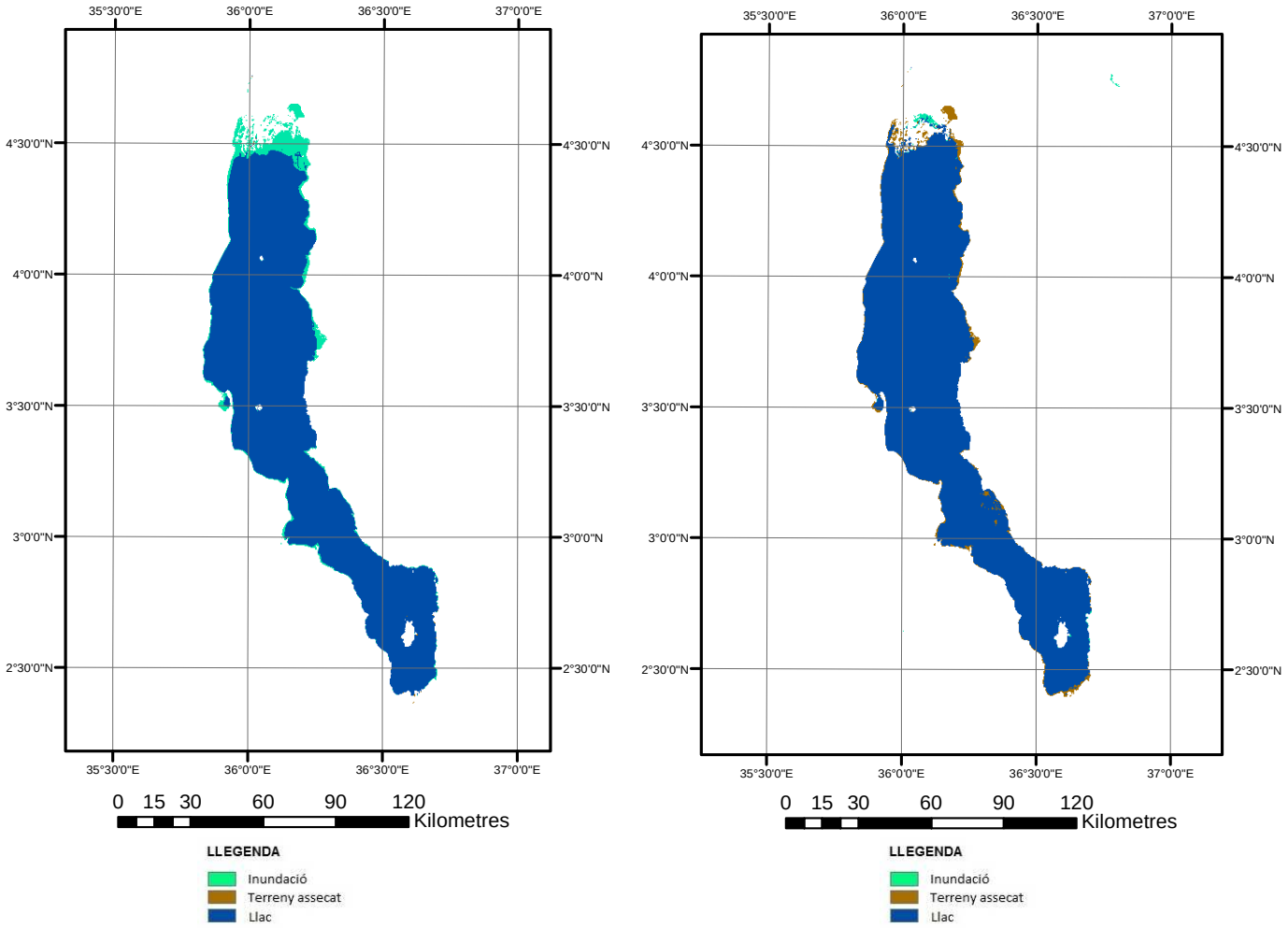

Figura 27. Dreta: comparativa entre les làmines dels anys 1995 i 1999. Esquerra: comparativa entre les làmines dels anys 1999 i 2001

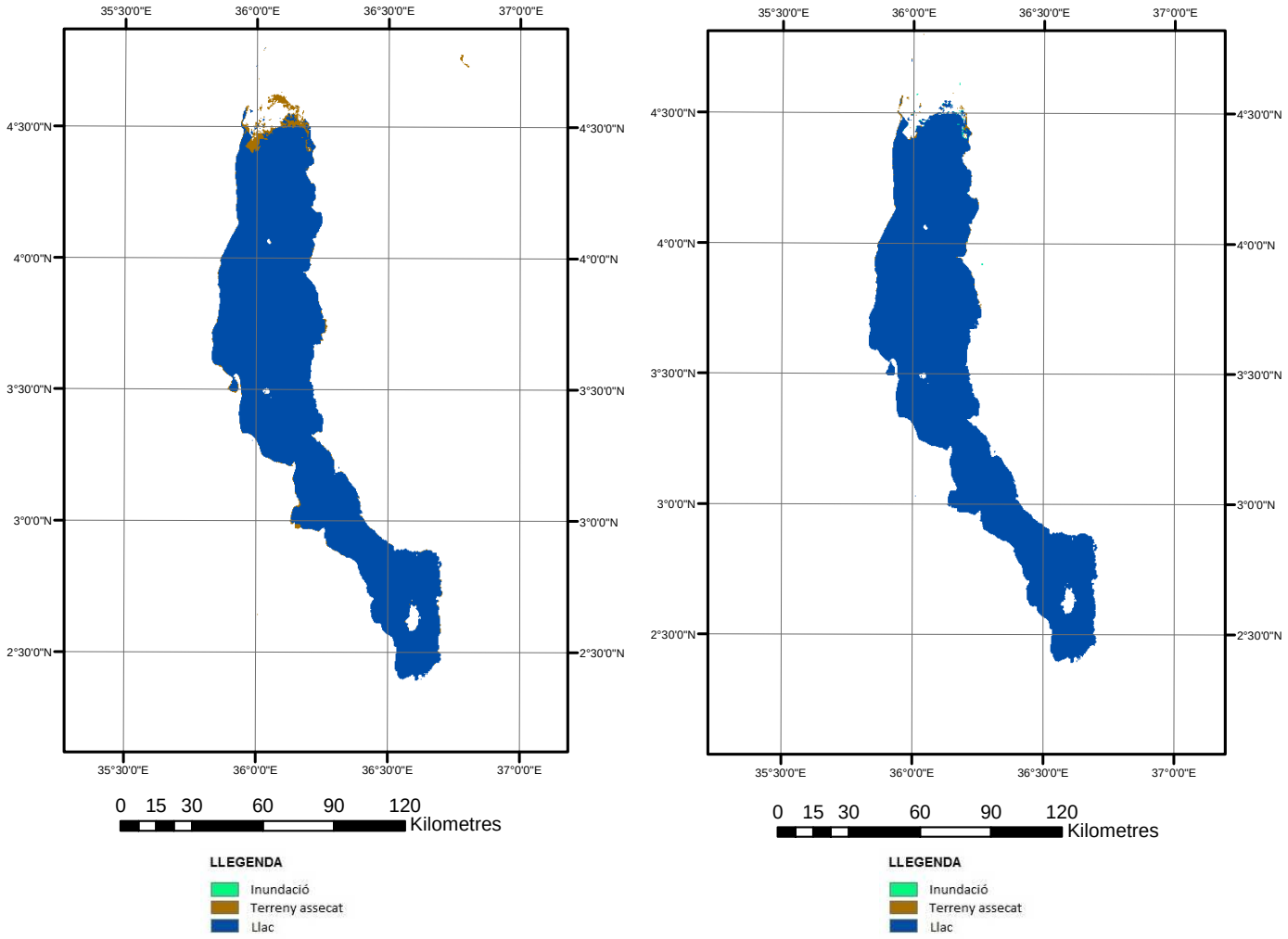

Figura 28. Dreta: comparativa entre les làmines dels anys 2001 i 2009. Esquerra: comparativa entre les làmines dels anys 2009 i 2010

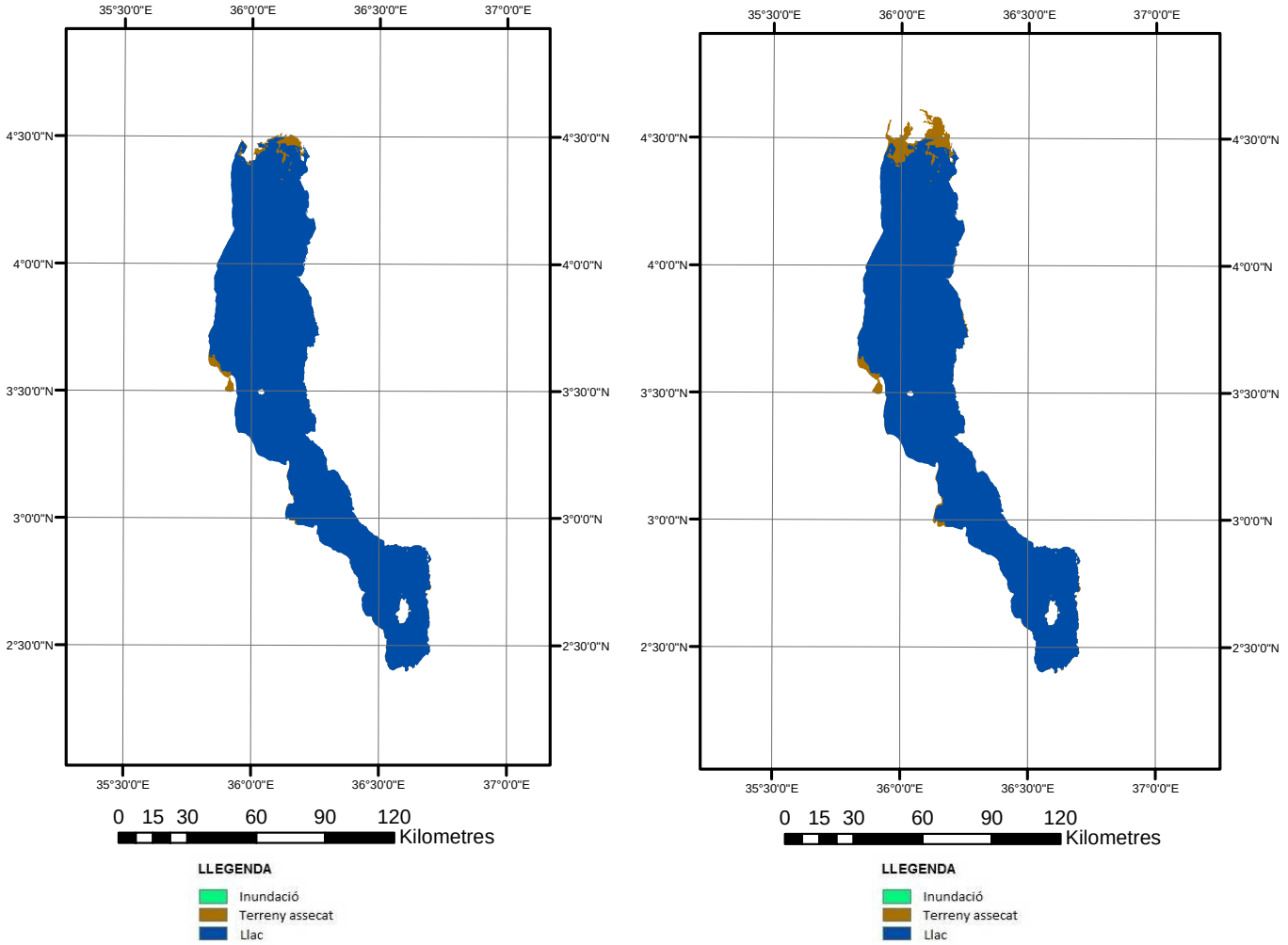

Figura 29. Dreta: comparativa entre les làmines dels anys 2010 i 2014. Esquerra: comparativa entre les làmines dels anys 1984 i 2014

Les mesures de la superfície de cada any així doncs són les següents:

Any	Superfície làmina d'aigua (ha)
1984	738157,686
1989	706035,111
1995	702144,007
1999	751035,455
2001	734054,007
2009	718198,438
2010	715694,422
2014	711314,628

Taula 7. Superfície de la làmina del llac per anys

Com es pot veure en la figura 30, la superfície del llac té tendència negativa excepte en l'any 19999, quan pren el seu valor màxim. No obstant això, a partir d'aquest pic màxim la làmina segueix la tendència descendent fins a l'actualitat.

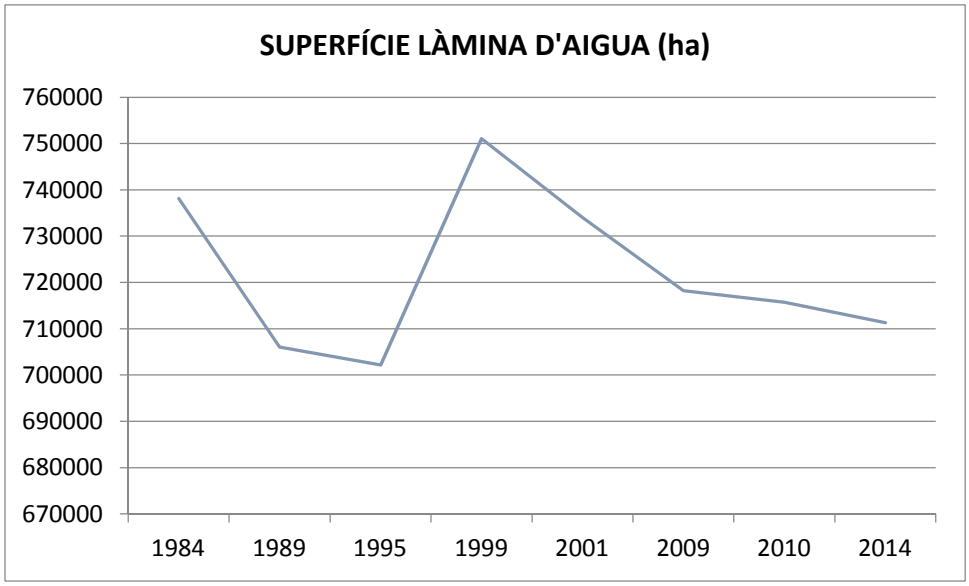

Figura 30. Variació de la làmina superficial del llac al llarg dels anys de l'estudi (1984-2014)

Les diferencies entre les superfícies dels anys queden resumides en la següent taula on es pot veure l'increment entre els anys 1995 i 1999 i la variació final entre el primer any i l'últim:

Anys	Diferència de superfície
1984-1989	-32122,575
1989-1995	-3891,104
1995-1999	+48891,448
1999-2001	-16981,448
2001-2009	-15855,569
2009-2010	-2504,016
2010-2014	-4379,794
1984-2014	-26843,058

Taula 8. Variació de la làmina superficial del llac entre anys i variació final

Així dons, la disminució de la superfície del llac entre el 1984 i el febrer del 2014 ha estat finalment de 26843,058 hectàrees, superfície que equivaldria al doble de la superfície de la comarca del barcelonès.

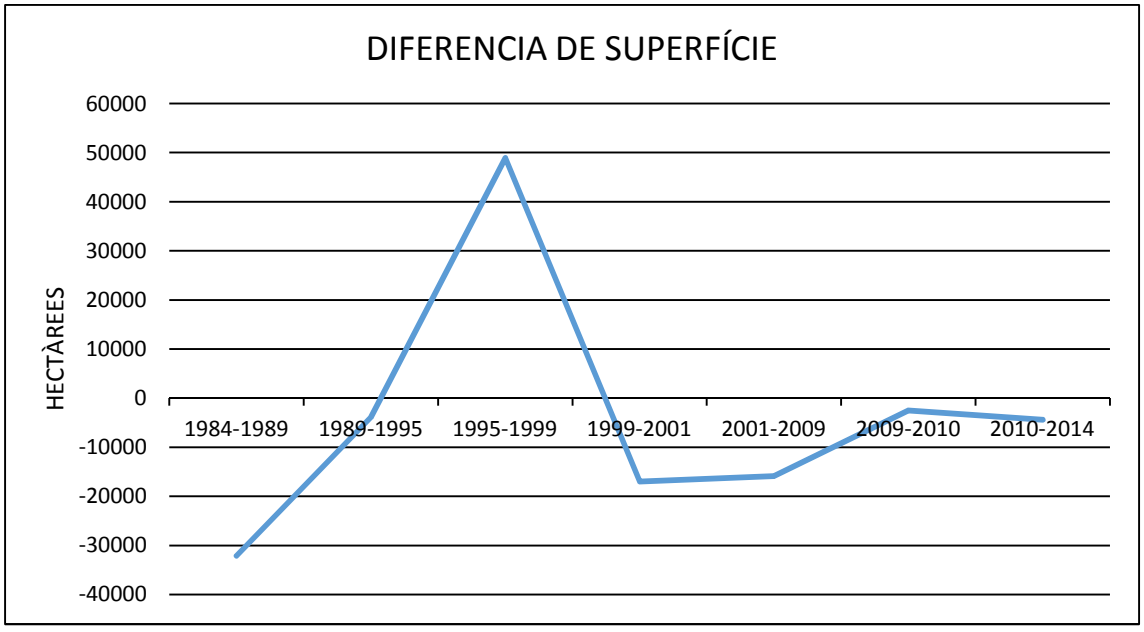

Figura 31. Diferència de superfície entre anys consecutius.

4.4 COMPARATIVA ENTRE LA DINÀMICA DE LA VEGETACIÓ I LA PRECIPITACIÓ

Extret l'índex de vegetació NDVI i calculades les anomalies de vegetació i precipitació, s'ha obtingut el següents gràfic:

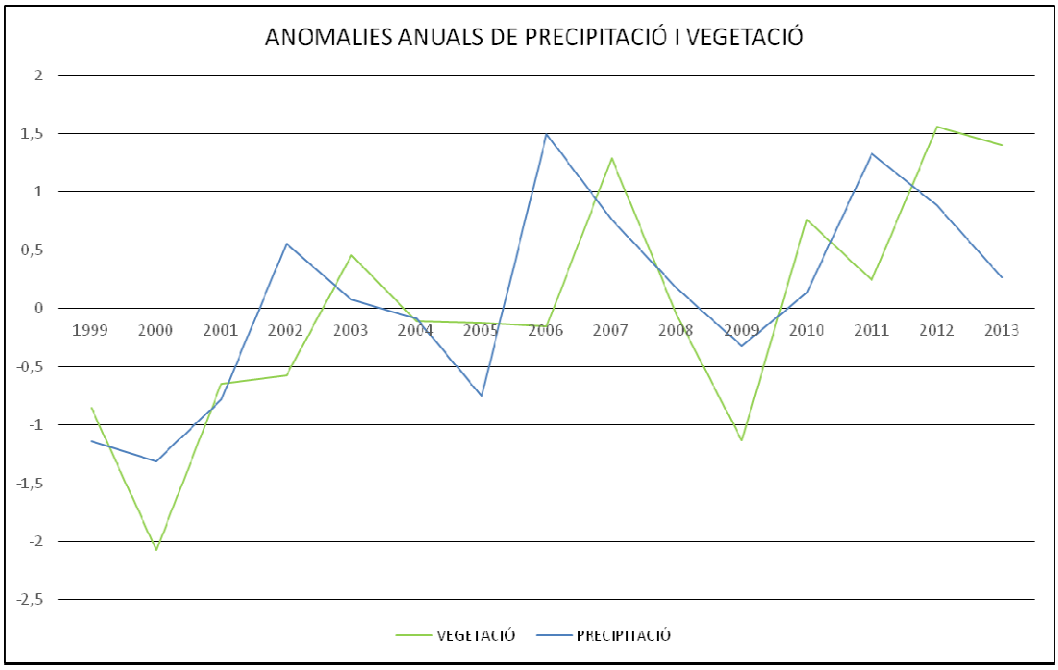

Figura 32. Anomalies anuals de precipitació i vegetació (1999-2013)

Com s'observa en la figura 32, s'han comparat les anomalies anuals de vegetació amb les de precipitació i es pot veure com les dues segueixen una certa relació ja que les anomalies negatives de precipitació són seguides per les anomalies negatives de vegetació i en anys d'anomalies de precipitació positives es pot apreciar com les anomalies de vegetació també s'han observat positives.

El pic d'anomalies de precipitació positives que es dona entre els anys 2001 i 2002 segueix amb un pic d'anomalies de vegetació entre els anys 2002 i 2003. Passa exactament el mateix per als pics de precipitació dels anys 2005 i 2006 i de vegetació dels anys 2006 i 2007. Amb aquests fets es pot observar la importància de la pluja a la zona ja que les anomalies negatives de precipitació van acompanyades de les anomalies negatives de vegetació i l'increment de les anomalies positives de precipitació propicia sempre un increment de vegetació.

Això es pot veure més detalladament en la figura 33 en el qual es mostren les anomalies mensuals de vegetació juntament amb les de precipitació i es pot observar el desfasament que hi ha entre les anomalies de vegetació i precipitació així com observar la importància de la precipitació per al creixement de vegetació sana.

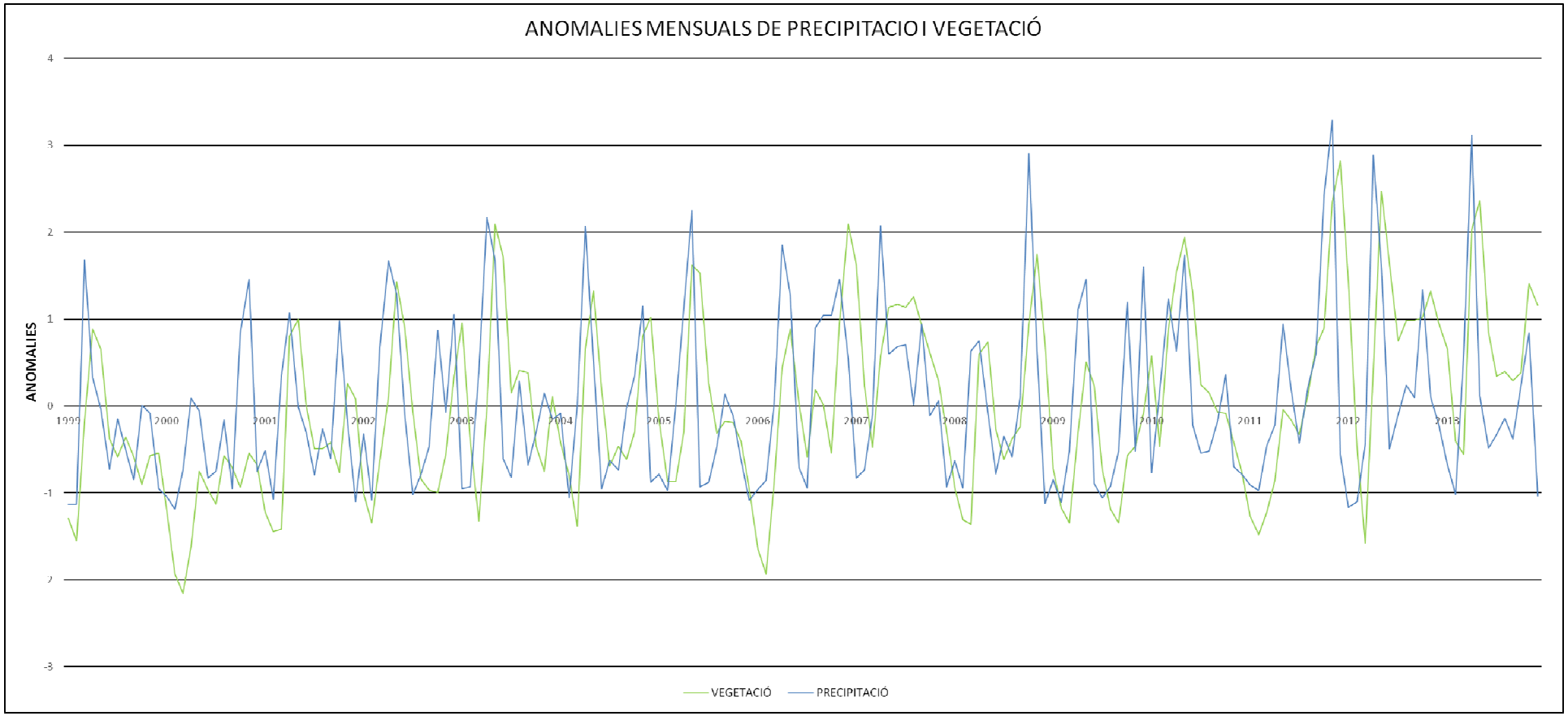

Figura 33. Anomalies mensuals de precipitació i vegetació (1999-2013)

En els annexes s'han afegit més figures d'índex de vegetació NDVI corresponent a cadascuna de les classes del sòl de la zona (terres de cultiu, arbustos, bosc i praderies) juntament amb els gràfics d'anomalies corresponents comparats amb els gràfics d'anomalies de precipitació sobre la zona concreta.

La vegetació sobre la làmina superficial del llac és un fet important a tenir en compte ja que el Turkana es tracta d'un llac eutròfic, com s'ha comentat anteriorment, i la massa de vegetació en suspensió ha anat guanyant terreny al llac com es pot observar en la figura 34 la qual mostra l'índex de vegetació NDVI aplicat sobre la superfície del llac.

En la figura 34 es pot apreciar com els valors de l'índex NDVI fluctuen entre els paràmetres 0,19 i 0,36 sobre la làmina superficial del llac. Aquest fet demostra una important quantitat d'algues sobre el llac i és interessant comprovar com al llarg del temps ha anat incrementant, sent 0,19 el valor de l'índex NDVI al mes de març del 2000 i registrant 0,36 al mes de desembre del 2011.

Per complementar els gràfics es mostren els mapes de vegetació extrets a partir de sèries de dades de 10 dies consecutius durant un mes. La figura 35 correspon al març del 2000, mes on s'han registrat els valors mínims de l'índex NDVI en aquesta sèrie temporal del 1999 al 2013, i la figura 36 corresponent al mes amb el valor màxim registrat, desembre del 2011. Com s'ha explicat anteriorment, l'índex de vegetació oscil·la entre -1 i 1 i a partir del valor 0,1 en amunt es considera la presència de vegetació, indicant els valors superiors a 0,1 vegetació més frondosa i sana.

Finalment s'ha creat una composició RGB en la qual es pot veure en vermell la vegetació i s'aprecia com aquesta ha anat guanyant terreny al llac (figura 37).

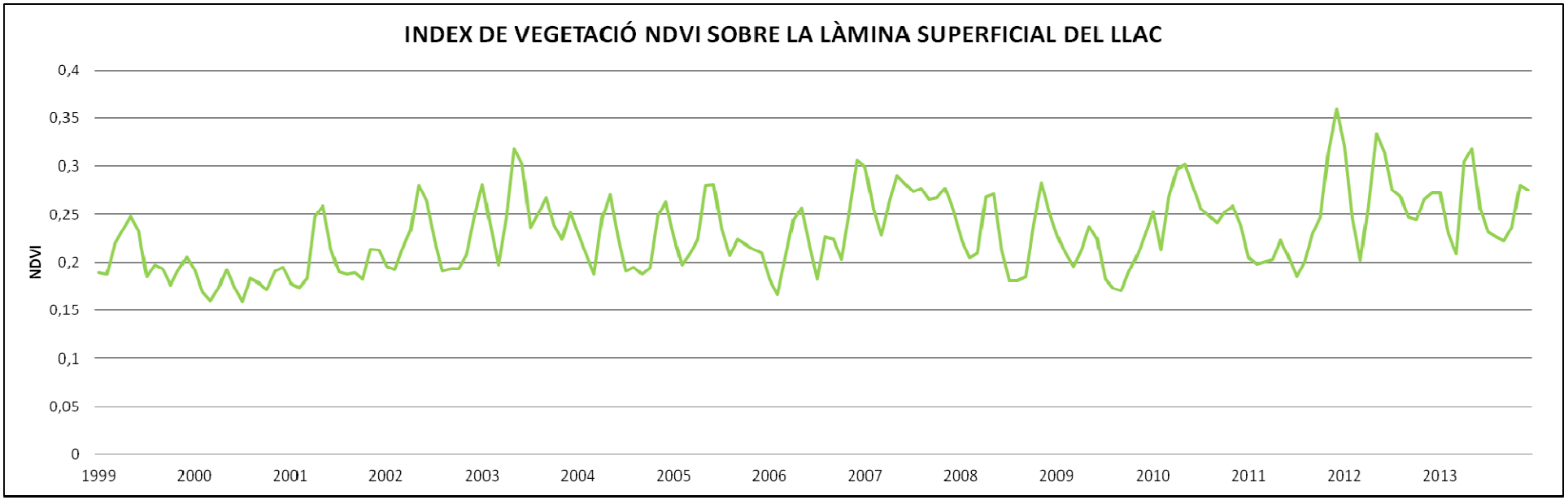

Figura 34. Índex de vegetació NDVI aplicat sobre la làmina superficial del llac (1999-2013)

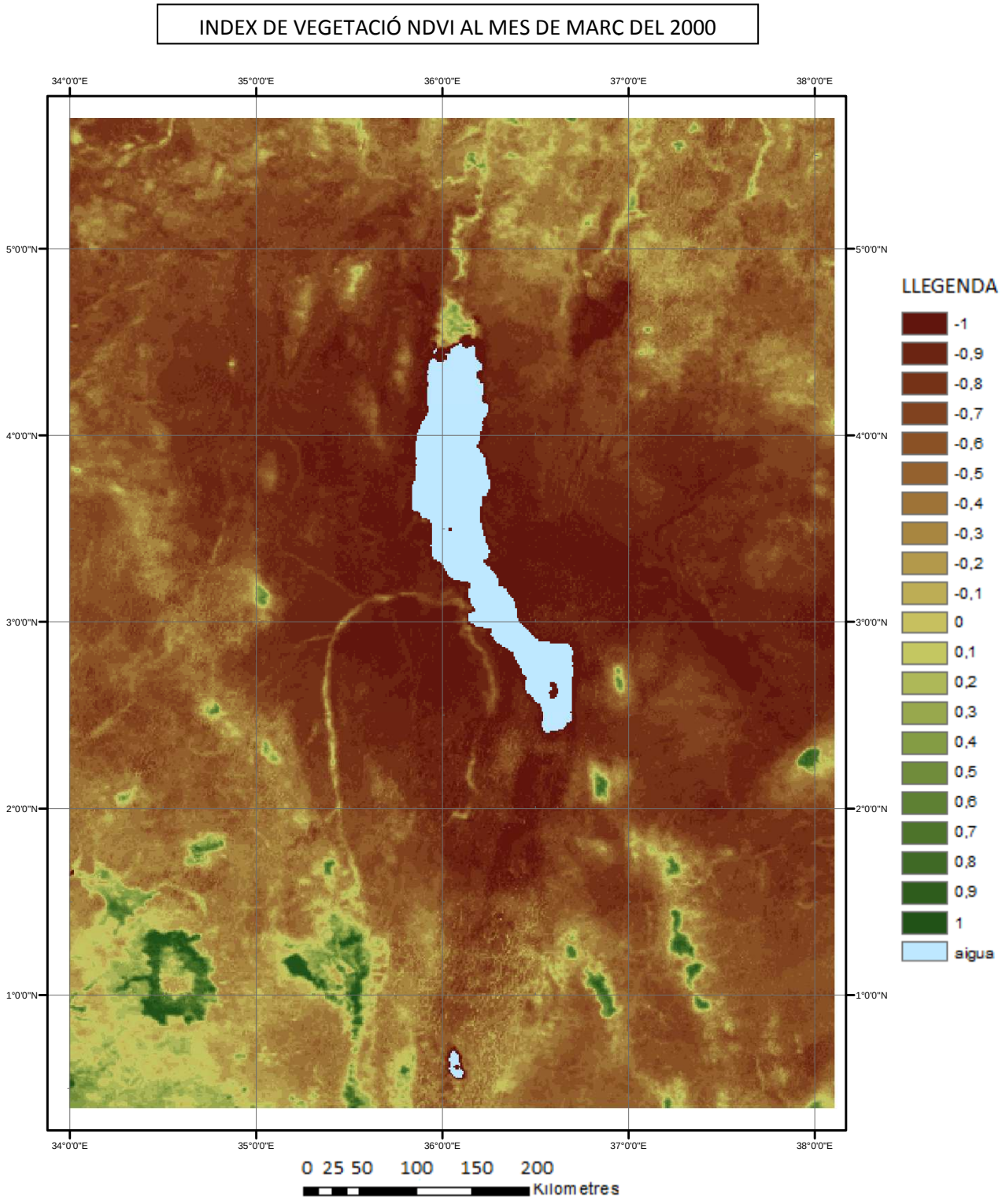

Figura 35. Índex de vegetació NDVI al mes de març del 2000

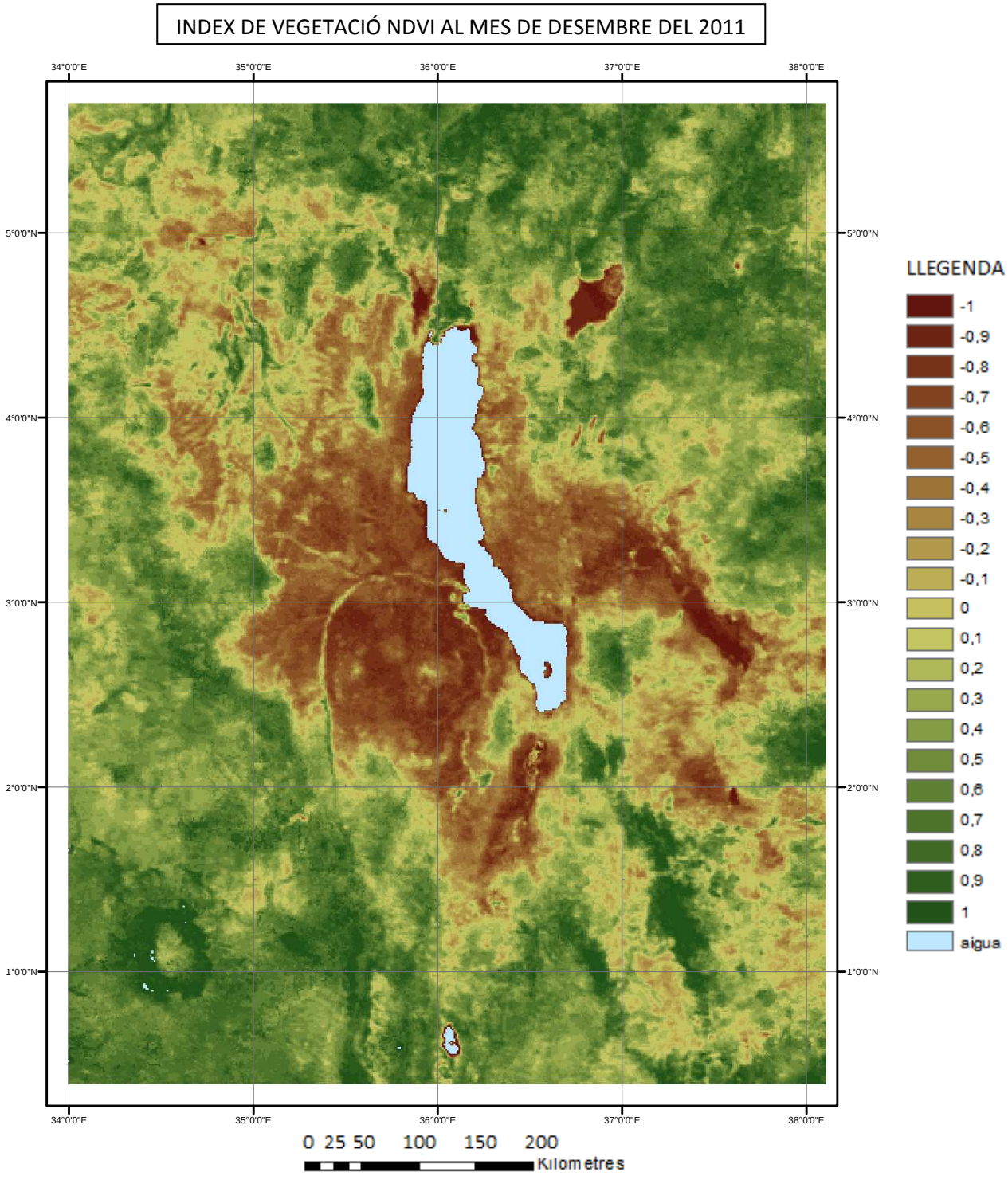

Figura 36. Índex de vegetació al mes de desembre de 2011

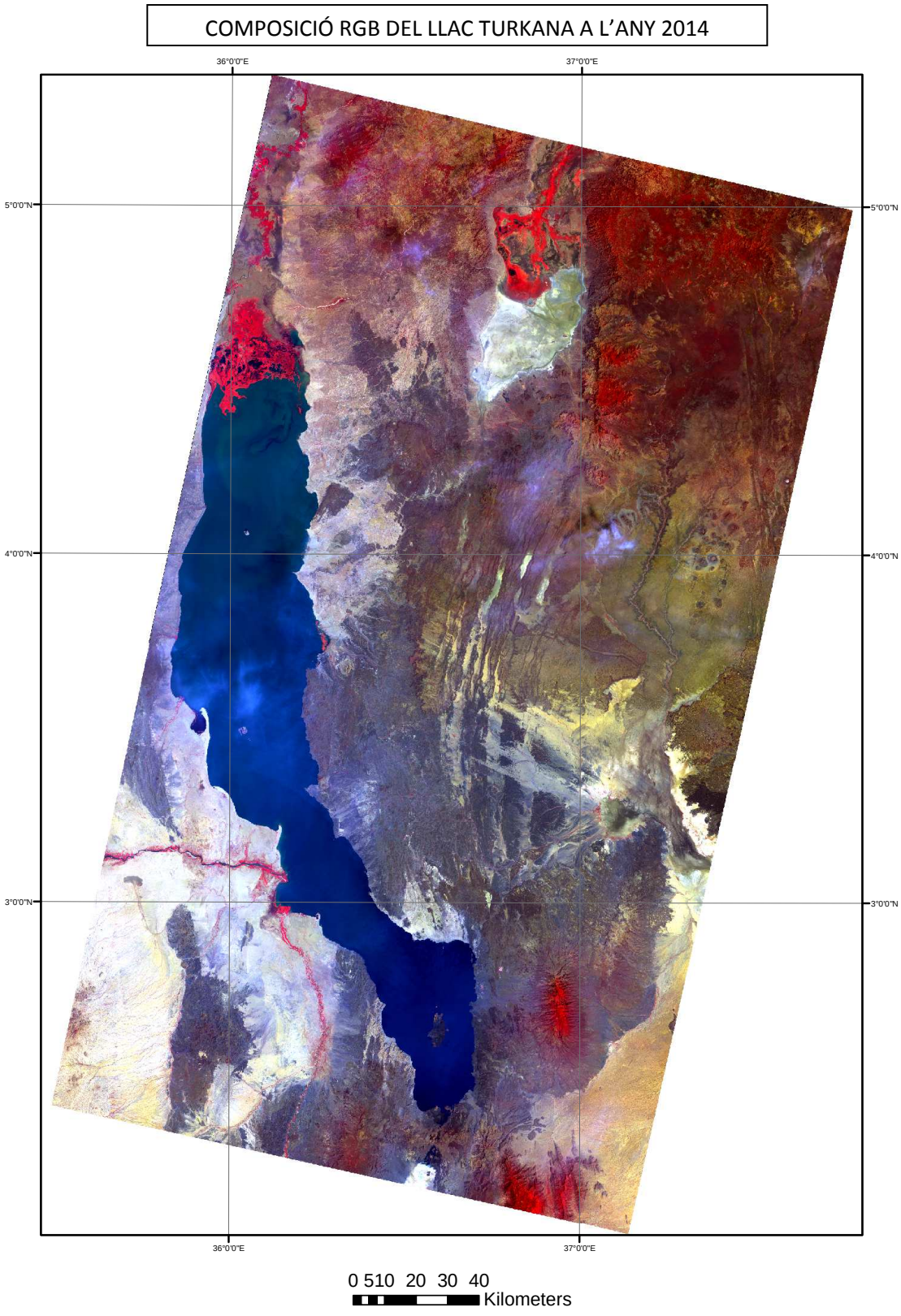

Figura 37. Composició RGB 541 per l'escena del 2014

5 CONCLUSIONS

Gracies a la Teledetecció i al gran ventall de satèl·lits espacials, les imatges que aquests ens proporcionen ens permeten veure amb claredat alguns dels impactes que l'ésser humà provoca sobre el món i com evoluciona el paisatge a través del temps, ajudant-nos a prendre consciència de la nostra interacció i influència amb el medi ambient.

En els últims anys, els avenços en l'àmbit de la Teledetecció han estat de magnituds considerables ja que s'han dissenyat aplicacions per a casi totes les àrees de les ciències degut a tots els avantatges i possibilitats que ens ofereix, reduint en molts casos el temps i els diners invertit en els estudis sobre el terreny.

Alguns articles científics i mitjans de comunicació internacional citen el llac Turkana com un possible desastre natural en uns quants anys ja que prediuen que acabarà desapareixent. Partint de la hipòtesi inicial de que el llac Turkana s'està assecant, ja que depèn directament del riu Omo i la pluja, els resultats obtinguts en aquest treball posen de manifest aquest seriós problema ja que , aquest pateix una disminució progressiva de la superfície fet que demostra que les fonts principals no poden mantenir el nivell d'aportació que requereix el llac.

Amb els resultats de l'obtenció de les làmines del llac per als anys corresponents i efectuades les mesures de la superfície, els resultats confirmen la hipòtesi inicial de que el llac està disminuint progressivament (Taula 8) tot i que es pot observar un màxim en la superfície en l'any 1999 degut al pic màxim de pluges que hi va haver en l'any 1997. Fóra interessant haver utilitzat l' imatge de l'any 1997 per a contrastar-la amb les dades de precipitació, però degut a la nuvolositat de les imatges es feia impossible el seu estudi quedant així la imatge de 1999 com la més propera a aquell pic màxim històric.

Amb els resultats de les anàlisis de precipitació s'ha pogut comprovar doncs que a la zona hi plou relativament poc, no el necessari per a que el llac incrementi el seu nivell, ja que s'ha pogut veure que tot i que el llac Turkana segueix l'estacionalitat de precipitació de la zona, dues èpoques de pluja, una entre març i juny i l'altre entre octubre i desembre, la quantitat de pluja acumulada és escassa.

Fixant-nos amb la superfície del llac, ens adonem que precisament a la part nord del llac, que equival a la desembocadura del riu Omo és on més increment de la superfície assecada s'ha produït, ja que el riu Omo ha disminuït el cabal, fet que provoca que dipositi els sediments just

a la desembocadura del llac propiciant el creixement del delta en comptes d'arrossegar-los llac endins.

Veient els resultats extrets a partir de les dades SPOT-VGT, s'ha pogut apreciar que sobre la làmina de la superfície del llac l'índex de vegetació NDVI oscil·la entre els valors 0,16 i 0,35. Aquest fet demostra l'eutrofització que està patint el llac ja que amb les sèries temporals s'ha observat com ha anat incrementant l'índex NDVI al llarg dels anys sobre la superfície del llac indicant-nos la presència d'algues i partícules vegetals en suspensió sobre aquest.

Queda vist que l'únic recurs del qual pot sobreviure el llac tal com demostren els resultats és a un increment potencial de les pluges i un major cabal del seu principal afluent, el riu Omo, que com ja s'ha comentat es veu afectat per la construcció de la presa de Gibe III, l'explotació ramadera i en menor grau agrícola.

Per tots aquests resultats obtinguts s'ha pogut arribar a extreure la conclusió de que el llac poc a poc està disminuint la seva superfície, i en conseqüència el seu volum, portant-lo cap a la desaparició a no ser que l'acció humana canviï i ajudi a preservar aquest paratge de gran valor natural i ric en vida, promovent plans per ajudar a créixer el cabal del riu Omo en comptes de disminuir-lo amb presses i ,per exemple, optimitzar afluents més petits per a què aprofitin la poca pluja decantada i desemboqui en el llac aportant així un petit gra de sorra. En quan a la precipitació l'esser humà no hi pot fer res per a que plogui on un vol. A pesar d'aquestes conclusions extretes, crec que es farà poc o res per ajudar al llac ja que els països africans que d'ells depèn, Etiòpia que alberga la part nord del llac i el riu Omo i Kenya que avarca la majoria del llac, tenen altres prioritats o inversions més fructíferes que salvar un llac on només hi viuen tribus centenàries, hi ha una gran diversitat de fauna i és un niu de vida.

A les mans de l'esser humà està que no torni a ocórrer un desastre igual al que va passar al mar d'Aral i està succeint a tot el món amb l'assecament de milers de llacs en tots els continents i només quan ja sigui irreparable el mal fet ens donarem compte del que hem perdut.

6 BIBLIOGRAFIA

A. Arozarena Villar. *Teledetección y sistemas de tratamiento digital de imágenes*.

Bai, Z. G., & Dent, D. L. (2006). *Global Assessment of Land Degradation and Improvement : pilot study in Kenya.*

Beck C, J Grieser and B Rudolf 2005. *A new monthly precipitation climatology for the global land areas for the period of 1951 to 2000. 181-190 in Climate Status Report 2004*. German weather Service, Offenbach.

Camilo Ernesto Medina Mazariegos. (2009). *Modelos numéricos y teledetección en el lago de Izabal, Guatemala.*

Compton J. Tucker (1979). Earth Resources Branch NASA. *Remote sensing of environment 8:127-150 Red and Photographic Infrared linear Combinations for Monitoring Vegetation.*

Dunba, B. (n.d.). NASA Official. http://www.nasa.gov/. Data de consulta: 11/02/2014.

Eerens, H., & Dominique, H. (2013). *Software for the Processing and Interpretation of Remotely sensed Image Time Series USER ' S MANUAL Version : 1 . 1 . 1* - February 2013.

ESRI.(n.d.).ArcGIS9.3Webhelp.http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/printBooks_topics.cfm?pid=6050. Data de consulta: 15/04/2014

ASTER GDEM. © 2009-2014 http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/. Data de consulta: 13/03/2014

Hathaway, T. (2006). *La presa de Gibe III*

International rivers. (2009). *FACT SHEET : GIBE III DAM , ETHIOPIA, 3(May 2009)*.

International, S. (n.d.). *Pueblos indígenas y presas hidroeléctricas.*

Janet Larsen - Earth Policy Institute. http://www.earth-policy.org. Data de consulta: 21/05/2014

Japan Meteorological Agency. (n.d.). ClimatView / World Climate / TCC. http://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/products/climate/climatview/frame.php. Data de consulta: 11/02/2014

Ledwith, T. (2012). Las lluvias estacionales en el noreste de Kenya UNICEF. http://www.unicef.org/spanish/emerg/kenya_60260.html. Data de consulta: 01/06/2014

Mayaux, P., Bartholomé, E., Massart, M., Van Cutsem, C., Cabral, A., Nonguierma, A., Diallo, O., Pretorius, C., Thompson, M., Cherlet, M., Pekel, J.-F., Defourny, P., Vasconcelos, M., Di Gregorio, A., Fritz, S., De Grandi, G., Elvidge, C., Vogt, P., Belward, A. (2003). A land cover map of Africa. *European Commission - JRC.*

http://bioval.jrc.ec.europa.eu/products/glc2000/glc2000.php. Data de consulta: 05/03/2014

McKenna, E. (2010). Central hidroeléctrica Gibe III desplazará a cientos de miles de indígenas. http://www.ipsnoticias.net/2013/11/represa-etiope-arrasa-con-medios-de-vida-indigenas/. Data de consulta: 30/02/2014

Mendeley Support Team. (2011). Mendeley Guide. *Mendeley Desktop*. Mendeley Ltd. http://www.mendeley.com. Data de consulta: 15/06/2014

MERIS - Earth Online - ESA. (n.d.). https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/envisat/instrumenTs/meris. Data de consulta: 11/03/2014

Meteorology&Climate(2007) http://www.meteorologyclimate.com/koppenclassification.htm. Data de consulta: 28/05/2014

Odada, E. et al (2003) "*Environmental assessment of the East African Rift Valley lakes*", Aquatic Sciences, 65, pp 254-271.

Odada, E. et al (2006) *East African Rift Valley lakes: regional assessments*, Global International Water Assessment, University of Kalmar, Sweden.

Paruelo JM, HE Epstein, WK Laurenroth and IC Burke 1997 *ANPP estimates from NDVI for the central grassland region of the United States*. Ecology 78, 953-958

Pérez, M. L. S., Gonzalez, A. C., Pedrós, E. V., & Martínez, R. P. (1995). *Estudio por teledetección de la evolución del estado trófico de tres embalses del ámbito de la confederación hidrográfica del Júcar en el periodo estival de los años 1994 y 1995.*

Pérez Ortega, M. (2011). A*plicaciones de la teledetección y SIG en la caracterización de humedales en la reserva de la biosfera de la Mancha Húmeda.*

Republic of Kenia, (2005) *Arid and Semi Arid Lands. National Vision and Strategy: Natural Resources Management 2005-2015*, Government Printers, Kenya.

Sciences, F., & Genbve, U. De. (1994). *Contribution of GIS to submerged macrophyte biomass estimation and community structure modeling , Lake Geneva , Switzerland*, *47*, 99–117.

Simeón Riera, D. (2002). *El mite d'Àfrica Els exploradors vuitcentistes i la seua visió de l'alteritat africana.*

Tote, C., Gilliams, S., Haesen, D., Rembold, F., & Urbano, F. (2013). T*utorial SPIRITS version 1.1.1* – February 2013, (February).

UN World Water Assessment Programme (2006) *Kenya National Water Development Report. Water: A shared responsibility, UN Printers Kabuko-Mariara*.

USGS Global Visualization Viewer. (n.d.). http://glovis.usgs.gov/. Data de consulta: 13/02/2014

Villarrroya, F. I., Javier, F., & Elorza. (2007). Universidad Complutense de Madrid. *Estudio de los recursos hídricos en la zona norte del Turkana (Kenya). Estado actual, escenarios futuros y evaluación de su posible impacto en la población*.

VITO Earth Observation - Home. (n.d.). http://www.vito-eodata.be/PDF/portal/Application.html. Data de consulta: 13/02/2014

Welch, G., & Bishop, G. (2006). *An Introduction to the Kalman Filter*. *In Practice*, *7*(1), 1–16. doi:10.1.1.117.6808

Xu, F.-L., Tao, S., Dawson, R. W., & Li, B.-G. (2001). *A GIS-based method of lake eutrophication assessmen*t. *Ecological Modelling*, *144*(2-3), 231–244. doi:10.1016/S0304-3800(01)00374-X

ANNEXES

ANNEXES

A continuació es mostren diverses figures corresponents a l'índex NDVI sobre les diferents classes d'usos del sòl utilitzades en aquest treball (arbustos, bosc, praderies i terres de cultiu), juntament amb l'anàlisi de les anomalies de precipitació i vegetació per a la classe corresponent.

S'han afegit dues figures mostrant la freqüència d'anomalies positives i negatives registrades entre els anys 1999 i 2013 (figura 46 i figura 47).

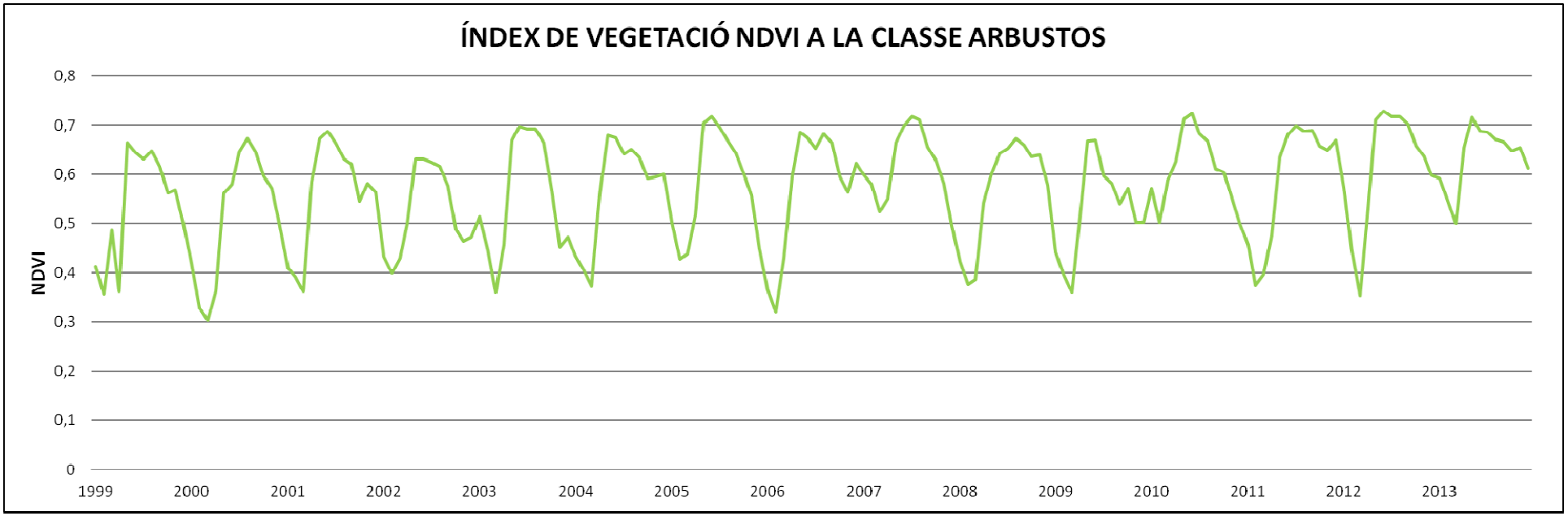

Figura 38. Índex de vegetació NDVI aplicat sobre la classe d'usos del sòl arbustos (1999-2013).

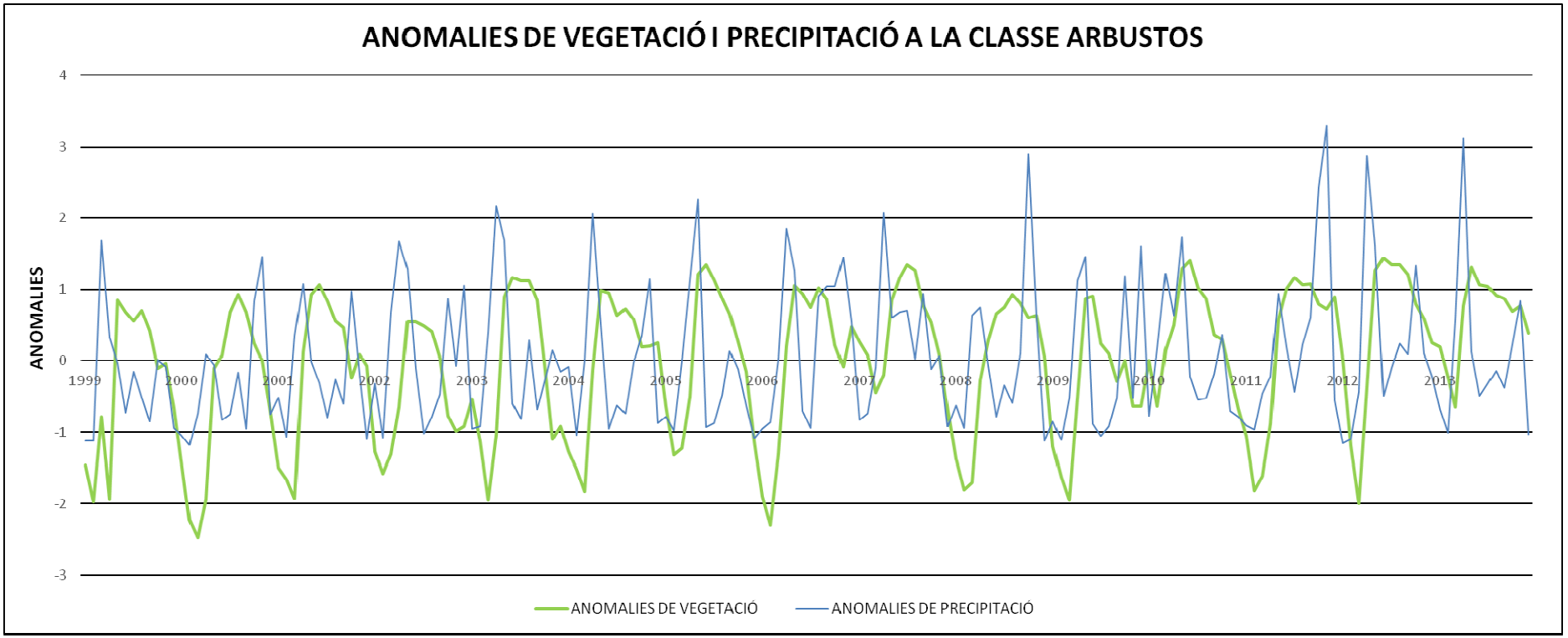

Figura 39. Anomalies de vegetació i precipitació sobre la classe d'usos del sòl arbustos (1999-2013).

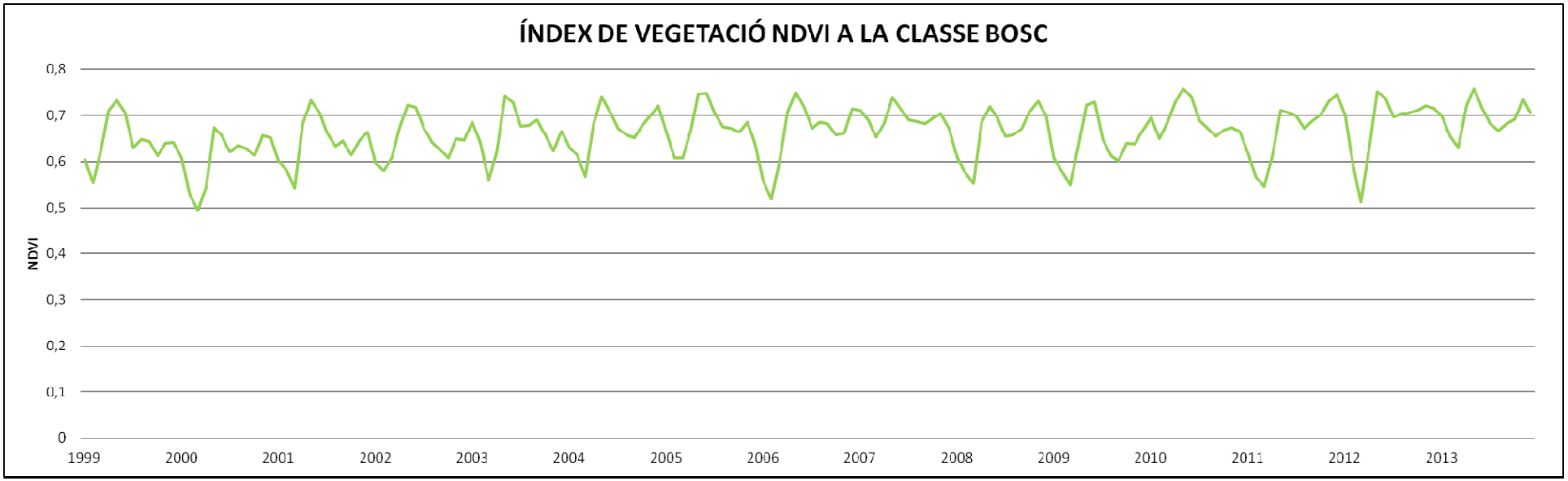

Figura 40. Índex de vegetació NDVI aplicat sobre la classe d'usos del sòl bosc (1999-2013).

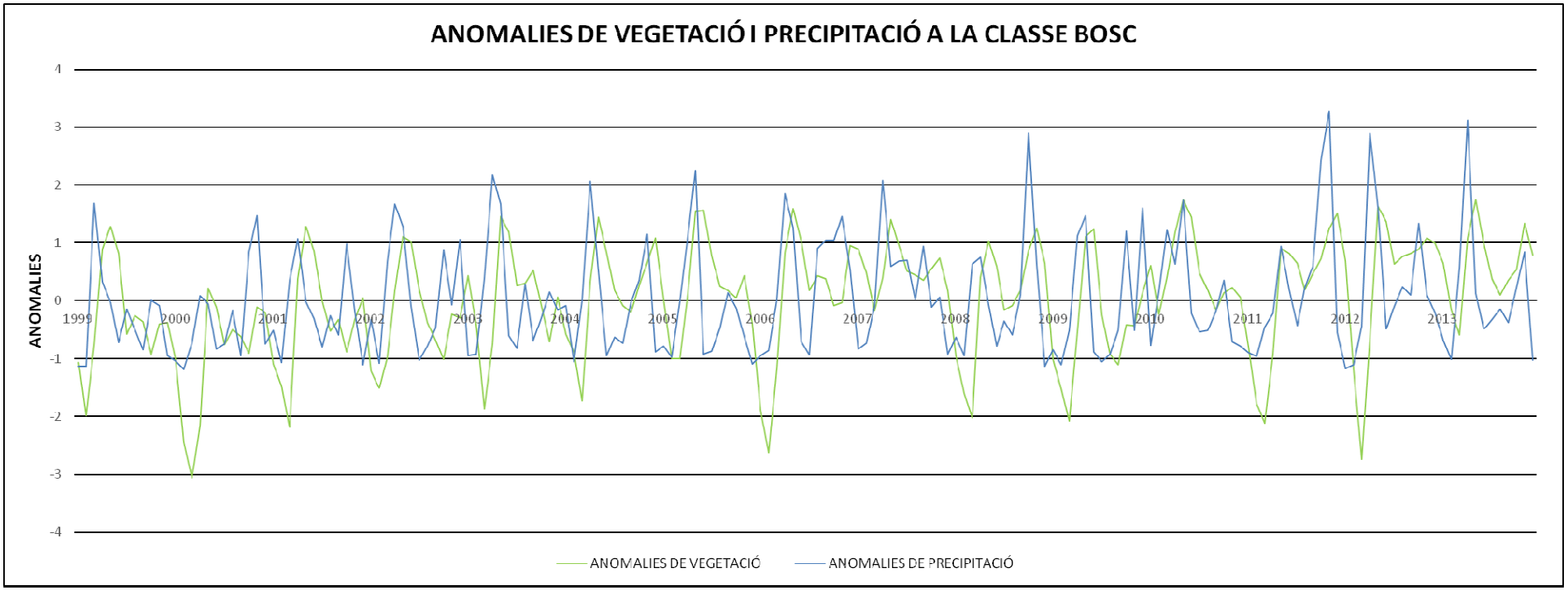

Figura 41. Anomalies de vegetació i precipitació sobre la classe d'usos del sòl bosc (1999-2013).

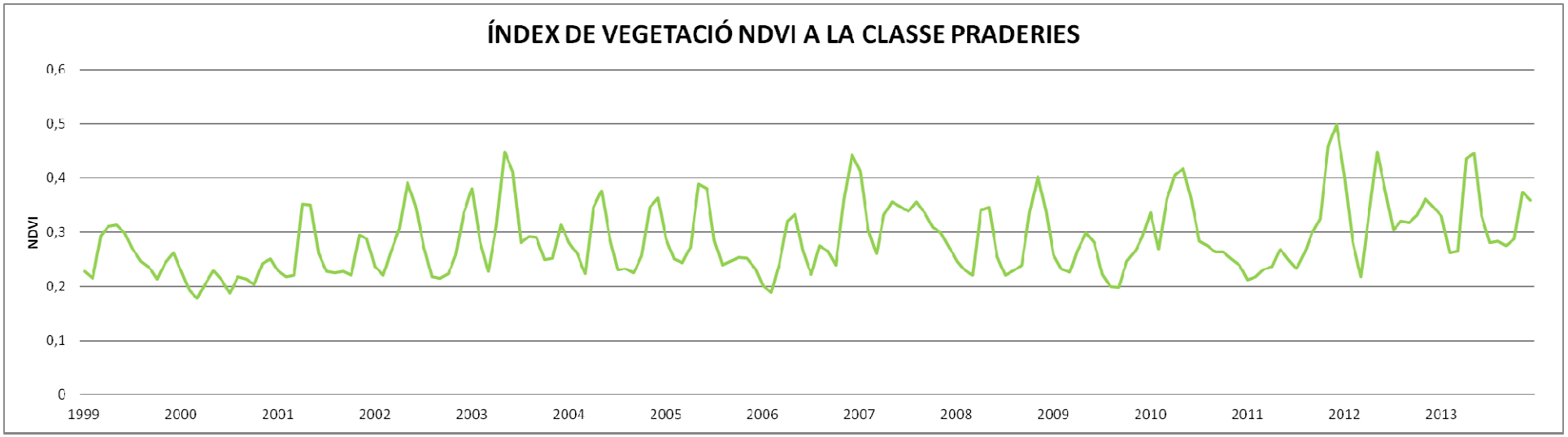

Figura 42. Índex de vegetació NDVI aplicat sobre la classe d'usos del sòl praderies (1999-2013).

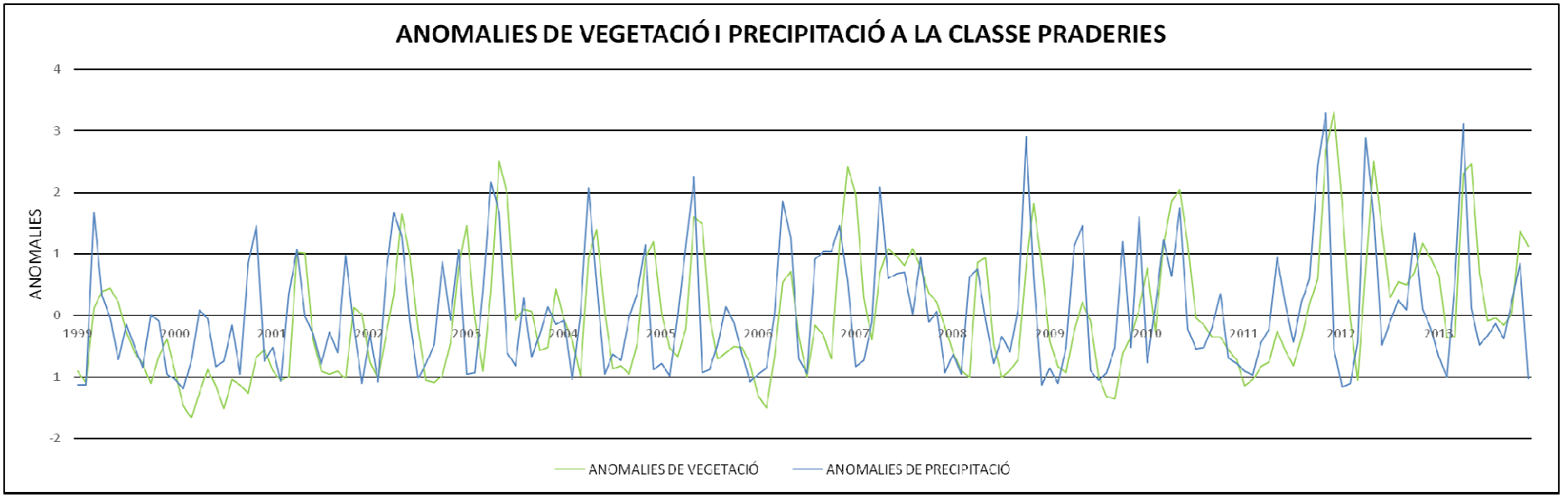

Figura 43. Anomalies de vegetació i precipitació sobre la classe d'usos del sòl praderies (1999-2013).

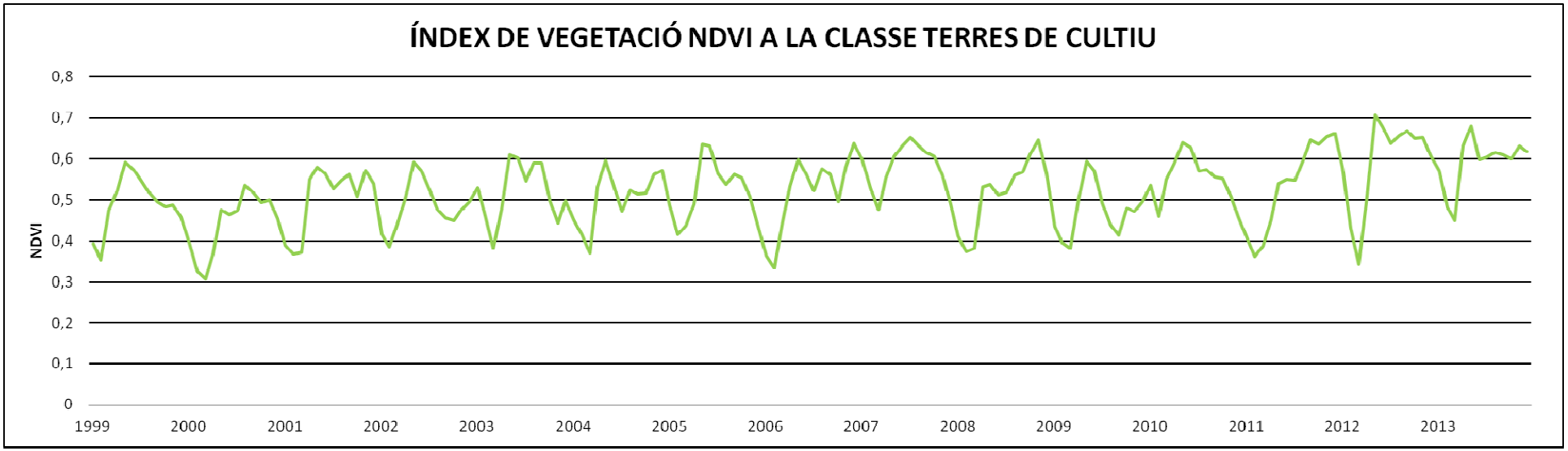

Figura 44. Índex de vegetació NDVI aplicat sobre la classe d'usos del sòl terres de cultiu (1999-2013).

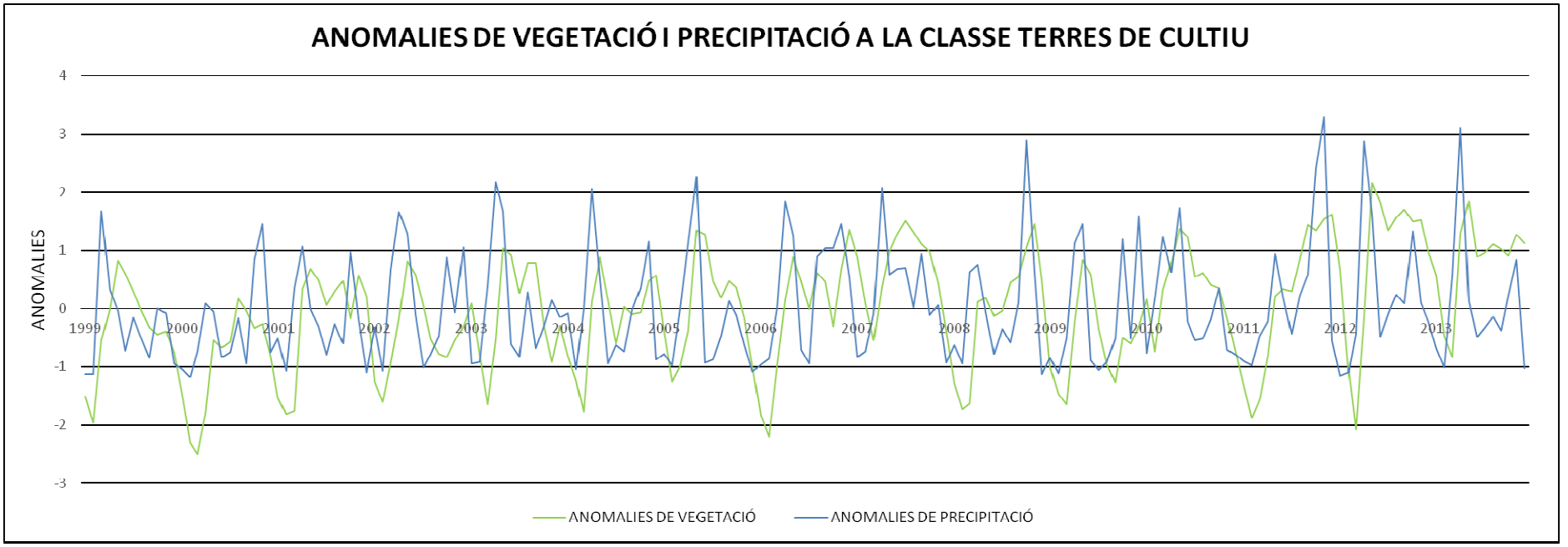

Figura 45. Anomalies de vegetació i precipitació sobre la classe d'usos del sòl praderies (1999-2013).

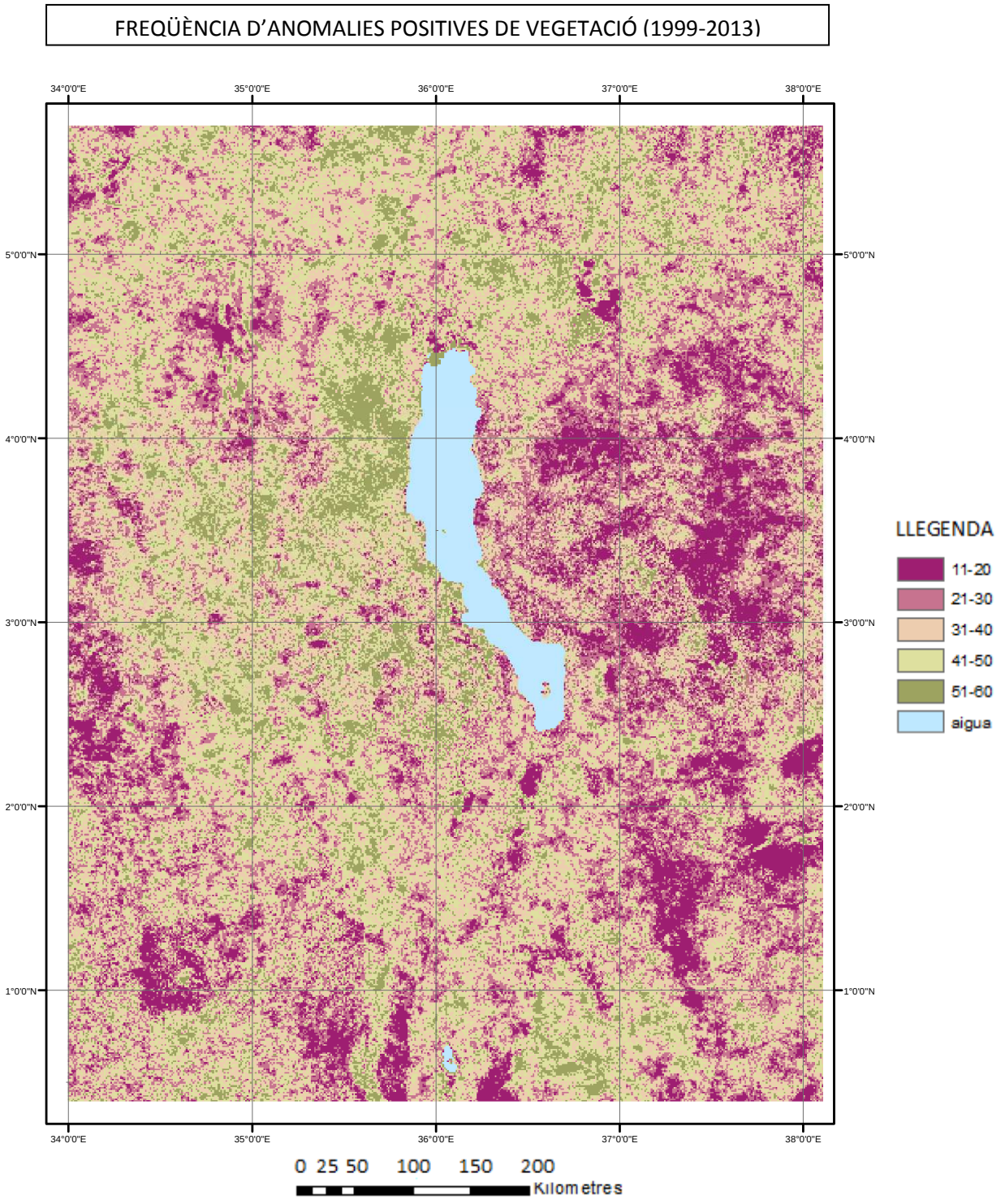

Figura 46. Freqüència d'anomalies positives entre els anys 1999 i 2013.

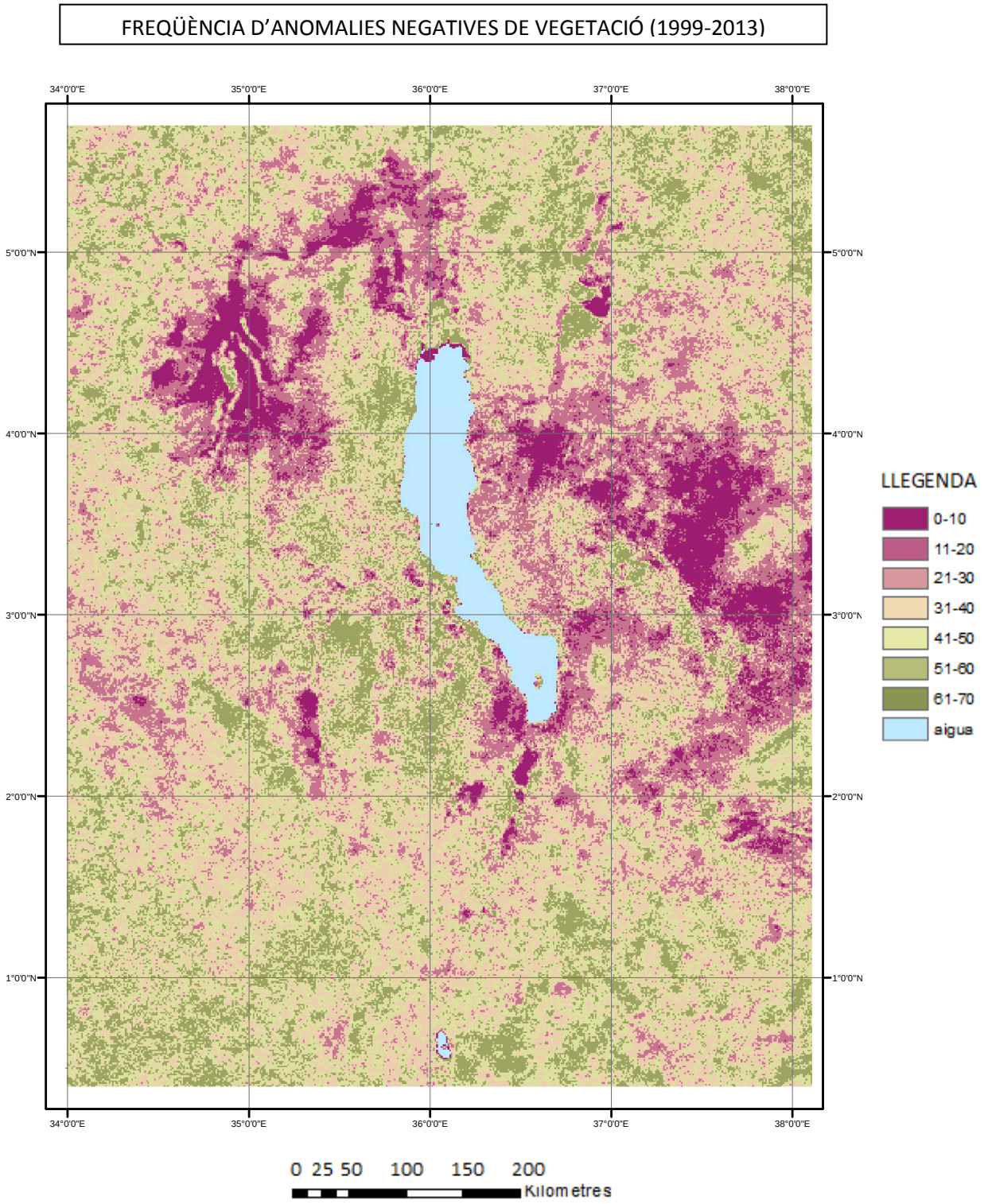

Figura 47. Freqüència d'anomalies negatives entre els anys 1999 i 2013.