



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Prospeccions geoarqueològiques i aplicacions de la teledetecció en regions semiàrides

El cas d'estudi del Gujarat del Nord, Índia

Francesc C. Conesa

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tdx.cat) i a través del Dipòsit Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX ni al Dipòsit Digital de la UB. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX o al Dipòsit Digital de la UB (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tdx.cat) y a través del Repositorio Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR o al Repositorio Digital de la UB. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR o al Repositorio Digital de la UB (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tdx.cat) service and by the UB Digital Repository (diposit.ub.edu) has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized nor its spreading and availability from a site foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository is not authorized (framing). Those rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Prospeccions geoarqueològiques i aplicacions de la teledetecció en regions semiàrides

El cas d'estudi del Gujarat del Nord, Índia



Tesi doctoral

Francesc C. CONESA

Dirigida per

Dr. Marco MADELLA

Dr. Andrea L. BALBO

Dr. Miguel Ángel CAU

Programa de doctorat de Societat i Cultura
Departament de Prehistòria, Història Antiga i Arqueologia
Facultat de Geografia i Història

Barcelona, 2016

*“Toca final,
definir de un trazo,
sintonizar, reagrupar pelazos,
en mi colección de medallas y de arañazos”*
Los Días Raros, VETUSTA MORLA (2011)

*“Been wondering for days
how you felt me slip your mind,
leave behind your wanton ways,
I wanna learn to love in kind”*
The Wolf, MUMFORD & SONS (2015)

Imatges de la portada: (a) estris per a la prospecció geoarqueològica, (b) el Gujarat del Nord, ben verd i amb aigua abundant poc després de les pluges del monsó, en una imatge Landsat 8 OLI en fals color (6-5-2, 25/10/2013; (c) mapa topogràfic d'ús militar (*US Army Service Topographic Map*, 1955).

Sumari

I. Agraïments	7
II. Resum	11
III. Abstract	13
IV. Índex de figures	15
V. Índex de taules	17
1. INTRODUCCIÓ.....	19
1.1. Presentació.....	19
1.2. Preguntes i objectius de la recerca	22
1.2.1. Quines són les principals característiques fisiogràfiques del paisatge?.....	22
1.2.2. Quines evidències arqueològiques es documenten en superfície?	24
1.2.3. Quins influxos antròpics afecten la visibilitat i preservació del registre arqueològic?	25
1.3. Unitat temàtica del compendi d'articles	26
1.4. Estructura de la tesi i contingut dels capítols.....	28
1.5. Context acadèmic.....	29
1.5.1. El NoGAP (North Gujarat Archaeological Project).....	29
1.5.2. Treball de camp, col·laboracions externes i finançament.....	30
2. CONTEXT GEOGRÀFIC I CLIMÀTIC	33
2.1. Regions geoculturals del Gujarat.....	33
2.1.1. Les planes del Gujarat del Nord	34
2.1.2. Les muntanyes Aravalli.....	37
2.1.3. La <i>Little Rann</i> of Kachchh	38
2.1.4. El desert del Thar.....	38
2.1.5. Kachchh, Saurashtra i Nal.....	38
2.2. El monsó del sud-oest	39
2.3. Morfologia climàtica.....	40

3. CONTEXT ARQUEOLÒGIC	43
3.1. La Civilització de la Vall de l'Indus	43
3.1.1. Fases de la Civilització de la Vall de l'Indus	45
3.1.2. La importància del Gujarat i les zones perifèriques	47
3.2. L'arqueologia del Gujarat	49
3.2.1. Caçadors recol·lectors: jaciments aceràmics	49
3.2.2. Primers agricultors i ramaders: la tradició Anarta	51
3.2.3. La Civilització de la Vall de l'Indus: <i>Sorath Harappan</i> i <i>Late Sorath Harappan</i>	53
3.3. La carta arqueològica del Gujarat del Nord	56
3.3.1. Excavacions recents.....	58
3.3.2. Prospeccions arqueològiques.....	61
4. MARC TEÒRIC	65
4.1. Escales espacials i temporals de la geoarqueologia	65
4.1.1. Perspectives socioecològiques per al Gujarat del Nord	67
4.1.2. Les possibilitats multiescalars de la teledetecció.....	68
5. MATERIALS I MÈTODES	71
5.1. Millora de la carta arqueològica.....	71
5.1.1. Detecció de jaciments i correcció de coordenades (GPS)	71
5.1.2. Base de dades arqueològica: prospeccions de superfície	72
5.2. Cartografia i fotografies històriques.....	75
5.2.1. Els mapes topogràfics d'ús militar.....	75
5.2.2. Les fotografies històriques CORONA	76
5.3. Teledetecció i imatges de satèl·lit	79
5.3.1. Els sensors multiespectrals.....	80
5.3.2. Els sensors de radar	81
5.3.3. Els models digitals d'elevació	84
5.4. Geoarqueologia i anàlisi estadística	86
5.4.1. Prospeccions regionals	87
5.4.2. Prospeccions intrajaciment	88
5.4.3. Anàlisis fisicoquímiques	89
5.4.4. Anàlisi estadística	90

5.5. Integració en plataformes SIG	91
5.6. Disponibilitat i visualització de la base de dades arqueològica	93
6. COMPENDI D'ARTICLES	95
6.1. Contributions of geoarchaeology and remote sensing to the study of Holocene hunter-gatherer and agro-pastoral groups in arid margins: the case of North Gujarat (Northwest India)..	95
6.2. Use of satellite SAR for understanding long-term human occupation dynamics in the monsoonal semi-arid plains of North Gujarat, India	111
6.3. CORONA photographs in monsoonal semi-arid environments: addressing archaeological surveys and historic landscape dynamics over North Gujarat, India	137
6.4. Multi-proxy survey of surface archaeological scatters in drylands: the case of North Gujarat, India.....	155
6.4.1. Abstract	156
6.4.2. Keywords	156
6.4.3. Introduction.....	157
6.4.4. Archaeological survey in North Gujarat	158
6.4.5. Materials and methods	160
6.4.6. Results	168
6.4.7. Discussion	186
6.4.8. Conclusions.....	192
6.4.9. Acknowledgements	193
6.4.10. Electronic supplementary material	194
7. RESULTATS I DISCUSSIÓ.....	201
7.1. Principals característiques fisiogràfiques del paisatge.....	201
7.1.1. Trets i unitats fisiogràfiques	201
7.1.2. Dinàmiques hidrològiques.....	208
7.2. Evidències arqueològiques en superfície	209
7.2.1. Relacions entre els trets fisiogràfics i la distribució d'evidències arqueològiques	210
7.2.2. Indicadors per a la caracterització d'ocupacions humanes	212
7.3. Influxos antròpics, visibilitat i preservació del registre arqueològic	216

8. CONCLUSIONS	221
8.1. Aproximació multi-escalar a l'estudi del paisatge del Gujarat del Nord	221
8.1.1. Dinàmiques fisiogràfiques del paisatge.....	222
8.1.2. Visibilitat i preservació del registre arqueològic	222
8.1.3. Integració de nous indicadors físicoquímics	223
8.2. Perspectives i propostes de recerca futures	224
9. REFERÈNCIES	227

I. Agraïments

Estic molt agraït, en primer lloc, a en Marco Madella, l'Andrea Balbo i en Bernardo Rondelli, juntament amb la Carla Lancelotti i la Débora Zurro. A tots ells, artífexs del grup de recerca CaSEs, perquè sense el seu suport ni aquesta tesi ni els articles que recull haguessin vist la llum, i perquè tots ells han creat un ambient de recerca excepcional.

Sense deixar CaSEs, em sento molt afortunat d'haver tingut en Juan José García-Granero al costat durant el nostre període predoctoral. Desitjo que no s'escapi gaire lluny en un futur, ja que ha estat llebre i mentor a parts iguals i encara tenim alguns projectes pendents. En Jonàs Alcaina m'ha donat una forta empenta en l'ús de SIG i R, i en Jorge Caro, l'Enrico R. Crema, l'Umberto Lombardo i en Javi Ruiz han aportat la seva experiència en les meves cavil·lacions. Podria dir que l'Stefano Biagetti m'ha fet perdre força temps en la recta final, però, per ser honestos, ha estat un inmens plaer poder perdre'm entre tombes i uadis saharians. Li dec moltíssim, finalment, a l'Steve Markofsky, amb qui vaig poder "il·luminar" les *black sands* de deserts remots.

Aquesta recerca no hauria estat possible, tampoc, sense els amics que han format part del NoGAP: el professor Ajithprasad Karoli, la Charusmita Ghadekar, l'Abha Tripathi i tots els membres, staff i col·laboradors que ens acompanyaven a l'Índia sota les tendes del Maharajà. Estic molt agraït, especialment, a en Rajesh S.V., amb qui durant dos mesos vaig compartir treball de camp i vam arribar molt lluny fins a un llac rodejat de palaus.

Agraeixo també al personal de la Institució Milà i Fontanals del Consell Superior d'Investigacions Científiques pel suport que sempre m'han ofert. Dins el *Consejo*, també li agraeixo moltíssim a l'Agustin Lobo, de l'Institut de Ciències de la Terra Jaume Almera, la seva dedicació durant l'etapa final del doctorat, i les possibilitats que ha obert per a la pròxima etapa.

Tot i ser el principal sospitós d'haver trencat el Coulter un munt de vegades, els amics del Laboratori de Sedimentologia del Departament d'Estratigrafia, Paleontologia i Geociències Marines de la Facultat de Geologia (UB) sempre m'hi han deixat tornar. A la Patricia Povea, la Marina Higuera i la

Montse Guart, sense oblidar els seus companys (i les sobrassades a Eivissa), moltes gràcies per tots els moments més enllà de la recerca.

A Castelldefels hi ha una divisió de recerca que domina totes les ones de l'espectre electromagnètic: la Divisió de Geomàtica del Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya ens ha rebut amb els braços oberts, i els seus investigadors m'han fet sentir com un més a casa seva. Aquesta col·laboració no hagués estat possible sense la Núria Devanthery, amb qui d'un debat durant un *coffee break* polonès hem passat a explorar plegats fascinants aplicacions dels sensors de radar. A la Núria l'acompanyen l'Oriol Montserrat, en Michele Crosetto, en Guido Luzi i la Maria Cuevas, entre d'altres, i desitjo que properament gaudim junts de l'època daurada dels Sentinel.

Durant el transcurs dels meus estudis de màster i doctorat he tingut el privilegi de realitzar tres estades a l'estranger. A la Universitat de Cambridge vaig créixer de la mà d'en Charles French, en Tonko Rajkovaca, l'Yijie Zhuang i en Chris Rolfe, mentre en Cameron Petrie i la Sayantani Neogi m'introduïen en l'arqueologia de la Civilització de la Vall de l'Indus. L'estada a l'Índia (campanyes del NoGAP a part) no fou menys fascinant, i en Mohar Singh i en Sandip Prajapati, de l'*Institute of Seismological Research*, m'ajudaren a coordinar els DGPS amunt i avall del Gujarat del Nord. Finalment, vaig anar a la Universitat de Durham amb un paquet de fotografies CORONA sota el braç. Allà, en Nikolaos Galiatsatos em va introduir en un dels equips més potents per a l'arqueologia del Pròxim Orient, i a tots els hi agraeixo els mesos fantàstics que vaig passar entre la neu, mentre aprofito també per recordar la memòria d'en Tony Wilkinson. Durham, però, no hagués estat el mateix sense la Sofia Turk, la colla del Vic's i, especialment, en James Walker.

Tanco el periple internacional amb una breu menció per a tots aquells moments viscuts entre bastidors de congressos i altres esdeveniments. Agraeixo a en Marijn Hendrickx per haver dedicat temps a mirar les fotografies CORONA, així com a en Deodato Tapete i la Francesca Cigna per els moments escocesos i les oportunitats que tindrem endavant. Recordo també els moments viscuts amb els col·legues de la *European Association for South Asian Archaeology i Art*, autèntic pont entre companys d'Europa i l'Àsia.

Mirant de nou cap a casa, agraeixo a en Miguel Àngel Cau els seus consells per conduir-me a bon port. D'altra banda, durant un temps amb la Maria, la Laia, la Marta, i tota la colla de joves doctors vam revolucionar el departament (o així ho creiem) amb les activitats que vam organitzar amb l'associació AINUBHA. Malgrat el temps invertit, vaig aprendre moltíssim. Mirant enrere, vull agrair l'oportunitat que m'oferí el DIDPATRI (amb en Xavier Hernández i en Xavi Rubio) per iniciar-me en la recerca, i el fet que la Maite Mascort sempre m'hagi fet costat; desconec si encara lamenta que no em dediqués a l'Antic Egipte, però vull que sàpiga que els satèl·lits observen qualsevol indret. Finalment, lamento escriure aquestes línies quan en Prim Bertran ja no es troba entre nosaltres, i espero que allà a on sigui li arribin notícies meves.

Fora de l'acadèmia, tothom ha trobat fascinant allò que feia, malgrat cregui que mai els hi he acabat d'explicar bé del tot. Els de la uni, les nenes, el *Bike Team*, la Leo, els de Razz, els de l'Erasmus, els plaçanovins, els de Lattes (i quants anys han passat!), i tants altres: ostres tu, això ja s'acaba! Natàlia, ja que tu ets la propera, acaba ràpid que tenim moltes coses per fer. Per últim, no estaria escrivint aquestes línies sense el suport i amor familiar. Li desitjo el millor al meu germà en al seu futur entre castells i càmeres, i espero que ben aviat em realitzi els meus documentals gratis o, almenys, molt bé de preu.

En definitiva, durant els meus estudis de doctorat he tingut el gran privilegi de fer el que més m'agrada envoltat de persones excepcionals. Ningú va dir que seria fàcil, però tots vosaltres heu fet el camí més planer i, al final, algú va dir que la tesi es feia per gaudir-la. Dit i fet.

II. Resum

Aquesta tesi doctoral integra dades provinents de la geoarqueologia i de la teledetecció per contextualitzar, en una perspectiva multiescalar i multitemporal, el registre arqueològic d'ambients àrids i semiàrids amb les dinàmiques hidrològiques, geomorfològiques i socioecològiques que han modelat el paisatge fins als nostres dies.

El cas d'estudi del Gujarat del Nord ofereix un escenari ideal per a l'estudi d'aquestes dinàmiques a llarg termini. Tot i ser una de les regions més àrides de l'Índia, la regió també és altament sensible a la variabilitat de les precipitacions del monsó del sud-oest. Les poblacions que ocuparen aquest territori durant l'Holocè (caçadors-recol·lectors, grups agrícoles i pastorals i comunitats en contacte amb la Civilització de la Vall de l'Indus) han deixat un registre arqueològic exposat a la superfície de dunes fòssils. Tot sovint aquestes evidències es recullen durant prospeccions d'abast local i se'n estudia la tipologia material. En moltes ocasions, però, no es consideren els actors i factors que intervenen en la formació i modificació tant del paisatge com del palimpsest d'evidències mixtes que sovint caracteritza el registre arqueològic en espais oberts.

En aquest estudi s'han utilitzat imatges multiespectrals, imatges de radar SAR, mapes topogràfics i fotografies històriques CORONA en diverses escales d'anàlisi. La distribució i visibilitat del registre arqueològic s'ha contextualitzat amb la fisiografia regional, l'impacte del monsó en els recursos hídrics i els influxos antròpics que, sobretot durant els últims 50 anys, han alterat profundament el paisatge i la preservació de les evidències arqueològiques. Finalment, la recerca redueix l'escala d'observació amb una proposta de prospecció intrajaciment que permet una exploració alternativa al palimpsest arqueològic a partir de l'anàlisi espacial i la classificació de signatures fisicoquímiques preservades en el sediment superficial de dunes fòssils.

III. Abstract

This PhD dissertation integrates geoarchaeological and Earth Observation data in a multiscale and multitemporal perspective to contextualise and better understand the archaeological record of drylands in relation with the main hydrological, geomorphological and socio-ecological dynamics that have shaped the landscape to the present day.

The case study of North Gujarat offers ideal settings for the study of long-term landscape dynamics. Being one of the driest regions in India, Gujarat is strongly sensitive to changes in the Indian Summer Monsoon precipitation patterns. The populations that inhabited the region through the Holocene (i.e. hunter-gatherers, agro-pastoral groups and urban groups related to the Indus Valley Civilisation) have left an archaeological record exposed on the surface of fossilised sand dunes. These evidences are collected during field explorations for further typological analyses. However, most of these studies do not evaluate the actors and factors involved in the formation and modification of both the landscape as well as the mixed archaeological palimpsest that often characterises open-air archaeology.

This study includes multi-scale observations of multispectral and radar SAR imagery, historical topographic maps and CORONA photographs. The distribution and visibility of the archaeological record is discussed in the light of regional physiographical traits, monsoonal water dynamics and the impact of present day anthropic activities and land use change. Finally, this research scales down the previous observations with a methodological approach aimed at refining survey methods for the classification of archaeological surface palimpsests by means of the spatial analysis and classification of physico-chemical proxies from surface scatters.

IV. Índex de figures

Figura 1. Situació general del Gujarat.....	34
Figura 2. Principals ecoregions de l'estat del Gujarat.....	35
Figura 3. Detall de les planes del Gujarat del Nord	36
Figura 4. Exemple de la forta estacionalitat que produeix el monsó del sud-oest al Gujarat del Nord i el seu impacte en els recursos hídrics i la vegetació	40
Figura 5. Extensió de la Civilització de la Vall de l'Indus amb els jaciments més significatius...	44
Figura 6. Exemples arqueològics de la Civilització de la Vall de l'Indus.....	47
Figura 7. Exemples de jaciments de la Civilització de la Vall de l'Indus al Gujarat.	55
Figura 8. Principals jaciments excavats del Gujarat	56
Figura 9. Exemple de localitzacions amb evidències arqueològiques en superfície al Gujarat del Nord.....	57
Figura 10. Exemples de l'arqueologia del Gujarat del Nord.....	60
Figura 11. Representacions de la distribució d'assentaments al Gujarat del Nord	62
Figura 12. Exemple de les propietats estèreo de les fotografies CORONA	78
Figura 13. Regions de l'espectre electromagnètic.	79
Figura 14. Respostes de l'energia emesa per els sensors SAR en diverses superfícies.....	82
Figura 15. Limitacions dels DEMs regionals per a la detecció de dunes fòssils.....	86
Figura 16. Extensió de les prospeccions i validacions de camp efectuades en el marc del projecte NoGAP.....	87
Figura 17. Prospeccions i sondejos del projecte NoGAP a la conca del riu Khari.....	88
Figura 18. Principals unitats geomorfològiques de l'àrea d'estudi.	202
Figura 19. Aplicacions de l'observació terrestre a la conca del riu Khari.....	205
Figura 20. Esquema de la distribució de sòls geogènics i antròpics que caracteritzen les dunes fòssils del Gujarat del Nord.	214
Figura 21. Interpolació espacial de variables físicoquímiques.....	215
Figura 22. Tendències històriques en l'explotació dels recursos hídrics i la producció agrícola al Gujarat del Nord.	217

V. Índex de taules

Taula 1. Fases i cronologies simplificades per a la Civilització de la Vall de l'Indus	45
Taula 2. Principals cultures materials al Gujarat del Nord.	51
Taula 3. Jaciments excavats a l'àrea d'estudi fins el 2009.	58
Taula 4. Components primaris de l'estudi geoarqueològic.	65
Taula 5. Models de variabilitat climàtica i escales temporals en ecosistemes	66
Taula 6. Definició i aplicacions multiescalar del gra i l'extensió.....	68
Taula 7. Escales espacials i contextos ambientals del paisatge arqueològic.....	69
Taula 8. Descripció dels atributs per a cada localització arqueològica.....	74
Taula 9. Principals recursos en línia per a l'adquisició de mapes històrics per al nord-oest indi	75
Taula 10. Recursos cartogràfics: mapes topogràfics d'ús militar (1950)	76
Taula 11. Característiques de les fotografies CORONAI	77
Taula 12. Característiques dels sensors actius.....	80
Taula 13. Característiques del sensor Envisat ASAR.....	82
Taula 14. Característiques dels models digitals d'elevació.....	85
Taula 15. Relació d'elements vectorials integrats en SIG.....	92
Taula 16. Fitxers complementaris (kmz) que inclouen la base de dades arqueològica del Gujarat del Nord i el resultat de les classificacions del quart article.....	93
Taula 17. Noves localitzacions amb material arqueològic en superfície i correccions de coordenades per a l'àrea d'estudi.	210

1. INTRODUCCIÓ

Aquest capítol contextualitza breument el Gujarat del Nord amb la importància arqueològica i ecològica de les zones àrides i semiàrides, especifica les preguntes de recerca i descriu la unitat temàtica del compendi d'articles que formen el cos principal d'aquesta tesi. El capítol també descriu el context de la recerca, a on s'inclouen els projectes de recerca relacionats, les fonts de finançament i les col·laboracions externes.

1.1. Presentació

Les regions àrides i semiàrides cobreixen un 40% del total de la superfície terrestre i suporten una cinquena part de la població mundial (El-Beltagy i Madkour 2012). Les poblacions que hi habiten han mantingut estratègies tradicionals d'adaptació i resiliència davant diversos condicionants climàtics, l'origen de les quals en molts casos es pot traçar en els canvis socioecològics, en diferents contextos i escales espaciotemporals, que s'han produït durant l'Holocè (Balbo *et al.* 2016). Aquestes regions són també riques en un patrimoni arqueològic que majoritàriament s'ha conservat de manera excepcional fins als nostres dies (Barker i Gilberston 2000). Durant mil·lennis, la morfogènesi quaternària d'aquestes regions ha estat condicionada per la geomorfologia climàtica, la biogeografia i els influxos antròpics (Redman 1999; Spellman 2000; Redman i Kinzig 2003).

En les darreres dècades, la intensificació dels influxos antròpics en ecosistemes àrids i semiàrids ha causat una ràpida transformació del paisatge a causa, entre d'altres, de l'augment demogràfic i urbanístic o l'increment de l'agricultura mecanitzada (p.e. empobriment de la coberta vegetal, eixugament de la capa freàtica, sobreexplotació i salinització dels horitzons del sòl). Aquests efectes antròpics intensifiquen els processos que condueixen cap a la desertització, tot augmentant la sensibilitat i vulnerabilitat d'aquestes regions als influxos climàtics (p.e. les conseqüències de sequeres prolongades o fortes inundacions) i, en última instància, posen en perill la preservació dels paisatges culturals i el registre arqueològic (Butzer 1996; Goudie 2002).

1. INTRODUCCIÓ

El Gujarat del Nord és una regió semiàrida a l'extrem nord-oest de l'Índia, situada entre el clima àrid del desert del Thar, que s'estén al nord cap al Pakistan, i el clima subhúmit que caracteritza el bloc subcontinental indi, al sud-est. Aquesta situació en una zona de transició climàtica configura un extens ecotò (entès com un territori marginal situat entre dos ecosistemes diferents) altament sensible als canvis mediambientals. El principal fenomen climàtic és l'arribada anual del monsó del sud-oest, la intensitat del qual condiciona en gran part la diversitat ecològica dels paisatges que s'estenen des de les planes al·luvials del Pakistan fins a l'extrem sud de l'Índia.

El coneixement arqueològic actual ens indica que al llarg de l'Holocè diversos grups humans ocuparen el Gujarat del Nord, duent a terme diverses estratègies d'explotació de recursos: la caça i la recol·lecció, la ramaderia seminòmada (amb cert grau d'explotació agrícola); l'agricultura i ramaderia sedentària, i activitats de caire comercial relacionades amb els centres urbans de la Civilització de la Vall de l'Indus (3300-1300 aC). En els últims anys, la intensa recerca arqueològica a la regió ha generat un bon nombre de localitzacions a on el registre arqueològic és ben visible en superfície. La majoria d'estudis, però, han considerat el paisatge del Gujarat del Nord com un paisatge fòssil i s'han centrat, sobretot, en analitzar i classificar el registre material recollit, sense aprofundir ni en el context geogràfic (tant a nivell local com regional) ni en les dinàmiques del paisatge a llarg termini que, en última instància, condicionen els processos de formació i preservació del palimpsest arqueològic visible en superfície.

Així doncs, la bona visibilitat del registre arqueològic en superfície, juntament amb una relativa bona preservació de relictos morfoclimàtics i d'estratègies tradicionals d'usos del sòl, fan del Gujarat del Nord una òptima àrea d'estudi per implementar una recerca basada en la integració de la geoarqueologia i la teledetecció, amb l'objectiu de contextualitzar els factors que contribueixen a la visibilitat i la distribució de les evidències arqueològiques en relació a les dinàmiques del paisatge. Per tal de satisfer aquest objectiu, es necessita una aproximació multiescalar i multitemporal que permeti identificar les relacions socioecològiques de llarg termini. La geoarqueologia permet estudiar processos antròpics i geomorfològics a partir del seu enfocament en els paisatges i els processos de formació i tafonomia a través d'una àmplia gamma d'escales espacials i temporals, des de la resolució

1. INTRODUCCIÓ

submil·limètrica i mil·limètrica d'un anàlisi micromorfològic fins a l'escala continental, i de dies a mil·lennis (Stein 1993; Beach *et al.* 2008; Wilson 2011).

La teledetecció, d'altra banda, és igual de crítica per a estudiar les dinàmiques geomorfològiques del paisatge i els influxos, tan naturals com antròpics, que modifiquen la coberta terrestre. Fins i tot si es tracta d'una disciplina recent (les primeres imatges de satèl·lit s'obtingueren a partir dels anys 60), mitjançant la detecció de relictos morfoclimàtics en el paisatge actual és possible integrar les escales d'anàlisi espacial i temporal que ofereix la teledetecció amb els indicadors provinents de la geoarqueologia (Goldberg i Macphail 2006; Wilkinson *et al.* 2010). La teledetecció ha esdevingut una eina essencial per a l'arqueologia, i és especialment útil per avaluar zones remotes o de difícil accés i estudi (p.e. per inestabilitat política o per l'elevat cost del treball de camp), a on, a més a més, la disponibilitat i la qualitat d'informació geogràfica és sovint molt limitada. Aquestes mancances són presents en moltes zones àrides i semiàrides globals i el Gujarat del Nord no n'és una excepció. No obstant aquest punt de partida força limitat, aquesta tesi fa ressò de la gran millora en la qualitat i disponibilitat de dades provinents de l'observació terrestre que s'ha produït en els darrers anys. La integració d'aquestes dades amb indicadors geoarqueològics obre noves perspectives per a l'estudi de paisatges arqueològics.

1.2. Preguntes i objectius de la recerca

Aquesta tesi integra dades provinents d'indicadors geoarqueològics i de la teledetecció per contextualitzar l'arqueologia del Gujarat del Nord amb les principals dinàmiques hidrològiques, geomorfològiques i socioecològiques que han determinat (1) els patrons d'assentament durant l'Holocè, i (2) la visibilitat i preservació de les evidències arqueològiques.

Les preguntes de recerca que s'han plantejat per assolir aquests objectius giren entorn tres eixos principals: (1) un eix fisiogràfic, basat en la detecció i comprensió de dinàmiques geomorfològiques i hidrològiques; (2) un eix arqueològic, basat en la detecció i classificació de noves localitzacions amb registre arqueològic en superfície, i (3) un eix tafonòmic, basat en la identificació de les dinàmiques del paisatge que, actualment i en una perspectiva a llarg termini, afecten la visibilitat del registre arqueològic.

1.2.1. Quines són les principals característiques fisiogràfiques del paisatge?

La completa apreciació de la distribució del registre arqueològic en diverses escales d'anàlisi depèn de la nostra capacitat de correlacionar les condicions ambientals i els processos geomorfològics ocorreguts durant l'Holocè amb les característiques fisiogràfiques del paisatge actual. A tal fi, aquest estudi integra informació paleoambiental i geogràfica (provinent en gran part de la revisió de la literatura existent i de mapes temàtics publicats per diverses fonts i organismes) amb les noves observacions aportades per l'observació terrestre i el treball de camp. L'estudi de les dinàmiques del paisatge s'ha plantejat en tres subpreguntes, estretament relacionades amb la hidrologia i la geomorfologia climàtica del paisatge el Gujarat del Nord.

En quines unitats fisiogràfiques podem dividir el paisatge?

Estudiades des d'una perspectiva geològica, les planes del Gujarat s'han considerat tradicionalment com una sola unitat fisiogràfica, formada a partir de la deposició i rebliment de diversos processos de sedimentació eòlica i al·luvial durant el Quaternari. La comprensió d'aquests dipòsits, però, necessita una avaluació més refinada dels processos geomorfològics i tafonòmics que, en última instància, alteren o modifiquen la deposició del registre arqueològic en superfície. L'aproximació multiescalar que ofereix la teledetecció i la validació geoarqueològica al camp permet classificar i interpretar la

1. INTRODUCCIÓ

coberta terrestre i les dinàmiques del paisatge en diverses escales d'anàlisi (p.e. macrounitats fisiogràfiques principals, modelat fluvial, identificació d'heretatges o altres elements regionals i locals).

Quins processos geomorfològics han configurat aquestes unitats?

La situació geopolítica del nord-oest indi en general, i del Gujarat del Nord en particular (l'estat del Gujarat és un dels motors industrials i agrícoles de l'Índia), ha impulsat una literatura abundant dedicada a la geografia física d'aquesta regió. Aquests estudis es poden dividir en aquells centrats en la geomorfologia estructural (p.e. la tectònica de plaques) i aquells centrats en la geomorfologia climàtica (p.e. els processos sedimentològics produïts durant el Quaternari). La majoria d'aquestes investigacions, però, s'han realitzat a una escala d'anàlisi i de representació massa gran (i.e. escala continental o regional) per copsar les dinàmiques produïdes a petita escala (com ara les arqueològiques i socioecològiques). A més, en molt poques ocasions s'han integrat observacions multiescalars de fenòmens visibles en la coberta terrestre mitjançant l'ús de la teledetecció.

Quin impacte té el monsó en les dinàmiques hidrològiques?

Considerant les múltiples funcions i serveis ecològics que realitza, l'aigua és un bé social, econòmic i ambiental. Això és particularment cert als dominis àrids i semiàrids, on gairebé la totalitat de la precipitació anual es correspon a un o pocs episodis de precipitacions d'alta intensitat. L'escassetat d'aigua en moltes zones d'Àsia del Sud ha generat una important discussió sobre el veritable valor de l'aigua, incloent les seves implicacions per a la governabilitat i la gestió dels recursos (Mehta 2007; Sutcliffe et al. 2011). Al nord-oest de l'Índia, actualment només el 20% de la producció agrícola depèn de les inundacions i dels cursos fluvials, efímers i activats durant el monsó, mentre que el 80% depèn de l'explotació dels aqüífers (Shah 2014). La recarrega dels aqüífers, al mateix temps, està subjecta tant a factors climàtics (i.e. la variabilitat anual de les precipitacions del monsó) i morfològics (p.e. la hidrologia regional i les característiques edafològiques dels nivells freàtics) com antròpics (p.e. la sostenibilitat en la gestió dels recursos). L'anàlisi integrada d'aquests factors completa l'estudi de les dinàmiques del paisatge actual des d'una perspectiva a llarg termini, i permet aportar noves dades que clarifiquen les dinàmiques d'assentament i les estratègies d'usos del sòl adaptades a l'estacionalitat del monsó.

1.2.2. Quines evidències arqueològiques es documenten en superfície?

En moltes zones àrides i semiàrides, les evidències arqueològiques exposades en superfície sovint representen dispersions de material fragmentat, de caràcter efímer i sense restes arquitectòniques visibles. Aquest registre és especialment fràgil i sensible als processos post-deposicionals i les perturbacions de la coberta moderna, factors que esbiaixen i dificulten la inferència arqueològica (Tainter 1979; Brantingham *et al.* 2007). A més a més, la documentació d'aquest registre també depèn del grau d'observació, l'extensió i la precisió de les prospeccions de superfície (Wandsnider i Camilli 1992).

Les observacions multitemporals i multiescalars del paisatge del Gujarat del Nord permeten avaluar el paper de la teledetecció i la geoarqueologia a l'hora de millorar les estratègies de prospecció arqueològica, tot avaluant els processos post-deposicionals i la tafonomia del paisatge que esbiaixa la interpretació del registre arqueològic. D'altra banda, la revisió i integració de noves dades arqueològiques i fisicoquímiques aporta una visió crítica sobre el significat i la preservació del palimpsest arqueològic en superfície i pot ajudar a redefinir la interpretació dels assentaments en espais oberts o sense estructures visibles. Aquests dos temes, centrals en les exploracions arqueològiques en zones àrides i semiàrides (Fanning *et al.* 2007; Holdaway *et al.* 2015), s'han dividit en dues subpreguntes d'investigació.

Quines relacions emergeixen entre la fisiografia regional i la distribució d'evidències arqueològiques?

En els últims anys, l'arqueologia de l'Àsia del Sud ha posat èmfasi en l'estudi del context topogràfic i mediambiental, especialment pel que fa a la Civilització de la Vall de l'Indus (p.e. Lemmen i Khan 2012; Petrie i Thomas 2012). Al Gujarat del Nord, aquestes aproximacions han tingut un ressò més escàs. De fet, gran part de la recerca arqueològica s'ha centrat en l'estudi exclusiu de la cultura material, sense considerar o minimitzant les múltiples relacions a llarg termini que es produeixen entre les dinàmiques del paisatge, els recursos hídrics i edífics i la distribució del registre arqueològic.

Es poden documentar diferències en el tipus d'ocupació humana a partir de les evidències en superfície?

1. INTRODUCCIÓ

La majoria d'informació arqueològica del Gujarat del Nord prové de material recollit en prospeccions de superfície. Hi ha pocs jaciments excavats i correctament datats que permetin clarificar el palimpsest superficial. Els estudis del registre material recuperat tant en prospeccions com en excavacions s'ha basat principalment en els conjunts ceràmics. Mentre que s'han elaborat diverses sèries tipocronològiques per classificar les poblacions agropastorals que ocuparen el Gujarat del Nord, la presència d'indústria lítica, en canvi, s'ha considerat tradicionalment com a sinònim inequívoc d'ocupacions de caçadors-recol·lectors. L'estudi d'altres materials que podrien clarificar els tipus d'assentament i les seves estratègies de subsistència han rebut poca atenció, com ara les restes faunístiques i botàniques, o l'anàlisi de residus i altres marcadors fisicoquímics,

La revisió de la carta arqueològica del Gujarat del Nord i la integració d'indicadors fisicoquímics provinents de sediments superficials permet avaluar el significat del palimpsest en superfície i explorar el potencial que ofereixen altres indicadors arqueològics per definir el tipus d'ocupació d'un assentament, en paral·lel a les evidències de la cultura material.

1.2.3. Quins influxos antròpics afecten la visibilitat i preservació del registre arqueològic?

Fins avui en dia, al Gujarat del Nord s'han mantingut estratègies tradicionals d'usos del sòl adaptades a la fisiografia local i l'arribada anual del monsó. La transformació del Gujarat en el motor econòmic en que s'ha convertit actualment, però, ha anat acompanyada d'un fort influx antròpic en el paisatge. Les conseqüències socials i mediambientals d'aquest impacte s'han discutit tant a nivell local com estatal ([Prakash 2008](#)), i ocupen una centralitat important en l'agenda política del Gujarat. En canvi, des de la recerca arqueològica s'ha fet molt poc ressò per identificar i avaluar les conseqüències d'aquest impacte en la conservació del paisatge arqueològic, i la majoria de les exploracions arqueològiques que s'han dut a terme a l'àrea d'estudi no s'han dissenyat tenint en compte les possibles perturbacions causades per els usos actuals del sòl. A més a més, les prospeccions s'han planificat principalment en base a fronteres administratives (p.e. el terme d'una població), i han obviat altres àrees de possible interès arqueològic per la manca d'evidències en superfície. En molts casos, l'aparent l'absència de registre arqueològic és conseqüència de processos post-deposicionals actuals o de llarga durada, que cal identificar i entendre per contextualitzar la distribució, visibilitat i preservació de l'arqueologia.

1.3. Unitat temàtica del compendi d'articles

Aquesta tesi es presenta com un compendi de quatre articles publicats o en procés de publicació en revistes internacionals indexades que apliquen el sistema de revisió per parells.

El primer article ([Balbo et al. 2013](#)) crea les bases per un estudi crític dels patrons d'assentament i per l'explotació de recursos al Gujarat del Nord a partir de la cerca i integració d'informació paleoambiental, contrastada mitjançant exploracions regionals i l'observació terrestre (imatges multiespectrals en fals color Landsat i ASTER i models regionals d'elevació del terreny). La creació d'un mapa fisiogràfic permet contextualitzar la presència o absència del registre arqueològic amb la fisiografia regional del Gujarat del Nord, tot identificant els principals processos tafonòmics que afecten la visibilitat i preservació del registre arqueològic.

El segon article ([Conesa et al. 2014](#)) presenta les aplicacions d'una sèrie multitemporal d'imatges de radar Envisat. Els valors de les mitjanes d'amplitud del sensor ASAR (*Advance Synthetic Aperture Radar*) s'utilitzen per detectar les dinàmiques hidrològiques produïdes per el monsó mitjançant la detecció de zones d'inundació i els mapes de canvi entre la resposta obtinguda per a l'estació del monsó (de juny a setembre) i el postmonsó (d'octubre a gener). Les aplicacions d'imatges multiespectrals en regions semiàrides, a on les pluges estacionals hi juguen un paper rellevant, presenten una limitació que a priori sembla ben simple, però que esdevé important a l'hora d'entendre els recursos hídrics: els sensors multiespectrals no travessen la densa capa de núvols que cobreix el Gujarat del Nord durant el monsó, per tant, només permeten avaluar el paisatge durant l'estació seca (just abans de l'estiu) o durant el postmonsó. Aquesta limitació ha centrat l'interès d'aquesta recerca per els sensors de radar, capaços de capturar dades en qualsevol condició climàtica i atmosfèrica. Els sensors de radar permeten, per primera vegada, posar en relació les dinàmiques hidrològiques produïdes per l'impacte del monsó amb la fisiografia regional i la distribució i visibilitat del registre arqueològic.

El tercer article ([Conesa et al. 2015](#)) presenta els treballs que s'han realitzat per ortorectificar i integrar fotografies històriques CORONA KH-4B amb imatges multiespectrals. Aquestes fotografies, capturades a principis de la dècada de 1970 durant els primers programes espacials en el context de la Guerra Freda, tenen una resolució espacial aproximada de 2-4 metres, representen el primer

1. INTRODUCCIÓ

producte d'observació terrestre per a moltes zones àrides i semiàrides i són una font inestimable d'interpretació de paisatges arqueològics. L'article mostra les aplicacions d'aquestes fotografies per planificar prospeccions arqueològiques i descriu l'impacte antròpic produït a l'àrea d'estudi d'ençà la Revolució Verda (dècada de 1970, marcada per l'avanç de l'agricultura mecanitzada) i l'anomenada Revolució Blava (1990-2010, caracteritzada per la construcció de grans canals d'irrigació).

Els tres primers articles analitzen el paisatge del Gujarat del Nord a escala regional i local, mentre que el quart article ([Conesa et al. enviat per publicació](#)) utilitza l'escala intrajaciment en un estudi pilot que crea les bases per identificar i classificar signatures geogèniques i antròpiques presents en el sediment superficial de dunes fòssils. Aquesta recerca es basa en la quantificació sistemàtica de l'arqueologia en superfície, i l'agrupament jeràrquic i la classificació supervisada d'indicadors fisicoquímics. Els resultats ofereixen un suport qualitatiu als estudis clàssics sobre les tipologies de la cultura material. La integració d'indicadors fisicoquímics en la prospecció arqueològica en zones àrides representa una alternativa per caracteritzar l'horitzó superficial de dunes fòssils i interpretar la intensitat i el tipus d'ocupacions humanes, i especialment en aquells casos en que el registre material en superfície corre el risc d'ésser esbiaixat.

1.4. Estructura de la tesi i contingut dels capítols

Després d'aquest primer capítol introductori, el capítol 2 presenta les característiques geogràfiques de l'àrea d'estudi. El capítol 3 contextualitza l'arqueologia del Gujarat del Nord amb l'arqueologia de l'Àsia del Sud, especialment en relació a la Civilització de la Vall de l'Indus. El capítol 4 descriu el marc teòric d'aquesta recerca i presenta les perspectives que ofereix l'estudi dels sistemes socioecològics per a l'arqueologia de l'Àsia del Sud des d'una aproximació enfocada en les aplicacions de l'observació terrestre.

El capítol 5 descriu els materials i mètodes utilitzats per desenvolupar la recerca que es presenta en el compendi d'articles, posant èmfasi en la descripció i disponibilitat de les següents dades: (1) informació arqueològica, provinent de la revisió de la carta arqueològica del Gujarat del Nord i de les prospeccions efectuades en el marc del projecte NoGAP; (2) productes cartogràfics i topogràfics disponibles en línia; (3) dades provinents de l'observació terrestre (fotografies històriques, sensors òptics multiespectrals, sensors de radar i models digitals d'elevació), i (4) descripció geoarqueològica de sediments i anàlisi d'indicadors fisicoquímics. El capítol acaba amb una breu descripció sobre la integració de dades geogràfiques en plataformes de Sistemes d'Informació Geogràfica (SIG).

El capítol 6 integra el compendi dels quatre articles que configuren el cos central d'aquesta tesi. Per als articles ja publicats s'ha preservat el format original editat per a cada revista. El quart article, en canvi, s'ha editat seguint el format de capítol.

El capítol 7 resumeix i discuteix els resultats del compendi d'articles en base a les preguntes de recerca. Finalment, el capítol 8 presenta les conclusions d'aquesta tesi i les perspectives futures d'aquesta recerca.

1.5. Context acadèmic

Aquesta tesi s'ha realitzat en l'entorn del grup de recerca CaSEs (*Complexity and Socio-Ecological Dynamics*), unitat de recerca adscrita al Departament d'Arqueologia i Antropologia de la Institució Milà i Fontanals del Consell Superior d'Investigacions Científiques i al Departament d'Humanitats de la Universitat Pompeu Fabra. Els objectius científics de CaSEs són: (1) estudiar les relacions entre les societats humanes i el seu context mediambiental en una perspectiva a llarg termini, (2) aplicar mètodes quantitativs en el desenvolupament de models de dinàmiques socials i (3) promoure una recerca transdisciplinària per millorar la comprensió dels processos de canvi cultural.

1.5.1. El NoGAP (North Gujarat Archaeological Project)

La recerca efectuada per a l'elaboració d'aquesta tesi s'ha dut a terme en el marc del *North Gujarat Archaeological Project* (NoGAP), una col·laboració acadèmica entre la Institució Milà i Fontanals i el *Department of Archaeology and Ancient History, The Maharaja Sayajirao University of Baroda* (Vadodara, Índia). El projecte promou una aproximació interdisciplinària per tal d'entendre els contactes socials, les estratègies d'explotació de recursos i els paisatges arqueològics de zones àrides durant l'Holocè inicial i mig ([Madella et al. 2010](#)). Entre els anys 2007 i 2013 es dugueren a terme set campanyes de camp que inclogueren les següents tasques:

- Prospeccions geoarqueològiques i arqueobotàniques d'àmbit regional per crear col·leccions de referència i reconstruir les dinàmiques geomorfològiques, hidrològiques i climàtiques del paisatge amb el suport de la teledetecció a multi-escala i la integració en plataformes SIG ([Balbo et al. 2013](#); [Lancelotti et al. 2013](#); [Conesa et al. 2014, 2015](#)).
- L'excavació de tres jaciments arqueològics per tal de datar i contextualitzar dipòsits antròpics propis d'ocupacions de caçadors-recol·lectors (Vaharvo, excavat el 2011, veure [Madella et al. 2012a](#)), ocupacions de comunitats agrícoles-ramaderes (Datrana IV, excavat el 2010, veure [Madella et al. 2012b](#)) i jaciments que poden presentar ocupacions mixtes (Loteshwar, excavat el 2009, veure [Madella et al. 2011](#)).

1. INTRODUCCIÓ

- La recollida sistemàtica de restes bioarqueològiques (granes, carbons, restes òssies, fitòlits i midons) que puguin evidenciar tant trajectòries de domesticació com interaccions entre les comunitats humanes i el seu medi ([García-Granero 2015](#); [García-Granero et al. 2015, 2016](#)).
- L'estudi de dades paleoclimàtiques i seqüències sedimentològiques i micromorfològiques per a l'anàlisi dels processos edàfics i tafonòmics que han intervingut en la formació dels jaciments ([Balbo et al. 2014, 2015](#), [Conesa et al. enviat per publicació](#)).
- L'estudi etnoarqueològic de signatures antròpiques provinents d'activitats pastorals i agrícoles en comunitats contemporànies per a una millor interpretació del registre arqueològic ([Rondelli et al., 2014](#), [Lancelotti et al. 2016](#)).

1.5.2. Treball de camp, col·laboracions externes i finançament

Aquesta tesi es va registrar al programa de doctorat "Societat i Cultura" de la Facultat de Geografia i Història al setembre de 2011, mentre gaudia d'una beca JAE-PreDOC del Consell Superior d'Investigacions Científiques i el Fons Social Europeu (desembre 2010-desembre 2014). A més, des de l'octubre de 2014 he estat investigador visitant al Departament d'Humanitats de la Universitat Pompeu Fabra.

La base de dades arqueològica i les mostres geoarqueològiques analitzades en aquesta recerca provenen de dues campanyes de prospecció arqueològica que vaig desenvolupar en el marc dels treballs de camp del projecte NoGAP entre els mesos de novembre i desembre dels anys 2010 i 2011. Aquestes campanyes es van finançar amb fons del Ministeri d'Educació, Cultura i Esports (*Programa de Ayudas para Proyectos Arqueológicos en el Exterior* 2010 i 2011). Al 2012 vaig realitzar una tercera prospecció mentre realitzava una estada de recerca a la *MS University of Baroda* finançada per el *Programa JAE-PreDOC Estancia*.

També s'han utilitzat mostres geoarqueològiques recollides durant les campanyes prèvies del NoGAP (2007-2009), finançades per el *Programa de Ayudas para Proyectos Arqueológicos en el Exterior* 2009 i la Generalitat de Catalunya (Programa EXCAVA 2009). D'altra banda, la base de dades arqueològica està construïda en base a un llistat anterior ([Sonawane i Ajithprasad 1994](#)) a on també s'hi han integrat els resultats de les exploracions i les campanyes de correcció dutes a termes per P.

1. INTRODUCCIÓ

Ajithprasad (Ajithprasad i Sonawane 2011), Rajesh S. V. (Rajesh 2011; Rajesh i Krishnan 2014) i el projecte *Indus Project* del *Research Institute for Humanity i Nature*, Kyoto (Seth et al. 2007).

Els processament de de les dades que formen part del primer article (Balbo et al. 2013) es va realitzar principalment a la Institució Milà i Fontanals. Les imatges Envisat ASAR utilitzades en el segon article (Conesa et al. 2014) s'han processat al Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya, amb la col·laboració de la Núria Devánthery i l'Oriol Montserrat. Per al tercer article (Conesa et al. 2015), els punts de control utilitzats en la ortorectificació de les fotografies CORONA van ser capturats durant la prospecció de 2012, en col·laboració amb el *Institute of Seismological Research* de Gandhinagar. El processament de les fotografies CORONA es va realitzar principalment durant una estada de recerca al *Department of Geography, Durham University*, amb la col·laboració d'en Nikolaos Galiatsatos. Finalment, les anàlisis estadístiques que configuren el quart article (Conesa et al. [enviat per publicació](#)) s'han dut a terme principalment a l'Institut de Ciències de la Terra Jaume Almera del Consell Superior d'Investigacions Científiques, amb la col·laboració de l'Agustin Lobo (ICTJA-CSIC) i en Jonàs Alcaina (IMF-CSIC).

La preparació i anàlisi de les mostres fisicoquímiques s'ha dut a terme principalment al *BioGeoPal Laboratory* de la Institució Milà i Fontanals, amb finançament del *Programa I+D* de l'antic Ministeri de Ciència i Innovació (Projecte POBLARE "*Poblamiento, recursos y medioambiente en zonas áridas: el Norte del Gujarat como caso de estudio*", HAR2010-16052). Les analítiques físiques de la distribució de partícules per mida s'han realitzat al Laboratori de Sedimentologia del Departament d'Estratigrafia, Paleontologia i Geociències Marines de la Facultat de Geologia de la Universitat de Barcelona. Aquesta recerca també s'ha beneficiat de les sinergies creades amb el projecte SimulPast (*Social i environmental transitions: simulating the past to understand human behaviour*, Programa CONSOLIDER INGENIO 2010, CSD2010-00034), finançat per el Ministeri d'Economia i Competitivitat.

2. CONTEXT GEOGRÀFIC I CLIMÀTIC

Aquest capítol situa l'àrea d'estudi dins el context geogràfic i socioeconòmic actual del Gujarat, i revisa la literatura existent sobre la geomorfologia i el clima al nord-oest indi, posant especial èmfasi en la descripció de les oscil·lacions del monsó, els processos de sedimentació eòlica i fluvial i l'activitat tectònica documentada al llarg del Quaternari.

2.1. Regions geoculturals del Gujarat

L'estat del Gujarat limita al nord-est amb el Pakistan i amb els estats indis del Rajasthan al nord, Mahdy Pradesh a l'est i Maharashtra al sud-est. La costa, a l'oest, està banyada pel mar Aràbic, que forma les entrades dels golfs del Kachchh i de Khambhat (Figura 1). Situat a l'altura del tròpic de Càncer, el territori presenta una gran diversitat de medis influenciats per el règim de precipitacions. Al nord, el domini àrid del desert del Thar acusa una pluviositat molt escassa (100 mm/a) i contrasta amb la zona intertropical humida del sud-est (1000 mm/a).

El Gujarat es divideix en diverses ecoregions, definides també com a "regions geoculturals" (Patel 1997; Ajithprasad 2004), que presenten característiques fisiogràfiques pròpies i culturalment han mantingut trets singulars. Aquestes regions, simplificades a la Figura 2 en aquelles limítrofes amb l'àrea d'estudi, són (1) el Gujarat continental (a on s'inclou el Gujarat del Nord), (2) les muntanyes Aravalli, (3) la *Little Rann of Kachchh*, una extensa depressió salina que connecta el Gujarat continental amb el mar Aràbic, (4) el desert del Thar i (5) les regions perifèriques del Kachchh, Saurashtra i la depressió de Nal.

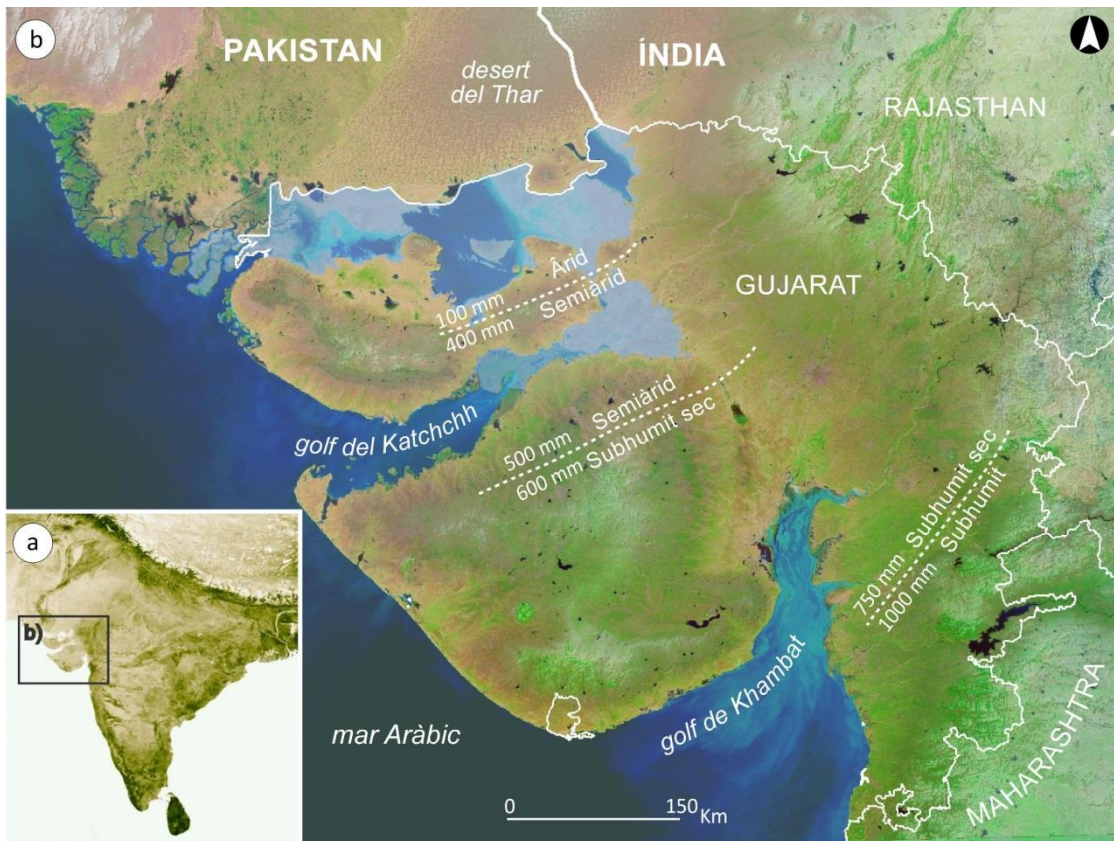


Figura 1. Situació general del Gujarat. (a) Nord-oest del subcontinent indi (mapa base: NOAA Green Vegetation); (b) Límits de l'estat del Gujarat. Les línies d'isohietes, adaptades de Juyal *et al.* (2006) i Attri i Tyagi (2010) mostren la diversitat climàtica del Gujarat (mapa base: imatge MODIS en fals color durant el postmonsó [08/11/2015] i SRTM 90 m).

2.1.1. Les planes del Gujarat del Nord

El Gujarat del Nord correspon a la franja continental localitzada al nord de la conca fluvial del riu Saraswati i estesa entre les muntanyes Aravalli i la *Little Rann*. Les planes del Gujarat del Nord han estat reblides durant l'alternança de climes secs i humits al llarg del Quaternari per eluvions aportats per sedimentació eòlica o al·luvions acumulats per deposició fluvial provinents de les muntanyes Aravalli o de la il·luviació de sediments eòlics anteriors (Srivastava *et al.* 2001). Els rius principals que creuen la regió són el West Banas, el Saraswati i el Rupen. El seu cabal és efímer i depèn totalment del règim monsonic. Les conques fluvials segueixen una direcció nord-est sud-oest i s'estenen des de les àrees de captació a les muntanyes Aravalli fins als cons de deposició fluvial a la *Little Rann* (Juyal *et al.* 2006).

2. CONTEXT GEOGRÀFIC I CLIMÀTIC

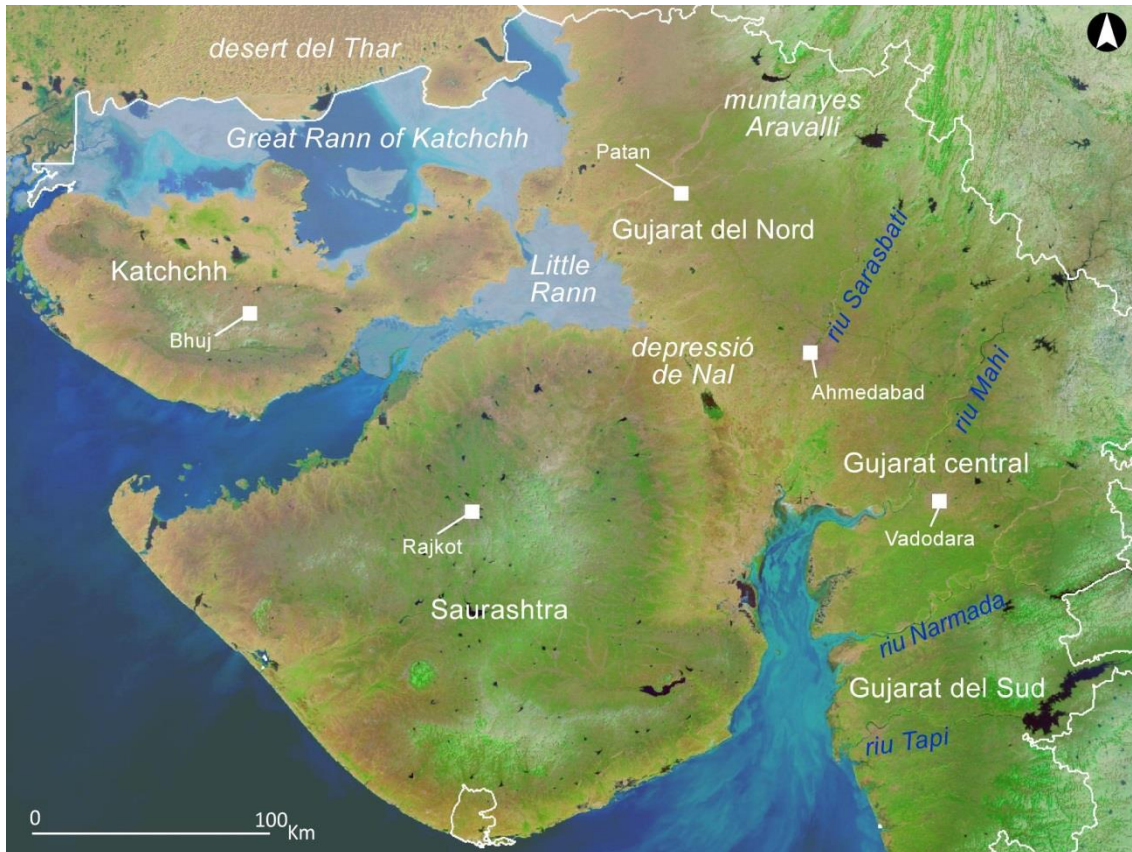


Figura 2. Principals ecoregions de l'estat del Gujarat, amb les ciutats principals ciutats i rius (mapa base: imatge MODIS en fals color durant el postmonsó [08/11/2015] i SRTM 90 m).

En el paisatge del Gujarat del Nord s'alternen dunes fòssils amb depressions interdunals, antics canals fluvials i planures d'inundació (Khadkikar *et al.* 1999). Gran part de les planes al·luvials es localitzen a la fossa de Khambat, una depressió tectònica reomplerta d'al·luvions que creua la regió en sentit sud-est nord-oest. Les falles de la *West* i *East Cambay Basin Margin Fault* delimiten la fossa de Khambat, i marquen l'àrea de piemont de les muntanyes Aravalli i les àrees de captació de conques fluvials (Figura 3). La regió és tectònicament activa, especialment a la zona del Kachchh, amb l'últim gran terratrèmol ocorregut el 2001 (Sareen *et al.* 1993b; Maurya *et al.* 1995; Raj 2012).

Les activitats principals en l'àmbit rural es destinen a l'agricultura a escala local (Rondelli *et al.* 2014; Madella *et al.* 2014) i les pastures de ramats del búfal aquàtic i el zebú indi. Tradicionalment, tant l'agricultura com la ramaderia s'han beneficiat de les inundacions causades per el monso i el sòl fèrtil que genera la sedimentació al·luvial, sobretot a les depressions interdunals, tot i que avui en dia l'agricultura fins i tot es practica en la superfície sorrenca de les dunes (Bhan 2011). El període

2. CONTEXT GEOGRÀFIC I CLIMÀTIC

agrícola que aprofita el monso s'anomena *kharif*, i implica la sembra durant les primeres pluges (entre juny i juliol) i la collita durant el post-monso (entre octubre i novembre). L'agricultura del període *rabi*, en canvi, es practica durant l'hivern (entre desembre i març) i generalment requereix l'aportació extra d'aigua irrigada mitjançant l'extracció de pous o canals de reg artificials (Kumar *et al.* 2004).

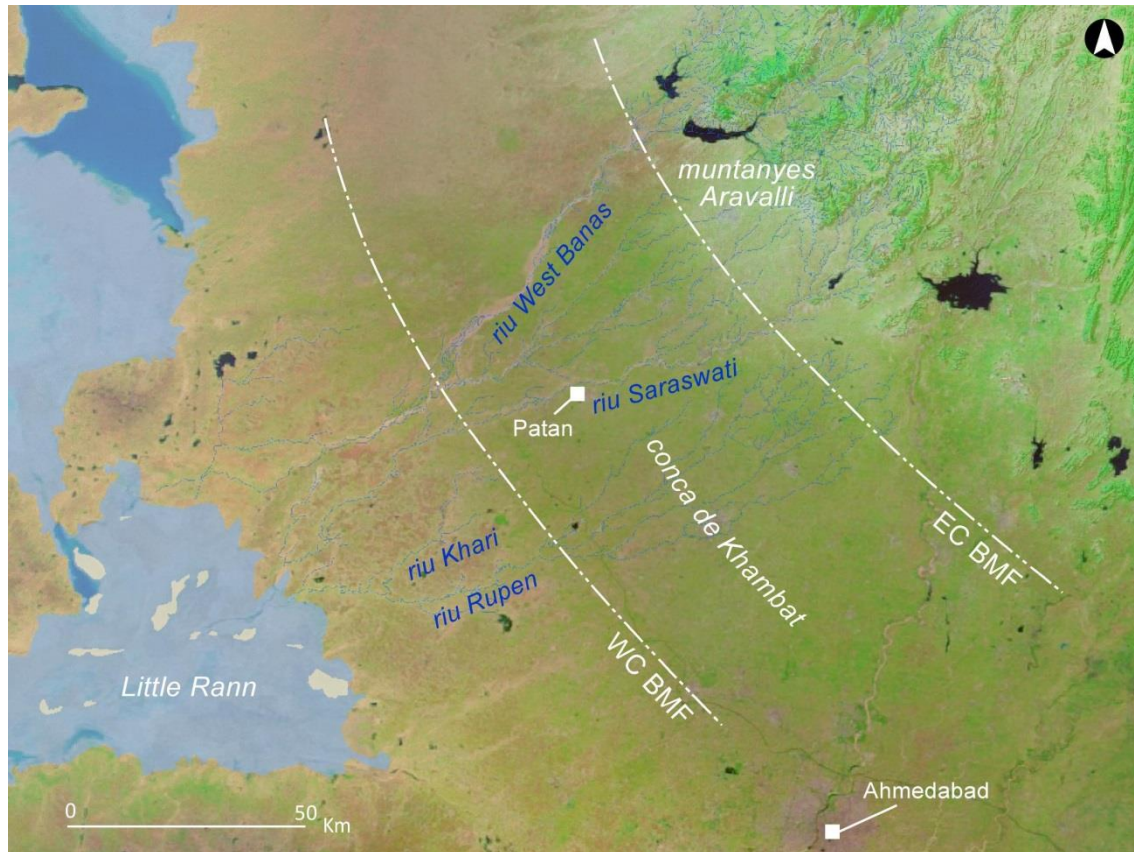


Figura 3. Detall de les planes del Gujarat del Nord, situades entre les muntanyes Aravalli i la *Little Rann*. Ahmedabad és la capital de l'estat del Gujarat, mentre que Patan és una de les principals ciutats del Gujarat del Nord (mapa base: imatge MODIS en fals color durant el postmonso [08/11/2015] i SRTM 90 m).

D'altra banda, moltes depressions inundables s'han convertit en tancs d'aigua artificials. Alguns, construïts en època històrica, són autèntiques obres d'art hidràulic (p.e. els pous medievals anomenats *vav*). Durant segles, els tancs han proveït d'aigua temples, pobles i ciutats, i han satisfet la demanda hídrica necessària per sostenir l'agricultura de subsistència a nivell local (Palanisami i Flinn 1988; Sutcliffe *et al.* 2011).

L'agricultura al Gujarat va experimentar una ràpida transformació durant la implantació de l'anomenada Revolució Verda, iniciada a partir de la dècada de 1960 i que consistí principalment en multiplicar la producció agrícola de l'Índia a partir de la introducció de tècniques modernes d'irrigació, l'ús de fertilitzants químics i la sembra de diferents llavors. La nova varietat de cultius arraconà els cultius tradicionals de secà adaptats a l'estació *kharif* (p.e. els mills, el sorgo, plantes oleaginoses com el ricí o el sèsam i llegums tropicals), i donà protagonisme als anomenats *cash-crops*, cultius d'alt rendiment i més ben valorats en el mercat actual (p.e. arròs, blat, cotó, comí o mostassa índia) que però requereixen molta més quantitat d'aigua (Singh 2000; Kar 2014).

Tot i que l'impacte de la Revolució Verda ha estat molt més intens en altres zones del nord i nord-oest indi (p.e. els estats de Haryana o Punjab o el mateix Gujarat central o del Sud), al Gujarat del Nord els costos mediambientals de l'agricultura moderna i la irrigació a gran escala han comportat un augment de l'erosió i una crítica sobreexplotació dels aqüífers (amb un descens dels nivells freàtics calculats entre 3 i 6 m/a) que ha incrementat l'efecte de la salinització (Ranade *et al.* 2004; Dholakia 2007; Dixit 2009; Shah 2014).

2.1.2. Les muntanyes Aravalli

El sistema muntanyós de les Aravalli consisteix en un seguit d'afloraments paral·lels de roques ígnies i metamòrfiques, amb valls fluvials molt pronunciades, que s'estén des del Gujarat cap a l'interior continental, en direcció nord-est, fins gairebé arribar a la ciutat de Nova Delhi (aprox. 600 km). El pic més alt, el Mount Abu, es troba al Rajasthan i té una alçada de 1722 m. Les muntanyes Aravalli han actuat com un fre davant l'expansió del desert Thar en períodes càlids del Quaternari (Kar *et al.* 2004). Al pediment de les Aravalli s'acumulen inselbergs i massius dipòsits sorrencs en forma de dunes fòssils de considerable envergadura, tallades per barrancs que resulten de l'erosió de l'aigua als turons i la formació de rieres. Les carenes de les muntanyes Aravalli marquen la divisòria en les àrees de captació d'aigua de les conques hidrogràfiques que desemboquen als deltes interiors del desert del Thar, a les Rann i al golf de Khambhat (Juyal *et al.* 2003). Actualment, les presses de Dantiwada (1965) i Dharoi (1978) controlen el cabal dels rius West Banas i Sarasbati, respectivament, i són la font de canals de reg que s'estenen per els cultius del piemont de les Aravalli.

2.1.3. La *Little Rann of Kachchh*

La *Little Rann* és un mar sec amb sediments rics en sals alcalines. Durant el monso i els mesos immediatament posteriors, la *Little Rann* queda parcialment inundada fins als 2 m de profunditat en algunes zones (Bhan 2011). Quan l'aigua s'evapora, es forma una superfície tipus *playa* amb les sals precipitades. Les activitats principals que es desenvolupen a la *Rann* són la pesca i l'explotació de salines. A les maresmes costaneres es practica l'agricultura de secà, la producció de carbó i el pastoralisme i transhumància del zebú a través de les rutes que durant l'època seca travessen la *Little Rann* i connecten el Gujarat del Nord, Saurashtra i el Kachchh. Aquestes rutes aprofiten els corredors que connecten les illes o elevacions dins la plana de la *Little Rann*, riques en plantes halòfiles i fonts d'aigua dolça. A més a més, les illes de la *Rann* són importants tessell·les ecològiques on la fauna salvatge de la regió hi troba refugi (p.e. l'ase salvatge, pelicans i flamencs, entre d'altres segons la descripció d'Ishnava *et al.* 2011).

2.1.4. El desert del Thar

El desert del Thar (conegut també com a *Great Indian Desert*) és un dels principals deserts d'Àsia, tot i que no està considerat un desert extrem a causa de la seva diversitat, a on s'inclouen el piemont de les muntanyes Aravalli, les planes al·luvials i el delta del riu Indus i les maresmes de la *Great* i *Little Rann*. Les dunes del desert del Thar s'alternen amb la presència de paleollacs, el registre paleoecològic dels quals mostra evidències de condicions climàtiques més humides entre l'Holocè inicial i mig (Goudie, 2002, i veure també secció 2.3). El desert del Thar està força poblat gràcies a la subsistència i l'adaptació del camell, l'explotació agrícola basada en l'acumulació d'aigua a les depressions interdunals i, cada vegada més, les estratègies per atraure el sector turístic (Goudie 2009).

2.1.5. Kachchh, Saurashtra i Nal

La regió del Kachchh comprèn la gran illa de Kachchh i les illes de Bela, Khadir i Pachcham, que configuren l'aflorament rocós més a ponent del subcontinent indi. La costa nord desemboca a la *Great Rann* i es fon amb les extenses maresmes del delta del riu Indus i els camps de dunes del marge sud del desert del Thar. Entre les illes de Kachchh i Pachcham es troba la prada de Banni, una reserva

ecològica rica en fauna salvatge i grans àrees de pasturatge que avui en dia, durant el postmonsó, encara atrau les poblacions seminòmades del Gujarat per la riquesa dels seus aqüífers (Ferroukhi i Chokkakula 1996). La península de Saurashtra és el massís rocós més extens del Gujarat. La regió també compta amb una forta tradició pastoral, tot i que també té un fort potencial agrícola gràcies a la coberta de sòls fèrtils d'origen basàltic. La franja de terra enclotada coneguda com la regió de Nal uneix el bloc peninsular amb les planes del Gujarat central. La depressió de Nal ha passat força desapercebuda pels geòlegs malgrat jugui un paper primordial en la geomorfologia del Gujarat ja que actua de nexa entre diversos ecotons (Allchin *et al.* 1972; Ajithprasad 2004). A més d'unir Saurashtra al continent, Nal també ha estat el principal corredor d'enllaç entre el golf de Khambhat i la costa est de la *Little Rann*. Al mig de la regió es troba el Nal Sarovar, un llac poc profund d'uns 120 km² que ofereix un dels registres paleoambientals més rics i més pròxims per la nostra àrea d'estudi (Prasad *et al.* 1998).

2.2. El monsó del sud-oest

Al llarg del Quaternari, el clima ha fluctuat en diversos episodis secs i humits influenciat per la potència i estabilitat estacional del monsó. El monsó es un fenomen tropical produït per l'arribada de vents de l'oceà Índic en direcció sud-oest. La superfície terrestre de la regió del desert del Thar i el subcontinent indi s'escalfen durant els mesos d'estiu i provoquen una pressió atmosfèrica relativament baixa. Les corrents oceàniques, amb una pressió molt més alta i carregades d'humitat, omplen aquest buit en direcció al sistema de l'Himàlaia, que actua de barrera per a les corrents i provoca la descàrrega de precipitacions al subcontinent indi. Es calcula que el 80 % del règim pluvial cau entre els mesos de juny i setembre. El 20 % restant es produeix amb les pluges d'hivern, que allarguen una mica el període post monsonic entre octubre i desembre (Singhvi *et al.* 2010, Figura 4).

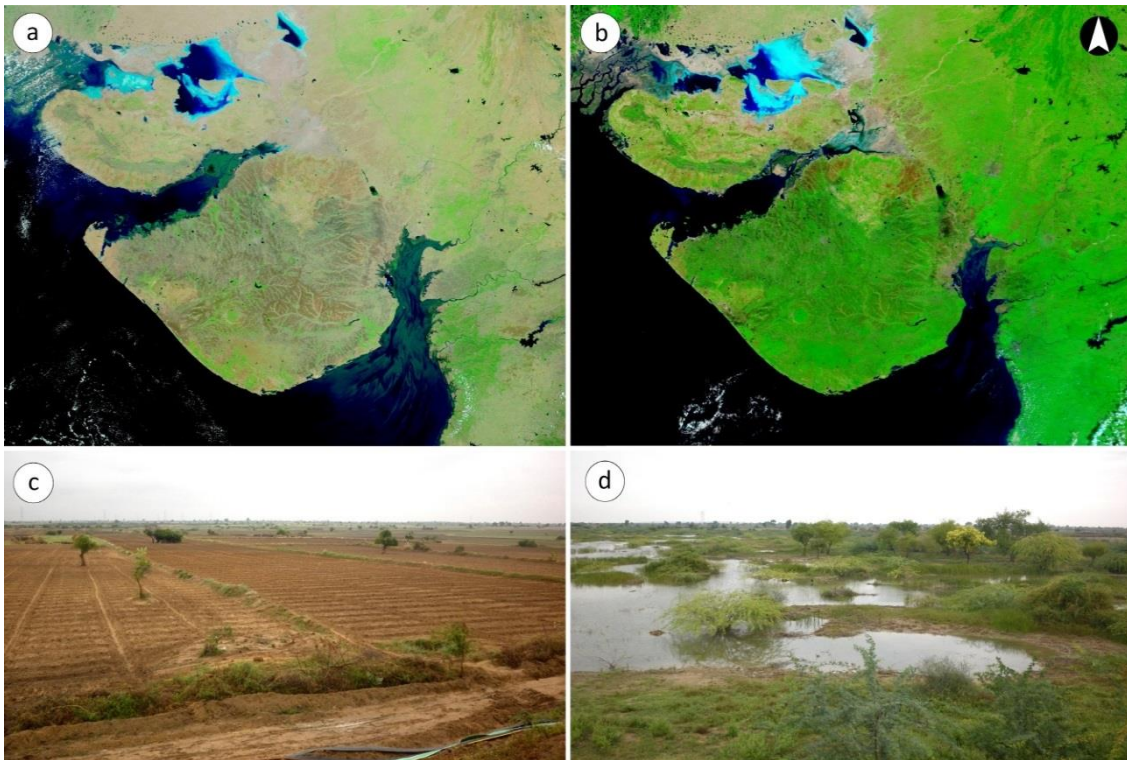


Figura 4. Exemple de la forta estacionalitat que produeix el monsó del sud-oest al Gujarat del Nord i el seu impacte en els recursos hídrics i la vegetació: (a) imatge MODIS poc abans del monsó (9 maig 2012), (b) imatge MODIS durant el postmonsó (9 octubre 2012), (c) conreus en depressions interdunals, (d) inundació de la interduna just després del monsó

2.3. Morfologia climàtica

Al llarg del Quaternari, s'han produït variacions en l'estabilitat del monsó que han condicionat la morfologia regional en processos produïts a llarga escala (Khadkikar *et al.* 1999). Els estudis basats en l'anàlisi de columnes de sediment han proliferat durant els últims anys, combinats amb les datacions mitjançant el mètode de Luminescència per Estimulació Òptica (OSL, per les seves sigles en anglès). Aquesta metodologia ha tingut força ressò al desert del Thar, on Goudie i Allchin (Goudie *et al.* 1973) centraren les primeres grans exploracions de sistemes àrids. El Thar ofereix localitzacions idònies per examinar la interacció entre geologia i clima, com ara dipòsits eòlics de fins fa 200.000 anys (200 ka BP) (Singhvi *et al.* 2010) o fluvials (Kar *et al.* 2001) i depressions lacustres assecades tipus *playa* (Roy *et al.* 2009). Els paleollacs de Didwala o Lunkaransar, al desert del Thar, han estat comparats amb els sediments lacustres de la regió de Nal (Prasad *et al.* 1998), ja que el sistema lacustre del Nal Sarovar és molt més pròxim al Gujarat del Nord. Les seqüències sedimentàries en

2. CONTEXT GEOGRÀFIC I CLIMÀTIC

sistemes fluvials s'han centrat sobretot als rius Mahi i Sarasbati (al Gujarat central), al riu Narmada (Gujarat del Sud) i al riu Luni (Rajasthan-Thar, veure [Tandon et al. 1997](#); [Kar et al. 2001](#)).

Entre els 200 ka i els 100 ka BP (Plistocè mitjà i superior), es produïren diverses fluctuacions entre clima humit i àrid. A partir dels sondejos realitzats en perfils de conques fluvials, i exceptuant les petites variacions per a cada conca, entre els 70-30 ka BP, al desert del Thar, i entre els 60-50 ka fins als 30-23 ka BP, al Gujarat continental, es produí una fluctuació entre el clima àrid dominant cap a un clima més humit que progressivament restaurà el règim monsonic i reduí les aportacions eòliques produïdes al desert del Thar ([Juyal et al. 2006](#)). Tot i les variacions regionals, el règim de precipitacions es mantingué estable durant almenys 20 ka. Aquesta fase d'estabilització humida ha estat documentada tant a nivell regional al llarg del Gujarat com també a escala global, amb dades que mostren processos similars a zones àrides d'Àustràlia, Aràbia o Àfrica ([Juyal et al. 2003](#)). Gran part del rebliment fluvial de la fossa de Khambhat i les maresmes de les *Rann* pertany a aquest període, que propicià una forta sedimentació atribuïda a una xarxa de "supersistemes fluvials" amb gran capacitat de transport de sediment ([Juyal et al. 2003](#)). La millora de les condicions climàtiques en aquest període també ha quedat reflectida en sondejos marítics al mar Aràbic i en perforacions al gel de l'altiplà Tibetà ([Khadkikar et al. 1999](#)).

Les dunes fòssils que caracteritzen el paisatge del Gujarat del Nord es formaren ara fa 26 ka ([Juyal et al. 2003](#)). Els dipòsits dels rius Sarasbati i Mahi evidencien una pèrdua progressiva del règim fluvial anterior a partir del 30 ka BP, que implicà un retorn a un clima molt més sec. Amb la nova fluctuació climàtica, els vents secs del monso provocaren processos de deflació que dipositaren sediment eòlic sobre les planes al·luvials del Gujarat, expandint així el cinturó de dunes que formà la màxima extensió del desert del Thar. Aquesta fase àrida coincideix, a nivell global, amb el *Last Glacial Maximum* de finals del Plistocè, que es caracteritza per l'expansió dels casquets polars a l'hemisferi nord. En canvi, les zones càlides del planeta experimentaren un clima més fred i sec, amb una disminució del règim de precipitacions i la consegüent expansió dels deserts ([Goudie 2002](#)).

Amb la consolidació de la fase humida *Younger Drias* (fase que introdueix l'Holocè a nivell global a partir del 12 ka BP) es produeix una restauració generalitzada del règim monsonic ([Srivastava et al. 2001](#)). Els registres lacustres de Nal Sarovar (Gujarat) i Didwana (Thar) indiquen que durant l'Holocè

2. CONTEXT GEOGRÀFIC I CLIMÀTIC

inicial i mig el règim de precipitacions era un 40 % més fort que al present (veure [Ajithprasad 2004](#) i [les seves referències](#)), sobretot a partir del 4.8 ka BP. Aquest augment de les precipitacions permeté l'aparició de la vegetació necessària per frenar i estabilitzar les dunes anteriors. A partir de l'holocè mig, el monsó s'estabilitzà en precipitacions estivals de menor potència, similar a les condicions climàtiques del present ([Madella i Fuller 2006](#)).

3. CONTEXT ARQUEOLÒGIC

Aquest capítol descriu la importància del Gujarat del Nord en el context arqueològic de la Civilització de la Vall de l'Indus, posant èmfasi en les tradicions regionals que emergeixen a l'àrea d'estudi d'ençà l'aparició de les primeres societats de caçadors-recol·lectors (c. 9000 aC) fins a la desintegració del món urbà protohistòric (c. 1500 aC). El capítol també recull l'estat de la recerca actual i les limitacions (p.e. manca de datacions absolutes) que dificulten la completa contextualització del registre arqueològic amb les cronologies documentades a la Vall de l'Indus i amb les oscil·lacions climàtiques produïdes durant l'Holocè.

3.1. La Civilització de la Vall de l'Indus

La Civilització de la Vall de l'Indus, també coneguda com a Civilització de Harappa o *Harappan*, en anglès (a partir del nom d'un dels seus jaciments principals, al Pakistan), s'estengué des del nord-est de l'actual Afganistan fins al Pakistan i el nord-est de l'Índia entre el 3300 i el 1300 aC ([Possehl 1994](#); [McIntosh 2008](#); [Wright 2010](#), Figura 5). La Civilització de la Vall de l'Indus és gairebé contemporània al desenvolupament de les civilitzacions d'Egipte i Mesopotàmia, si bé aquests dos escenaris són molt més coneguts per l'atracció efectuada sobre l'arqueologia romàntica i la formació de l'academicisme clàssic a principis del s. XX ([Wheeler 1953](#); [Possehl 2000](#)). L'interès acadèmic per la vall de l'Indus es gestà a partir de la dècada de 1920 amb l'inici de les campanyes d'excavació angloíndies als jaciments de Harappa i Mohenjo Daro, al Pakistan. Des de llavors, s'han documentat més de mil ciutats i ciutadelles corresponents a la fase urbana, el període àlgid de la civilització que s'estén durant la segona meitat del tercer mil·lenni aC ([Kenoyer 1991](#); [Chase et al. 2014a](#)).

3. CONTEXT ARQUEOLÒGIC

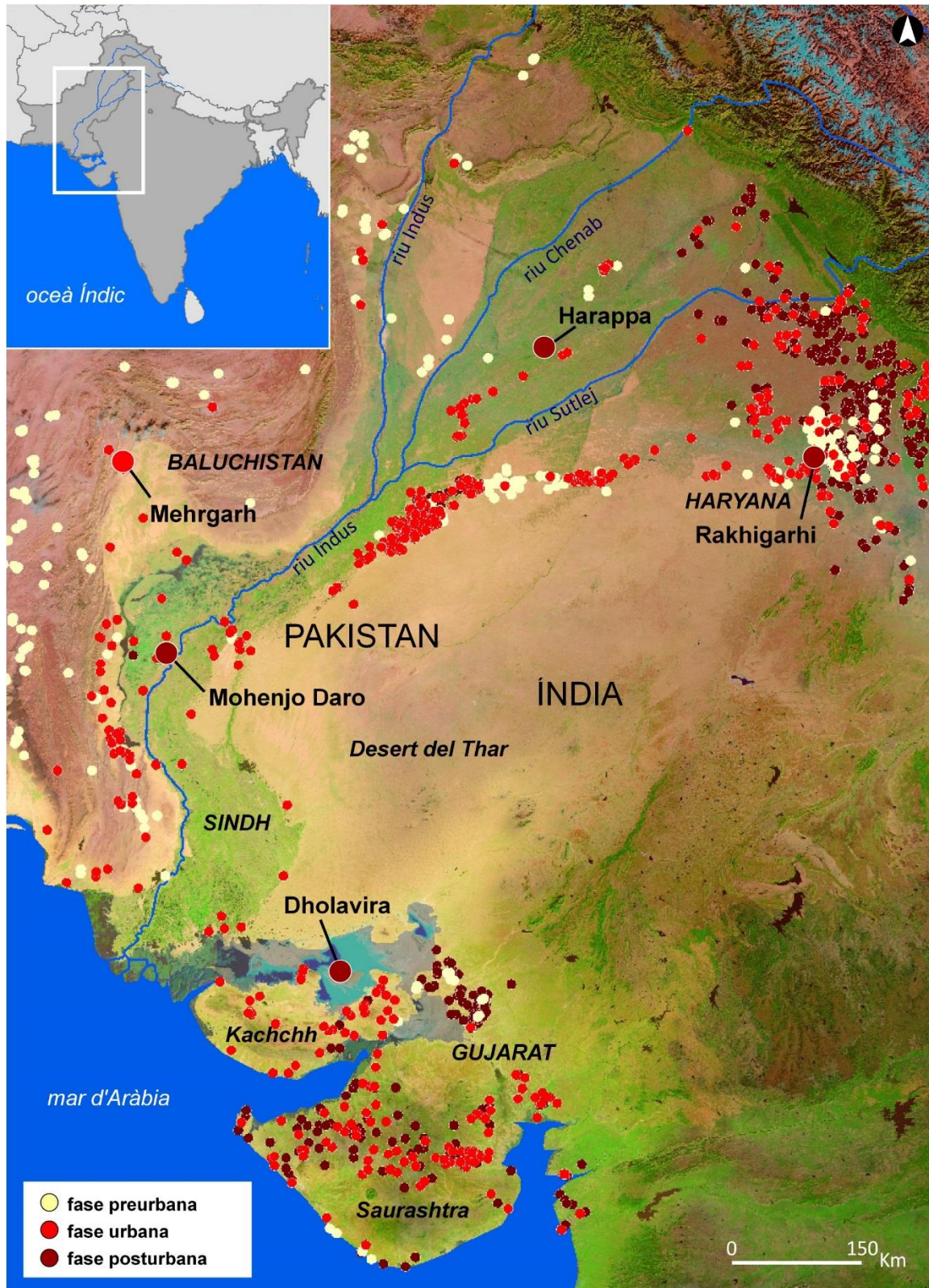


Figura 5. Extensió de la Civilització de la Vall de l'Indus amb els jaciments més significatius, segons la base de dades de Law (2008) i Rajesh (2011). Mapa base: composició d'imatge MODIS (15/11/2012) i SRTM v.4 (cgia.org).

3. CONTEXT ARQUEOLÒGIC

3.1.1. Fases de la Civilització de la Vall de l'Indus

Actualment, la Civilització de la Val de l'Indus es divideix en tres grans períodes o fases (Taula 1): (1) la fase preurbana (3300-2600 aC), caracteritzada per la consolidació i expansió de comunitats agrícoles i pastorals al llarg de les planes del riu Indus (Possehl 2002; Ajithprasad 2011); (2) la fase urbana (2600-1900aC), caracteritzada per la construcció de grans centres urbans i el comerç a gran escala (Kenoyer 1997; Kenoyer *et al.* 2013); i (3) la fase posturbana, que representa una regionalització d'assentaments de menor envergadura davant el declivi dels grans centres urbans (Sonawane 2002; Kenoyer 2005).

Taula 1. Fases i cronologies simplificades per a la Civilització de la Vall de l'Indus, adaptades de García-Granero (2015).

	Anys (cal. aC)	Tret definitori
Fase preurbana <i>Early Harappan</i>	ca. 3300 – 2600	Gestació
Fase urbana <i>Urban Harappan</i>	ca. 2600 – 1900	Urbanització
Fase posturbana <i>Post Urban Harappan</i>	ca. 1900 – 1300	Descentralització

Primeres comunitats agrícoles i pastorals

Al jaciment de Mehrgarh (Figura 6a), situat en un creuament de les rutes de l'Indus cap a la plana iraniana, s'han datat les primeres evidències d'activitats agrícoles i pastorals el context de la vall de l'Indus. Els nivells neolítics de Mehrgarh (7000-6000 aC) mostren un conjunt d'estructures d'habitació fetes d'adob, amb evidències d'estructures d'emmagatzematge a les fases finals. El registre faunístic i arqueobotànic mostra l'origen del tipus de subsistència que a la llarga esdevindria pròpia a la vall de l'Indus (Costantini 2008). Entre d'altres, a Mehrgarh es documentaren cabres domesticades i ordi introduït des del Pròxim Orient, mentre que les restes d'ovelles, zebú i el cultiu de cotó indica processos de domesticació locals (Gupta *et al.* 2006; Madella i Fuller 2006; Fuller i Harvey 2006).

Fase preurbana

Entre el cinquè i el quart mil·lenni es consoliden les comunitats d'assentaments tipus Mergarh i es produeix una primera expansió d'aquestes comunitats cap a les planes del riu Indus, on es

3. CONTEXT ARQUEOLÒGIC

desenvolupen diverses tradicions que configuren la cultura material de la fase preurbana, com ara les produccions ceràmiques i els aixovars funeraris de les ciutadelles de Kot Diji i Amri-Nal, a la província paquistanesa del Sind (Fuller i Madella 2002; Fuller 2006).

Fase urbana

Durant aquesta fase es produeix la màxima expansió territorial de la Civilització de la Vall de l'Indus i es defineixen els diversos aspectes que configuren un substrat homogeni, proporcionant integritat i cohesió en el registre arqueològic al llarg del nord-oest de l'Àsia del Sud. En destaca l'ús de l'escriptura, que ha deixat un abundant corpus d'inscripcions logogràfiques avui en dia encara indesxifrables, l'especialització artesanal, el comerç de llarga distància (amb l'ús de pesos i mesures estandaritzats) i la planificació d'un urbanisme estructurat i homogeni, amb la presència d'arquitectura monumental i segregació d'espais destinats a diverses activitats productives (McIntosh 2008, i Figura 6b i c). L'existència de muralles i d'àrees de representació o ciutadelles reflecteix una estructura de poder consolidada, si bé es dubta actualment la naturalesa de la mateixa ja que mai s'ha provat que l'estructura política estigués basada en un estat centralitzat, sinó que més aviat emergí com un conjunt de centres urbans i comercials dedicats a l'explotació i control de nínxols ecològics (Fuller i Madella 2002).

Fase posturbana

Cap a finals del segon mil·lenni aC, les rutes comercials que havien mantingut els centres urbans perifèrics s'abandonen i els grans centres urbans entren en declivi (Figura 6d). Aquesta fase representa la regionalització de l'anterior món urbà, i es caracteritza per un augment de petits assentaments basats en l'explotació de recursos estacionals i l'augment de l'activitat pastoral. Les teories sobre cataclismes abruptes, tant naturals com antròpics, que han intentat explicar la "caiguda" del món urbà (p.e. invasions de pobles foranis, canvis radicals en el clima o l'esgotament dels recursos) són avui en dia rebutjades. Les hipòtesis actuals, en canvi, busquen un consens basat en una combinació de diversos factors socioecològics, com la progressiva aridificació del nord-oest de l'Àsia del Sud (Dixit *et al.* 2014; Prasad *et al.* 2014), el canvi de cursos fuvials (Giosan *et al.* 2012), i l'adaptació de noves estratègies de subsistència d'àmbit local, que a la llarga provocaren el

3. CONTEXT ARQUEOLÒGIC

trencament de la connectivitat entre els diversos centres de la Civilització de la Vall de l'Indus (Madella i Fuller 2006; Shinde *et al.* 2006; Petrie *et al.* en premsa).



Figura 6. Exemples arqueològics de la Civilització de la Vall de l'Indus. (a) Nivells neolítics al jaciment de Mehrgarh (www.wondersofpakistan.wordpress.com); (b i c) tell i urbanisme monumental a la ciutat de Mohenjo Daro; (d), ceràmiques provinents de nivells posturbans del jaciment de Harappa (www.harappa.com).

3.1.2. La importància del Gujarat i les zones perifèriques

El nord-oest indi (el Punjab i Haryana al nord, i el Gujarat i el Rajasthan a l'oest) conforma el que tradicionalment s'ha anomenat la "perifèria" de la Civilització de la Vall de l'Indus. La protohistòria d'aquestes regions va ser estudiada, durant gran part del segle XX, seguint el concepte de centre-perifèria, segons el qual els trets característics d'activitats sedentàries (p.e. agricultura, urbanisme i comerç) en aquestes àrees van aparèixer a partir de l'arribada de poblacions procedents de la vall de l'Indus durant la seva fase urbana. Aquesta visió fou estudiada sobretot a partir de la separació de l'Índia amb el Pakistan, el 1947. L'academicisme més conservador utilitzà la Civilització de la Vall de l'Indus com a exemple d'una societat complexa i avançada, i centrà l'objectiu del seu estudi en el descobriment de grans centres urbans dins el nou territori de l'Índia amb fins nacionalistes. Sota

3. CONTEXT ARQUEOLÒGIC

aquesta premissa, i de forma similar al que succeí amb els estudis al Pròxim Orient i Egipte, durant anys la recerca arqueològica se centrà en l'excavació i l'estudi de complexos urbans per tal de respondre preguntes relacionades amb l'urbanisme, l'estructura social i l'auge i desintegració de la Civilització de la Vall de l'Indus, entesa llavors com a imperi (Fairervis 1961; Singh 1971; Possehl 1979; Possehl 1994). L'esbiaix acadèmic vers els jaciments urbans fins i tot ignorà els primers treballs (Subbarao 1958; Rao 1963) que discutien un possible origen autòcton per a les comunitats agrícoles i pastorals al Gujarat.

A partir dels anys 1960, l'excavació de Somnath, a Saurashtra, evidencià un substrat autòcton protourbà, conegut com a Prabhas Patan, que no tenia cap similitud amb els materials de la fase urbana localitzats en grans centres, i que es remuntava a l'inici del 3r mil·lenni aC. Poc després, al Gujarat de Nord, apareixien evidències d'un altre substrat autòcton, encara més anterior, conegut com la tradició Anarta (Rajesh *et al.* 2013a; Rajesh *et al.* 2013b, i referències en el text). La descoberta de trets culturals autòctons, intrínsecament relacionats amb l'aparició de les primeres comunitats d'agricultors i ramaders, donà pas a les investigacions centrades en els diversos actors i factors que intervingueren en les dinàmiques socioecològiques d'aquestes tradicions regionals durant l'Holocè mig (Sonawane 2000; Sonawane 2004; Ajithprasad i Sonawane 2011).

Actualment, i en paral·lel a la continuïtat dels estudis als centres urbans, es reconeix la rellevància de les zones perifèriques en el desenvolupament de la Civilització de la Vall de l'Indus. Estudis recents en diverses regions de l'actual Pakistan i el nord-oest de l'Índia han evidenciat trajectòries socioeconòmiques independents, i han subratllat la importància d'estudiar les dinàmiques de les comunitats regionals per tal d'entendre, eventualment, la seva interacció en el món de la vall de l'Indus (Herman 1996; Ajithprasad 2002, 2004; Petrie i Thomas 2012; Chase *et al.* 2014a, 2014b).

3.2. L'arqueologia del Gujarat

Les primeres influències de la vall de l'Indus al Gujarat són evidents en certes produccions ceràmiques a partir del 2800 aC (Ajithprasad 2004), si bé la mobilitat interregional des del Sindh, al Pakistan, fins a Saurashtra s'hauria produït amb anterioritat a través del Kachchh o la *Little Rann* per tal d'aprofitar els recursos que ofereixen els diversos nínxols ecològics del Gujarat (Allchin i Allchin 1997, Kenoyer 1997; García-Granero *et al.* 2015), en especial: (1) les zones interdunals de les planes al·luvials, explotades com a àrees d'aprofitament de recursos hídrics i zones de pasturatge; (2) la costa de la *Little Rann*, explotada per a recursos marins (p.e. la intensa producció de cargols marins tallats per a ornaments personals, al jaciment urbà de Gola Dhoro, o la presència d'otòlits en molts jaciments); i (3) els afloraments rocosos de Datrana, les illes de la *Little Rann* i les muntanyes Aravalli, idònies per a la indústria microlítica, especialment d'agata i calcedònia (Gadekar *et al.* 2013; Harris 2013; Law 2013).

3.2.1. Caçadors recol·lectors: jaciments aceràmics

Les exploracions al desert del Thar han documentat les primeres evidències d'ocupacions humanes al nord-oest indi durant el Paleolític mitjà (Blinkhorn *et al.* 2013) i el Paleolític superior (Blinkhorn 2014), en estreta relació a la presència de notòries xarxes fluvials que haurien estat actives durant la transició de períodes àrids i humits al Plistocè superior (Boivin *et al.* 2013). Al Gujarat del Nord, les evidències d'indústria lítica associades a comunitats paleolítiques són molt escasses i manquen d'un context arqueològic detallat (Allchin *et al.* 1972), si bé en els darrers anys s'han reprès les investigacions precisament per explicar aquesta manca d'evidències durant el Plistocè (Costa *et al.* 2011).

Les evidències més antigues d'indústria lítica durant l'Holocè provenen d'un nivell amb micròlits documentat durant l'estudi d'uns sondejos paleoambientals a la duna fòssil d'Akhaj, a prop del riu Sabarmati (Juyal *et al.* 2003). Els micròlits, juntament amb restes de fauna i carbons, apareixen en un nivell d'estabilització de la sedimentació eòlica, la base del qual es datà en 11 ± 3 ka, i la part superior en 9 ± 1 ka. Juyal *et al.* (2003) comparen aquest nivell amb els dipòsits microlítics de la duna de Langhnaj, que es poden allargar fins a una datació màxima d'ara fa 10.5 ka. D'altra banda, els nivells microlítics de les excavacions de Datrana IV semblen remuntar-se al principi del vuitè mil·lenni aC

3. CONTEXT ARQUEOLÒGIC

([García-Granero 2015](#), i dades no publicades de P. Ajithprasad). A partir d'aquestes dates, l'establiment de comunitats de caçadors-recol·lectors al Gujarat del Nord s'associa amb la millora del règim monsonic produït a principis de l'Holocè, i que comportà la fi de l'activitat eòlica a la regió ([Sonawane 2000](#); [Ajithprasad 2004](#)).

Alguns investigadors defensen que les poblacions de caçadors-recol·lectors van existir al Gujarat del Nord fins el final del tercer mil·lenni aC, i que, per tant, van interactuar amb poblacions d'agricultors i ramaders ([Sonawane 2000](#)). Aquesta hipòtesi es basa en les datacions dels nivells microlítics de Bagor (al Rajasthan) i els últims nivells de Langhnaj, i demostra la forta tradició de l'arqueologia del nord-oest indi a l'hora d'identificar la indústria lítica com a indicador exclusiu d'ocupacions de caçadors-recol·lectors. Més recentment, davant la inexactitud de les excavacions de Bagor i Langhnaj (on també es documentà la presència de fauna d'espècies domesticades i materials de la Civilització de la Vall de l'Indus en els registres microlítics), tant Patel ([2009](#)) com Gadekar *et al.* ([2014](#)) han demostrat que la indústria microlítica (i les seves tècniques de talla) gairebé no presenten variacions durant l'Holocè inicial i mig i, per tant, l'associació exclusiva de micròlits amb comunitats de caçadors-recol·lectors resulta invàlida. A Loteshwar, per exemple, tant les excavacions de la MSUB als anys noranta i l'excavació del NoGAP el 2009 documentaren micròlits al dos nivells, ben diferenciats, de caçadors-recol·lectors (7168-4703 cal. aC) i agropastors (3681-2243 cal. aC, veure [García-Granero et al. 2016](#)). Arran d'aquestes troballes, diversos investigadors advoquen per utilitzar el terme "microlític" com a indicador neutral que només indica presència d'indústria lítica, i no pas com a indicador cronològic per a ocupacions exclusivament de caçadors-recol·lectors ([Conesa 2011](#); [Rajesh i Krishnan 2014](#), [Taula 2](#)). D'altra banda, l'establiment de cronologies clares per al grups de caçadors-recol·lectors al Gujarat del Nord està en constant revisió i necessita l'aportació crítica de l'estudi dels micròlits ([Gadekar et al. 2016](#)), l'anàlisi faunístic (p.e. [Costa 2015](#)) i l'estudi arqueobotànic (p.e. [García-Granero 2015](#)), o d'altres recerques que aportin indicadors antròpics complementaris al registre material, per exemple, la identificació d'identificadors fisicoquímics i l'estudi de la seva distribució espacial (p.e. [Lancelotti et al. 2013](#); [Negre et al. 2016](#); [Conesa et al. enviat per publicació](#)).

3. CONTEXT ARQUEOLÒGIC

3.2.2. Primers agricultors i ramaders: la tradició Anarta

El registre Calcolític del Gujarat del Nord mostra el desenvolupament i expansió de tradicions autòctones regionals, *vis-à-vis* amb la configuració social de la Civilització de la Vall de l'Indus i les seves tradicions preurbanes (Ajithprasad 2002). Aquestes tradicions regionals s'agrupen en tres grans grups: la tradició Pre-Prahbas, la tradició *Early Harappan Sindh* i la tradició Anarta.

El registre ceràmic de Pre-Prahbas només es documenta als jaciments de Datrana IV i V, un conjunt de dunes fòssils a prop de la costa nord de la *Little Rann*, en un indret a 400 km de Prahbas Patan a Somnath, a Saurashtra, el jaciment d'on pren el nom aquesta tipologia ceràmica. El jaciment de Datrana IV, excavat als anys noranta per la MSUB i el 2010 per el NoGAP (Madella *et al.* 2012b), presenta una ocupació de caçadors-recol·lectors (vuitè mil·lenni cal. aC, segons dades no publicades) i diversos nivells superposats calcolítics amb una presència majoritària de ceràmica Pre-Prahbas, acompanyada de ceràmica *Early Harappan Sindh* i Anarta (Ajithprasad 2002; Rajesh *et al.* 2013a; Rajesh i Krishnan 2014). La relació entre els centres de Datrana i Somnath no són encara prou clares, si bé les últimes datacions de Datrana IV (3300-3000 cal. BC), anteriors a aquelles de Somnath, apunten a possibles moviments migratoris de nord a sud entre el Katchchh i Saurashtra a través del corredor litoral del Gujarat del Nord o les illes de la *Little Rann* (García-Granero 2015).

Taula 2. Principals cultures materials al Gujarat del Nord.

Cultura material	Descripció
Microlític	Indica la presència d'indústria de micròlits
Anarta	Indica la presència de la tradició Anarta
<i>Early Harappan Sindh</i> Pre-Prahbas Amri-Nal <i>Harappan Burial Pottery</i>	Indicador cronològic (ca. 2800-2600 aC), contemporani a part de la fase preurbana de la Civilització de la Vall de l'Indus. Apareix sobretot en contextos funeraris, probablement fruit de contactes amb la Vall de l'Indus.
<i>Sorath Harappan</i> Rangpur IIA Rangpur IIB	Indicador cronològic, contemporani a la fase urbana de la Civilització de la Vall de l'Indus. Ocupacions estacionals de comunitats agrícoles i pastorals en contacte amb el món de l'Indus
<i>Late Sorath Harappan</i> Rangpur IIC Rangpur III Lustrous Red Ware	Indicador cronològic, contemporani a la fase posturbana de la Civilització de la Vall de l'Indus. Canvi respecte l'etapa anterior, descentralització <i>Harappan</i>

3. CONTEXT ARQUEOLÒGIC

Possehl (2007) classificà els assentaments *Early Harappan Sindh* a partir de la ceràmica i els aixovars funeraris de les cultures materials d'Amri Nal, Kot Diji i Balakot (a les províncies paquistaneses del Sindh i Baluchistan), i identificà un moviment migratori des del Sindh per al pastoreig i l'explotació temporal de les planes d'inundació del Gujarat del Nord. El primer conjunt d'enterraments *Early Harappan Sindh* aparegué el 1985 a les primeres fases d'hàbitat de Nagwada (meitats del quart mil·lenni fins primera meitat del tercer mil·lenni aC), per sota els nivells d'ocupació associats a la fase urbana de la Civilització de la Vall de l'Indus, i es tornà a documentar a les excavacions de Santhli (sitges funeràries sense estructures d'hàbitat), Moti Pipli (dipòsits d'habitació en duna fòssil però sense enterraments, veure [Sonawane 2000](#)) i Vaharvo (acompanyant un enterrament infantil, veure [Mushrif-Tripathy et al. 2014](#)).

L'any 1985, als nivells de la fase urbana de la Civilització de la Vall de l'Indus del jaciment de Nawgada es documentaren les primeres produccions ceràmiques de la tradició Anarta (el mot *Anarta* és l'expressió tradicional amb que es coneix el territori del Gujarat del Nord). El 1991, a Loteshwar, els materials Anarta van aparèixer de nou en un conjunt de sitges datades al quart mil·lenni aC ([Ajithprasad 2002](#)). Amb les noves datacions de nivells d'hàbitat Anarta localitzats durant l'excavació del NoGAP (2700-2300 cal. aC) es confirmà que la tradició Anarta és una tradició autòctona anterior a la consolidació de la fase urbana de la Civilització de la Vall de l'Indus al Gujarat del Nord. Les troballes del conjunt de tipologies ceràmiques Anarta es limiten a la franja del Gujarat del Nord, amb l'excepció d'algunes troballes a Kachchh i dos jaciments puntuals a Saurashtra, si bé es desconeixen les possibles relacions entre aquestes regions. La tipologia material Anarta, com succeix amb les micròlits, perdura en el temps fins a les fases de *Late Sorath Harappan* (segons datacions revisades per [Rajesh et al. 2013b](#), fins ca. 1600 aC).

Malgrat l'abundància de material Anarta en superfície, només els nivells Anarta de Loteshwar han estat investigats en profunditat, i reflecteixen un tipus de comunitat pastoral en possible relació amb la domesticació local del zebú ([Patel 2009](#)). Les recents investigacions sobre les estratègies de subsistència Anarta ([García-Granero 2015](#)) reflecteixen també una incipient agricultura adaptada a l'estacionalitat del monsó a partir de la cultivació de mills i altres conreus de possible domesticació local com el sèsam, sembrats l'estació del monsó o *kharif*. Segons [García-Granero et al. \(2016\)](#), el

3. CONTEXT ARQUEOLÒGIC

període de sembra i collita dels mills s'ajusta als cicles de mobilitat estacional de poblacions seminomàdes (de fet encara és la font principal de subsistència per a diverses poblacions del Sahel) i la seva presència en els nivells Anarta de Loteshwar reflecteix l'origen local i pastoral d'aquesta tradició, fortament adaptada a l'estacionalitat del monso.

3.2.3. La Civilització de la Vall de l'Indus: *Sorath Harappan* i *Late Sorath Harappan*

Els assentaments contemporanis a la fase urbana de la Civilització de la Vall de l'Indus al Gujarat es poden dividir en quatre grans tipologies: (1) grans complexos urbans (Dholavira, al Kachchh, i Lothal, a la depressió de Nal, veure [Figura 7a i b](#)); (2) ciutadelles o petits assentaments emmurallats, sobretot al Kachchh (Juni Kuran, Lotada, Shikarpur, Kammer, Surkotada o Kotada, entre altres, veure [Figura 7c i d](#)); (3) assentaments de caire comercial, dedicats a explotacions gairebé exclusives, com Gola Dhoro (ornaments de cargols marins, coure i micròlits), Rodji (explotació agrícola) o Padri (extracció de sal); i (4) assentaments menors, de caràcter rural i agrícola o ramader, repartits arreu del territori i sovint barrejats amb ceràmiques de tradicions regionals, fet que portà a Possehl a parlar de *Sorath Harappan*, una tradició pròpia de la Civilització de la Vall de l'Indus al Gujarat ([Possehl i Herman 1990](#); [Ajithprasad i Sonawane 2011](#); [Chase et al. 2014a](#); [Rajesh i Krishnan 2014](#)).

Al Gujarat del Nord, en canvi, no s'hi troba cap complex urbà, i només alguns jaciments (p.e. Nawgada, Zekhada) mostren evidències d'estructures d'hàbitat permanents. Les tipologies materials de la fase urbana de la Civilització de la Vall de l'Indus són força abundants (p.e. segells de terracota amb inscripcions, denes de pedres semiprecioses, discs ceràmics o manufactures de closques de mol·lusc), però sovint es troben en nivells mixtes amb ceràmiques de la tradició Anarta o ceràmiques de les sèries de Rangpur. Rangpur és un jaciment de Saurashtra, a prop de la depressió de Nal, l'excavació del qual durant la dècada de 1960 ([Rao 1963](#)) documentà diverses fases associades a *Sorath Harappan* amb materials ceràmics comuns a tot el Gujarat del Nord ([Sonawane i Ajithprasad 1994](#); [Ajithprasad 2011](#)). Els assentament *Sorath Harappan* s'associen a ocupacions de curta durada, amb una barreja d'economies dedicades a l'explotació pastoral en regions obertes, per una banda, i un contacte amb els centres urbans basat en la producció de petites manufactures. El caràcter ramader d'aquestes comunitats es veuria intensificat per les rutes de transhumància entre les regions del Kachchh i Saurashtra, tot aprofitant els recursos estacionals produïts pel monso.

3. CONTEXT ARQUEOLÒGIC

La fase *Late Sorath Harappan* (1900-1600 aC segons [Possehl i Herman 1990](#), fins al 1500 aC segons [Ajithprasad 2004](#) o fins al 1400 aC segons [Sonawane 2004](#)) engloba les manifestacions regionals del Gujarat desenvolupades durant la fase posturbana de la Civilització de la Vall de l'Indus, en un context en què els factors urbans anteriors desapareixen. Molts jaciments amb nivells d'urbanisme anterior no presenten continuïtat, com Nawgada o Surkotada, o bé mostren un gradual declini econòmic. Així succeeix a Rodji, Padri, Prahbas Patan, i Rangpur. Als complexos urbans, com Lothal i Dholavira, s'abandonen les àrees de representació i els hàbitats de tipus residencial, que s'amortitzen per a la construcció de cabanes ([Figura 7e i f](#)), mentre que les ciutadelles es converteixen en espais d'enterrament o són reocupades amb assentaments temporals ([Ajithprasad i Sonawane 2011](#); [Rajesh 2011](#)).

A nivell material s'evidencia una pèrdua de les matèries primeres i un trencament de les rutes que proveïen objectes manufacturats de la vall de l'Indus. En general, però, els estils ceràmics es mantenen força regulars, sobretot per a la tradició Anarta, i apareixen nous tipus associats a les fases finals de Rangpur, com les ceràmiques polides de vernís vermell anomenades *Lustrous Red Ware* ([Sonawane 2004](#)). L'augment de petits assentaments durant aquesta fase es relaciona amb un canvi en les estratègies de subsistència davant el trencament de les rutes amb la vall de l'Indus, que dona lloc a l'increment de les activitats pastorals i l'agricultura d'abast local ([Ajithprasad 2004](#)).

3. CONTEXT ARQUEOLÒGIC

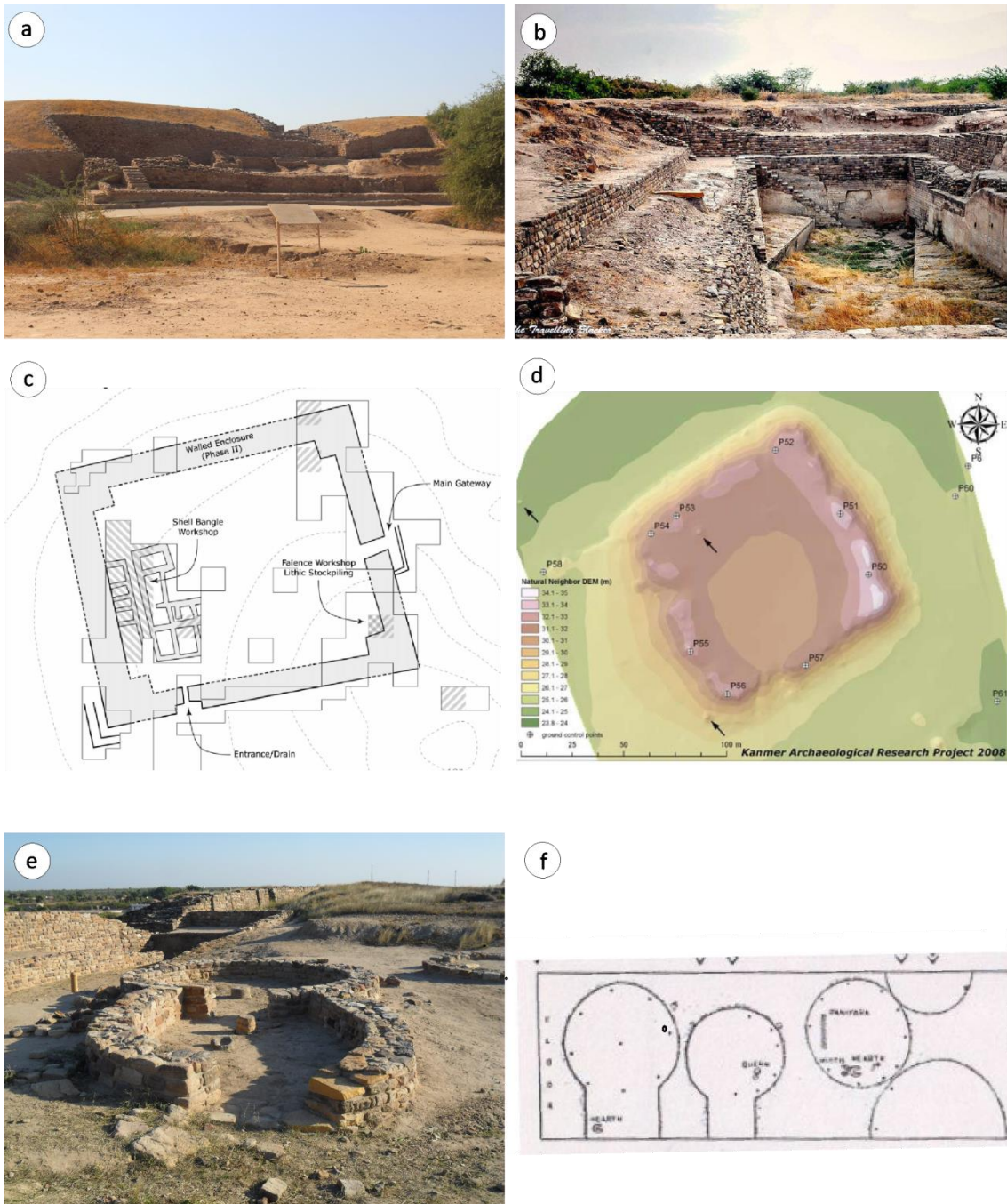


Figura 7. Exemples de jaciments de la Civilització de la Vall de l'Indus al Gujarat. (a i b) Fotografies de l'accés monumental i un dels dipòsits d'aigua que rodegen la ciutat de Dholavira, al Kachchh. (c) Planimetria de la ciutadella i centre comercial de Gola Dhora (Bagasra), al nord de Saurashtra (extret de Chase 2010: Figura 2); (d) Aixecament topogràfic realitzat amb DGPS per a la ciutadella de Kanmer, al Kachchh (extret de Teramura *et al.* 2008: Figura 3.49), de planta molt similar a altres ciutadelles de la regió (p. e. Gola Dhoro, Juni Kuran o Shikarpur); (e) Cabana i àmbits rurals de la fase posturbana, que amortitzen nivells urbans a la ciutadella de Dholavira; (f) Sòls de cabana de la fase posturbana documentats a Zekhada, segons Bhan (2011).

3.3. La carta arqueològica del Gujarat del Nord

El gran nombre de jaciments coneguts per al Gujarat del Nord, i el Gujarat en particular, contrasta amb el limitat nombre d'excavacions i la manca general de datacions absolutes. Abans d'iniciar aquesta recerca, al Gujarat del Nord es coneixien 120 assentaments mesolítics, calcolítics i de l'edat del Coure. D'aquests, només se'n havien excavat 9 (Taula 3). Aquesta xifra contrasta amb els més de 40 assentaments (sobretot fortificacions de la fase urbana de la Civilització de la Vall de l'Indus), que s'han excavat a la regió del Kachchh i Saurashtra (Rajesh 2011, Figura 8).

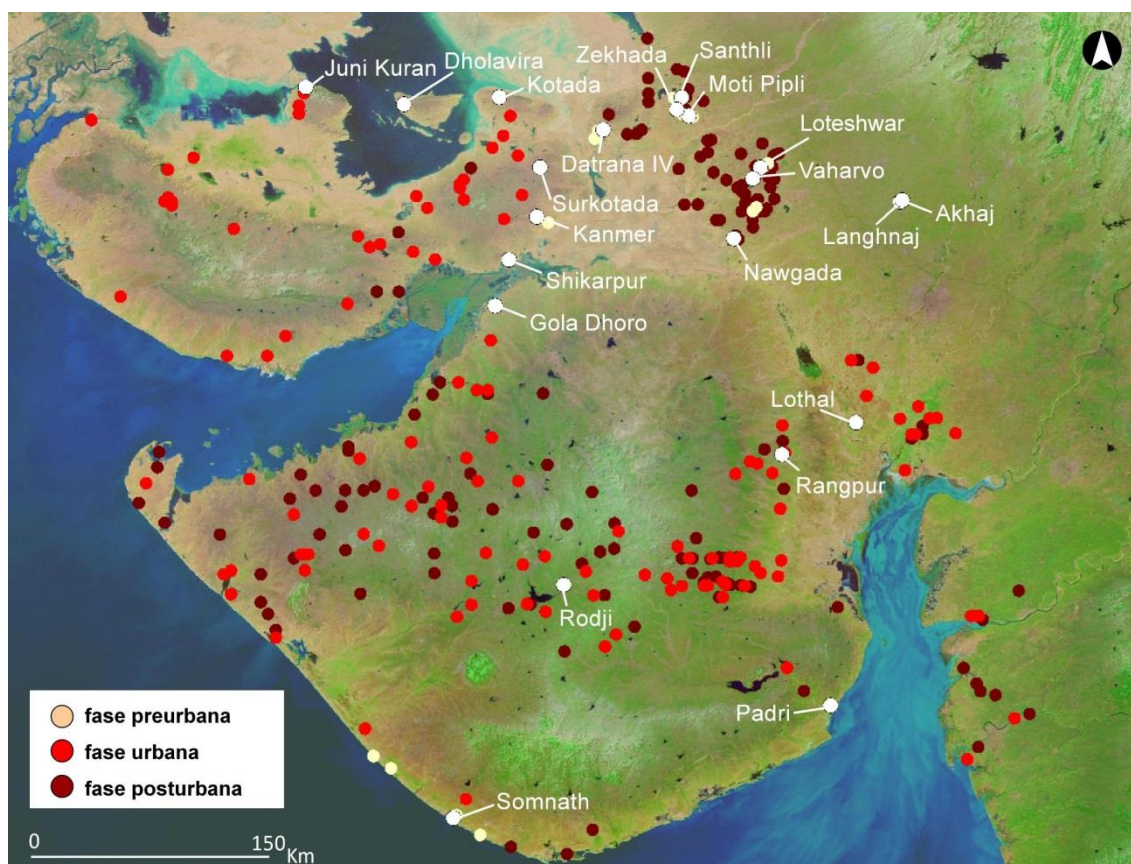


Figura 8. Principals jaciments excavats del Gujarat (en blanc). Al fons, jaciments de diverses fases segons Rajesh (2011).

La prehistòria del Gujarat del nord està principalment representada per assentaments de caràcter estacional, caracteritzades per la dispersió de materials escampats en la superfície de dunes fòssils (Figura 9). En alguns casos, les excavacions han documentat evidències d'estructures d'habitatge o d'emmagatzematge de caire semi permanent, com ara paviments de cabana o sitges, si bé cap

3. CONTEXT ARQUEOLÒGIC

d'aquestes estructures és visible en superfície. Els jaciments sovint presenten dos o més fases d'ocupació, i poden correspondre a tres grans grups: (1) grups aceràmics de caçadors-recol·lectors (Mesolític); (2) comunitats agrícoles i pastorals, amb ceràmiques de caràcter regional o que bé imiten o mostren influències provinents de la vall de l'Indus (Calcolític); i (3) jaciments que continuen la tradició agrícola i pastoral anterior, i que es relacionen o bé formen part de la Civilització de la Vall de l'Indus (Edat del Bronze).

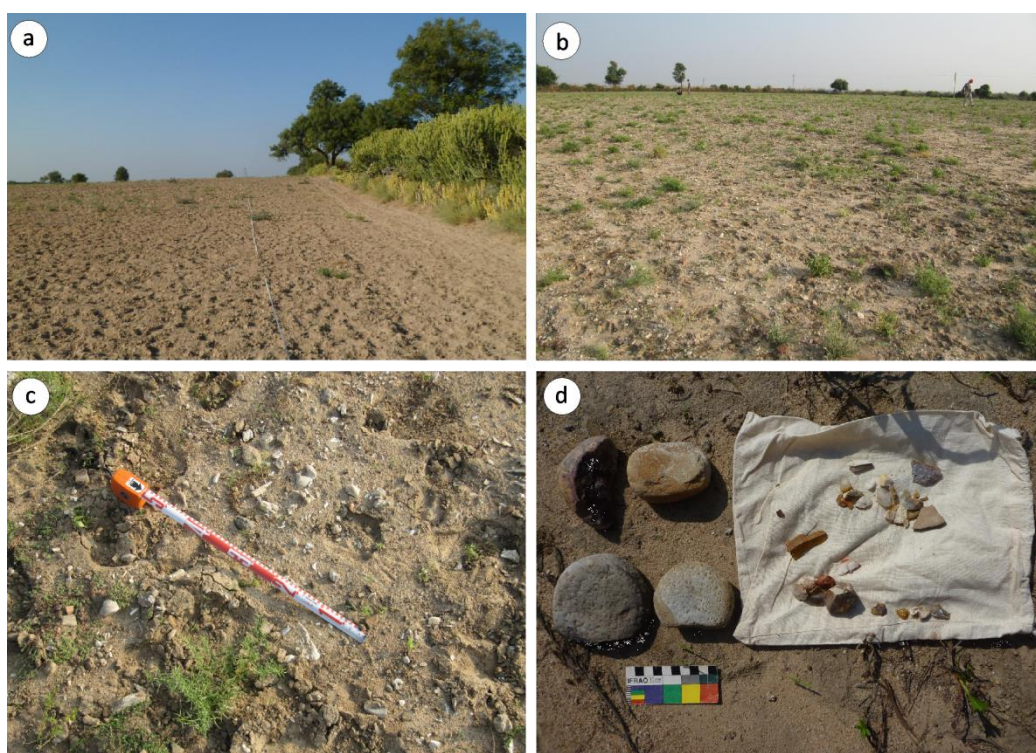


Figura 9. Exemple de localitzacions amb evidències arqueològiques en superfície al Gujarat del Nord. (a) Desnivell de la duna de Loteshwar; (b) Superfície plena d'ecofactes a la duna de Vaharvo; (c i d) Detall de restes d'ecofactes i artefactes recuperats de la superfície de Vaharvo.

Els assentaments excavats al Gujarat del Nord presenten una o diverses fases d'ocupació. Els assentaments monofase posturbans de Datrana II i Ratanpura evidencien la perdurabilitat dels materials Anarta i les tècniques de talla microlítica (Gadekar et al. 2014). Els nivells amb diverses fases d'ocupació sovint corresponen a nivells aceràmics de grups de caçadors-recol·lectors i nivells posteriors Anarta o d'altres tradicions regionals del Calcolític.

3. CONTEXT ARQUEOLÒGIC

Taula 3. Jaciments excavats a l'àrea d'estudi fins el 2009 (simplificat a partir d'Ajithprasad 2004 i Patel 2009).

	Assentaments multifase					Assentaments monofase			
	Loteshwar	Moti Pipili	Datrana IV	Datrana V	Santhi II	Nagwada I i IV	Zekhada	Datrana II	Ratanpura
1500								Post Urban H.	Post Urban H.
2500						Urban H.	Urban H.		
3000		Fase II		Fase II	Fase II	Anarta	Anarta	Micròlits	
	Fase II	Anarta	Fase II	Anarta	Anarta	<i>EHS</i>			
3500	Anarta	<i>EHS</i>	Anarta	<i>EHS</i>	<i>EHS</i>				
4500	Micròlits	Fase I		Fase I	Fase I				
	Fase I	Micròlits fauna otòlits	Fase I	Micròlits fauna	Micròlits fauna otòlits				
5000 fins 7000	Micròlits fauna otòlits		Micròlits fauna otòlits						

3.3.1. Excavacions recents

L'escassetat de registres arqueològics clars que poguessin aportar nova llum sobre la transició o possible interacció de grups de caçadors-recol·lectors amb comunitats pastorals i agrícoles impulsà les campanyes d'excavació i prospecció del NOGAP (veure [Madella et al. 2011, 2012a, 2012b; Conesa et al. enviat per publicació](#)).

L'excavació del NoGAP a Loteshwar (2009) documentà una seqüència estratigràfica similar a les excavacions de 1991: un dipòsit de caçadors-recol·lectors a la cota -1,20 m de profunditat i, per sobre, un dipòsit agropastoral a la cota -0,60 m amb tres sitges que tallaven els nivells anteriors ([Balbo et al. 2015](#), veure [Figura 10a i b](#)). Els artefactes recuperats dels nivells aceràmics inferiors mostren principalment eines de mòlta i indústria lítica similars als nivells superiors, que però inclouen un gran nombre de fragments ceràmics (majoritàriament del tipus Anarta), alguns dels quals presenten traces d'ús posterior (com ara discs perforats), objectes metàl·lics, denes, braçalets i nombrosa indústria lítica ([Gadekar et al. 2014](#), veure [Figura 10e, f i g](#)). Els resultats de l'estudi arqueobotànic suggereixen que els habitants Anarta de Loteshwar combinaven la ramaderia

3. CONTEXT ARQUEOLÒGIC

seminòmada de bovins (Patel 2009) amb el cultiu de plantes altament adaptades a un medi semiàrid, com ara els mills petits i el sèsam, la qual cosa acabà resultant en la seva domesticació (García-Granero *et al.* 2016).

L'excavació del NoGAP a Datrana IV (2010) no evidencià els nivells de caçadors-recol·lectors documentats en campanyes anteriors (1993-94), i només documentà una ocupació agropastoral amb una potència estratigràfica de 1,2 m de profunditat, caracteritzada per diversos conjunts de material, que inclouen ceràmica tipus Pre-Prabhas i de la fase preurbana de la Civilització de la Vall de l'Indus, juntament amb objectes de coure, denes, collarets i una quantitat inusual d'indústria lítica, la tècnica de talla de les quals no s'ha documentat a cap altre assentament (Figura 10c i h). L'abundància de les talles microlítics fan que Datrana IV s'interpreti com un taller a cel obert, aprofitant els recursos d'àgata, cornalina, quars i amazonita que es troben als afloraments rocosos de Datrana, tot i que l'excavació també documentà algunes talles de sílex provinents de Rohri, al Pakistan (Gadekar *et al.* 2013).

Finalment, l'excavació del NoGAP a Vaharvo Timbo (2011) documentà un nivell uniforme de caçadors-recol·lectors a la cota -0,50 m amb tres sitges de diferent mida i forma que baixaven fins la cota -1,35 m (Figura 10d). Els materials d'aquesta cala inclouen fragments de fauna treballada, indústria microlítica, petits fragments de ceràmica sense determinar (probablement intrusions modernes) i denes de conquilles. Molt a prop de la superfície també aparegué una fossa d'inhumació infantil amb aixovar tipus *Early Harappan Sindh* (Mushrif-Tripathy *et al.* 2014). Els resultats de l'estudi arqueobotànic suggereixen l'explotació de diversos nínxols ecològics com a part d'una economia d'ampli espectre (García-Granero *et al.* 2016).

3. CONTEXT ARQUEOLÒGIC



Figura 10. Exemples de l'arqueologia del Gujarat del Nord. (a i b) Excavació i interpretació de la duna de Loteshwar, el 2009 (dades NoGAP). (c) excavació a la duna de Datrana IV, el 2010; (d) Excavació a la duna de Vaharvo, el 2011; (e i f) Exemples de recipients ceràmics Anarta i boles de fang (*clay lumps*) recuperats a Loteshwar (extret de Rajesh 2011: Figura 4.24 i 4.30); (g i h)

3. CONTEXT ARQUEOLÒGIC

exemples de micròlits recuperats a Loteshar i Datrana IV (extret de Rajesh 2011: Figura 4.25 i 4.55).

3.3.2. Prospeccions arqueològiques

La major part de la informació arqueològica existent per al Gujarat del Nord prové de diverses prospeccions en superfície, efectuades de forma regular especialment des de la dècada de 1980. En destaquen les exploracions de l'*Archaeological Survey of India* recollides en els *Indian Archaeology Reports* (e.g. IAR 1992-93, IAR 1994-95, veure Bisht *et al.* 2000; Manjhi *et al.* 2000), i les exploracions de la MSUB (Bhan 1994; Sonawane 1994; Sonawane i Ajithprasad 1994) i de l'*Indus Project* del *Research Institute for Humanity and Nature* del Japó (Seth *et al.* 2007). Els resultats d'aquests treballs foren revisats i recollits per Rajesh i Patel (2007a, 2007b) en una carta arqueològica en format de llistat o *gazetteer* a on consten les coordenades per a cada jaciment i la seva adscripció cronològica en base, principalment, a la classificació tipocronològica del registre ceràmic recollit en superfície.

Aquestes prospeccions corresponen als períodes d'exploració arqueològica que Rajesh (2011) ha definit com a “dècada de les exploracions a valls fluvials” i “dècada de les exploracions per districte”. Aquestes exploracions d'abast local i centrades en àrees específiques expliquen en certa manera els mapes de distribució d'assentaments al Gujarat del Nord (Figura 11. Representacions de la distribució d'assentaments al Gujarat del Nord, segons Bhan (1993: Fig.1, esquerra) i Ajithprasad (2004: Fig. 3, dreta).

11), a on s'observen àrees amb gran densitat d'assentaments i d'altres on l'absència d'assentaments es pot explicar per la manca de prospeccions realitzades o la manca de visibilitat del registre arqueològic, i no pas per l'absència d'ocupacions humanes en un territori o nínxol en concret.

3. CONTEXT ARQUEOLÒGIC

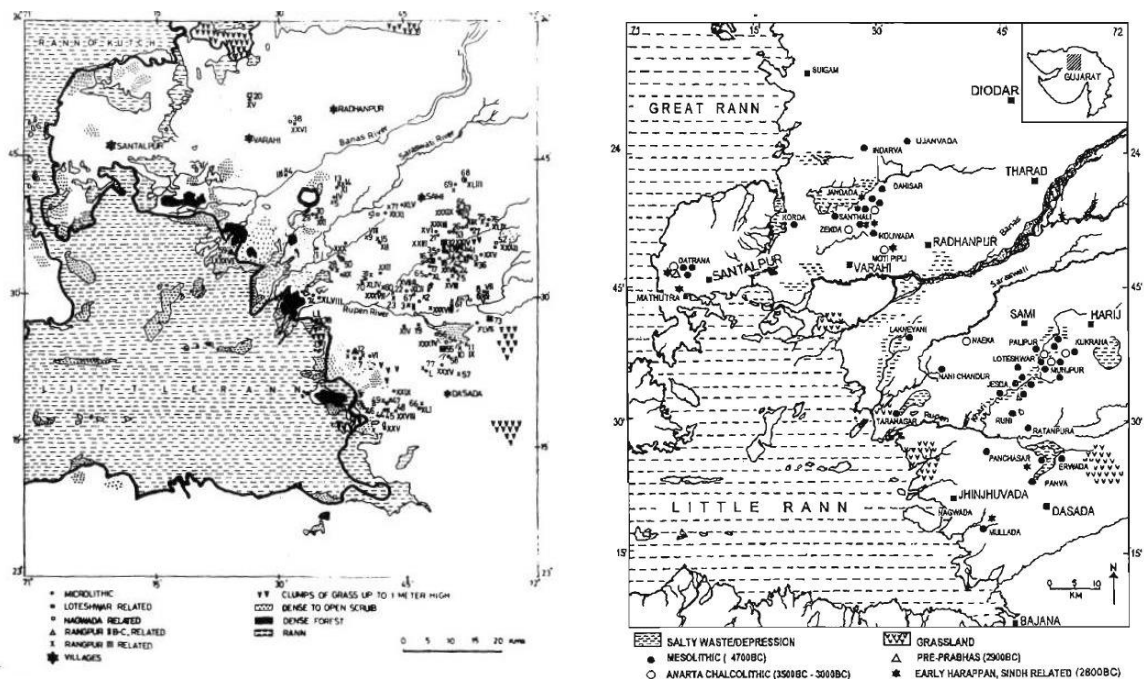


Figura 11. Representacions de la distribució d'assentaments al Gujarat del Nord, segons Bhan (1993: Fig.1, esquerra) i Ajithprasad (2004: Fig. 3, dreta).

D'altra banda, els resultats d'aquestes exploracions presenten una sèrie de limitacions i incoherències que es detallen tot seguit:

- Molts resultats encara esperen ésser publicats, o es publiquen en plataformes no digitals difícils de localitzar.
- Les coordenades poden estar esbiaixades al no estar mesurades amb aparells GPS o altres instruments de precisió, i per tant es poden produir errors considerables en la situació dels assentaments i el seu entorn immediat. Aquest esbiaix es dona sobretot en les localitzacions mesurades en coordenades latitud/longitud, graus i minuts, que però perden la mínima precisió que aporta la mesura de graus, minuts i segons.
- Els diversos *gazetteers* publicats fins a dia d'avui presenten diferents criteris d'observació i classificació *in situ* del registre material. Aquestes disparitats es produeixen sobretot per la manca de protocols en la recollida i interpretació del registre arqueològic, tasca susceptible d'ésser esbiaixada segons el criteri subjectiu de l'observador i/o els objectius específics de cada campanya.

3. CONTEXT ARQUEOLÒGIC

- En relació amb el punt anterior, les visites a un mateix jaciment durant diverses campanyes i les discordances en la toponímia local poden crear registres esbiaixats o fins i tot repetits per a un sol assentament.
- La informació arqueològica no es contextualitza amb les unitats topogràfiques o fisiogràfiques a on es localitzen les dispersions de material i, a escala regional, sovint manca una caracterització de les dinàmiques del paisatge a llarg termini que identifiqui, especialment, els processos tafonòmics que afecten la visibilitat i preservació del registre arqueològic en superfície.

Aquestes limitacions són encara avui en dia força comunes per a l'arqueologia de l'Àsia del Sud (Singh *et al.* 2010; Bhan 2011; Petrie *et al.* en premsa), i reflecteixen les limitacions tecnològiques de les exploracions més antigues (p.e. manca de GPS) i la varietat de criteris a l'hora de realitzar prospeccions arqueològiques.

4. MARC TEÒRIC

Aquest capítol introdueix les possibilitats que ofereix la integració de la geoarqueologia i la teledetecció per treballar en un marc multiescalar i multitemporal.

4.1. Escales espacials i temporals de la geoarqueologia

La completa apreciació del significat i la distribució del registre arqueològic depèn de la nostra capacitat d'identificar, interpretar i relacionar els fenòmens ambientals produïts en diverses escales espacio-temporals i els diversos influxos humans i antròpics que han modificat els paisatges actuals. L'estudi de les interaccions entre el medi social o "humà" i el medi ecològic o "biofísic", inherents en tota recerca arqueològica, s'han definit sobretot dins el marc de l'arqueologia mediambiental (Evans 1978) i les perspectives de l'ecologia humana (Butzer 1982, 1996, Dincauze 2000). Aquests corrents prioritzen la comprensió del concepte del "context", el component primari de l'estudi geoarqueològic, entès com l'element espacial a on intervenen els fenòmens biofísics que configuren els models de canvi temporal d'un sistema socioecològic, i, per extensió, d'un paisatge arqueològic (Taula 4).

Taula 4. Components primaris de l'estudi geoarqueològic, segons Butzer (1982; Taula 3.1).

Context del paisatge
Escales espacials d'anàlisi d'ambients arqueològics micro-, meso- i macro-
Context estratigràfic
Reconstrucció de seqüències sedimentològiques locals i regionals
Comparació amb processos paleoclimàtics globals
Formació del jaciment
Aportació de components físics, biogènics i culturals al sediment arqueològic
Identificació de materials i sediments transformats per agents humans o altres agents físics
Modificació del jaciment
Alteracions postdeposicionals del jaciment per diversos agents
Impacte d'influxos naturals i antròpics per a la visibilitat i preservació del registre arqueològic
Modificació del paisatge
Identificació d'influxos, tan naturals com antròpics, que modifiquen la coberta terrestre
Intervencions antròpiques en el cicle hidrològic i canvis en els usos del sòl

4. MARC TEÒRIC

Les interaccions mútues entre un medi social i un medi ecològic defineixen la base d'un sistema socioecològic. Els components que integren els sistemes socioecològics s'analitzen simultàniament, amb una perspectiva multi temporal i des de qualsevol escala geogràfica, i per tant són inseparables per entendre el comportament humà del passat i la seva adaptació o resiliència vers les variacions climàtiques i ambientals (Gallopín 2006; Cumming 2011; Barton *et al.* 2012).

Els ecotons àrids i semiàrids són especialment sensibles a experimentar una forta variabilitat i imprevisibilitat climàtica en esdeveniments de curta durada (estacionals o anuals), fet que pot conduir a la repetició de fenòmens extrems (p.e. inundacions o sequeres prolongades) que immediatament repercuteixen en la disponibilitat de recursos (Spielmann *et al.* 2011; Balbo *et al.* 2016). D'altra banda, la presència de relictos geomorfològics en aquests ecosistemes informa sobre processos climàtics i geomorfològics ocorreguts en una escala climàtica molt més gran (Goldberg i Macphail 2006). L'aproximació geoaqueològica d'aquesta recerca permet identificar aquestes dinàmiques, produïdes a llarg termini, posant èmfasi en els components primaris que Butzer (1982) definí per a la completa comprensió del context ambiental d'un paisatge arqueològic (Taula 5).

Taula 5. Models de variabilitat climàtica i escales temporals en ecosistemes, adaptat de Butzer (1982: Taula 2.2 i 2.4) i Dincauze (2000: Taula 2.1).

Variabilitat a petita escala (micro-)	Variabilitat a escala mitjana (meso-)	Variabilitat a gran escala (macro-)
Oscil·lacions climàtiques de primer i segon ordre (10 anys o menys)	Oscil·lacions climàtiques de tercer i quart ordre (segles i mil·lennis, inclou l'Holocè)	Oscil·lacions climàtiques de cinquè i sisè ordre (desenes de mil·lennis, inclou el Quaternari o Q-Time)
Fluctuacions en la disponibilitat estacional d'aigua i biomassa vegetal	Canvis fonamentals en la hidrologia i la biomassa vegetal	Noves jerarquies a les comunitats biòtiques
Sense canvi en les xarxes fluvials	Canvis en la hidromorfologia regional, amb processos de sedimentació i erosió tangibles al registre geològic	Canvi en els components dels sistemes hidrològics i geomorfològics, que perduren durant mil·lennis
La preservació del registre arqueològic es pot veure afectada per esdeveniments extrems	Processos postdeposicionals de llarga durada en el registre arqueològic	Discontinuitats geològiques tangibles a escala continental

4. MARC TEÒRIC

4.1.1. Perspectives socioecològiques per al Gujarat del Nord

A l'Àsia del Sud, la publicació del volum *Ecology and Archaeology on Western India* (Agrawal i Pande 1977) recollí la recerca paleoambiental i les aportacions que, des de l'estudi de la geomorfologia climàtica, manifestaven la importància de posar el registre arqueològic en context amb els processos climàtics produïts durant el Quaternari. Des de llavors, aquesta perspectiva ecològica i paleoclimàtica ha centrat gran part de la investigació geoarqueològica en aquesta regió (Allchin 1976; Butzer 1979; Allchin i Allchin 1982; Fuller i Madella 2002; Khadkikar *et al.* 2004; Yasuda i Shinde 2004; Madella i Fuller 2006; i més recentment Deo *et al.* 2011; MacDonald 2011; Giosan *et al.* 2012; Ponton *et al.* 2012; Dixit *et al.* 2014; Prasad *et al.* 2014; Raj *et al.* 2015).

Pel que fa específicament a la paleoecologia i geoarqueologia al Gujarat, els treballs de la Universitat de Cambridge durant la dècada de 1970 (Allchin *et al.* 1972; Goudie *et al.* 1973; Hedge 1977) posaren les bases per a la contextualització dels assentaments prehistòrics amb les dinàmiques geomorfològiques i climàtiques produïdes durant el Quaternari al desert del Thar, emfatitzant les relacions espacials entre el registre arqueològic dispers en superfície i la seva localització en els nivells superiors de dunes fòssils o a prop d'altres relictos geomorfològics (p.e. paleocanals o zones interdunals).

Malgrat això, al Gujarat del Nord existeix una manca d'estudis que aportin perspectives multiescalars per a l'anàlisi del paisatge arqueològic, i en especial per entendre les dinàmiques tafonòmiques dels darrers anys, produïdes principalment per el fort impacte antròpic a la regió. Aquesta limitació ha contribuït a estendre la percepció que es té del paisatge del nord-oest indi com un paisatge fòssil i ben preservat (Bhan 1994, 2011; Possehl 2007). Aquesta visió, força comuna en molts estudis arqueològics en regions àrides i semiàrides (p.e. Barker i Gilberston 2000 i Veth 2005) està canviant actualment amb la introducció de noves direccions en la recerca arqueològica basades en l'estudi de les dinàmiques socioecològiques a llarg termini i la integració de factors climàtics i agents socials (veure Barton *et al.* 2010, 2012 per a aplicacions al Mediterrani i al Pròxim Orient, i Lemmen i Khan 2012; Balbo *et al.* 2014, 2016; Lancelotti *et al.* en premsa i Petrie *et al.* en premsa per a noves aplicacions per a l'Àsia del Sud).

4.1.2. Les possibilitats multiescalars de la teledetecció

L'ús de la teledetecció en arqueologia es pot considerar com una aproximació actualística, definició que utilitzà [Rossignol \(1992\)](#) per a la recerca que estudia patrons arqueològics a partir d'observacions fetes en el present, o dinàmiques socioecològiques en curs, que es poden relacionar amb la deposició del registre arqueològic, com ara els estudis de la tafonomia del paisatge o l'etnoarqueologia. En el cas de l'observació terrestre, l'escala temporal de les observacions es remunta com a molt als últims 50 anys, segons la disponibilitat de les primeres imatges de satèl·lit. No obstant, la combinació de la teledetecció amb la geoarqueologia permet una fàcil integració d'informació fisiogràfica en diverses escales d'anàlisi, fet que permet identificar i avaluar els processos tafonòmics que han afectat la deposició, visibilitat i preservació del registre arqueològic en una perspectiva a llarg termini.

Actualment, l'àmplia disponibilitat de dades provinents de la teledetecció permet analitzar fenòmens terrestres en diferents mides de gra i extensió, els dos components principals que caracteritzen una escala d'anàlisi des de la perspectiva ecològica ([Turner et al. 2001](#), [Taula 6](#)), i que s'han adoptat posteriorment per entendre les relacions multiescalars que deriven de les prospeccions arqueològiques ([Burger i Todd 2006](#)).

Taula 6. Definició i aplicacions multiescalar del gra i l'extensió, adaptat de Turner *et al.* (2001: Taula 2.1).

	Definició	Teledetecció	Geoarqueologia
Gra	Mínima resolució espacial en que es realitza una observació	Resolució espacial (mida de píxel)	Mida mínima d'una anàlisi de sediment o observació microscòpica (p.e. ppm, µm)
	Domini espacial de l'observació (p.e. àrea d'estudi)	Emprenta d'una escena o àrea il·luminada per el sensor	Relacions amb unitats i fenòmens a major escala
Extensió	Domini temporal de l'observació (durada de l'esdeveniment)	Resolució temporal d'una sèrie d'imatges	Inferència temporal de les observacions (p.e. durada de processos postdeposicionals)

Les associacions entre el gra i l'extensió en una aproximació geoarqueològica permet integrar les escales de l'observació terrestre amb les escales de l'observació analítica que proporciona, en el nostre cas, la caracterització fisicoquímica de sediments provinents tant de jaciments arqueològics com de diverses unitats fisiogràfiques del paisatge. En aquesta recerca, les escales d'observació

4. MARC TEÒRIC

espacial s'han simplificat en tres escales d'anàlisi principals: l'escala regional, l'escala local i l'escala intrajaciment (Taula 7).

Taula 7. Escales espacials i contextos ambientals del paisatge arqueològic utilitzades en aquesta recerca, adaptat de Butxer (1982: Taula 3,1) i Dincauze (2000: Taula 2.1). Cada unitat superior incorpora aquelles menors.

Escala espacial	Àrea	Context ambiental	Context arqueològic
Regional (macro-)	10^4 – 10^7 km ²	Medi ambient regional, processos geomorfològics fonamentals, conques fluvials	Recursos hídrics i biomassa vegetal disponible en un biome o ecotò
Local (meso-)	10^2 – 10^4 km ² 1– 10^2 km ²	Agrupacions d'elements geomorfològics, relictos fòssils, valls fluvials	Entorn topogràfic de l'assentament i àrea directa de subsistència
Intrajaciment (micro-)	<1 km ²	Processos de formació i deposició dels nivells arqueològics; processos postdeposicionals	Hàbitat o espais d'activitat antròpica

5. MATERIALS I MÈTODES

Aquest capítol descriu els materials i mètodes utilitzats en aquesta recerca, que s'agrupen en tres grans grups: (1) la base de dades arqueològica del Gujarat del Nord, (2) la informació temàtica derivada de l'observació terrestre, i (3) la caracterització fisicoquímica de sòls i sediments associats a activitats i ocupacions humanes.

5.1. Millora de la carta arqueològica

La informació arqueològica que configura la base de dades per a l'arqueologia regional del Gujarat del Nord utilitzada en aquesta recerca integra el resultat de les prospeccions arqueològiques realitzades en el marc del projecte NoGAP, que al mateix temps impulsaren els treballs de revisió i correcció de la carta arqueològica del Gujarat efectuats per Bhan (2011), Ajithprasad i Sonawane (2011), Rajesh (2011), Rajesh i Krishnan (2014) i Rajesh *et al.* (2013a, 2013b) en el marc de les exploracions efectuades per la *MS University of Baroda*.

5.1.1. Detecció de jaciments i correcció de coordenades (GPS)

La millora i ampliació de la base de dades arqueològica està lligada al canvi d'estratègia que adoptaren A. Balbo i B. Rondelli per als treballs de prospecció geoarqueològica del projecte NoGAP (Madella *et al.* 2010, 2011) i que es basa en els punts següents:

- Localitzar i visitar de nou jaciments amb informació esbiaixada (p.e. revisar coordenades errònies, avaluar l'estat de preservació actual, confirmar i afinar la interpretació del registre arqueològic en superfície).
- Identificar i validar, amb el suport d'eines SIG, navegació GPS i la teledetecció, noves localitzacions amb potencial arqueològic i geoarqueològic (p.e. dunes fòssils i zones d'interès paleoecològic no explorades anteriorment).

5. MATERIALS I MÈTODES

- Avaluar i validar les observacions de la teledetecció (p.e. documentar la presència o absència del registre arqueològic en superfície de dunes fòssils, o documentar *in situ* els canvis en la cobertura terrestre i els usos del sòl que afecten la preservació de les evidències en superfície).

5.1.2. Base de dades arqueològica: prospeccions de superfície

Les limitacions i duplicitats que presentaven els *gazetteers* arqueològics anteriors al projecte NoGAP propiciaren la necessitat d'actuar sobre la carta arqueològica, mitjançant la realització de quatre tasques principals per tal d'unificar la informació arqueològica disponible en una única base de dades:

- Creació d'identificadors únics i elaboració d'una base de dades relacional (CSV, Access).
- Integració i gestió de la base de dades des de plataformes SIG (QGIS, ArcGIS).
- Simplificació de la classificació i descripció del registre arqueològic.
- Sistematització i actualització dels atributs descriptius per a cada localització.

A la carta arqueològica elaborada per aquesta tesi, s'utilitza el terme "localització" per identificar aquells indrets que han estat explorats i validats *in situ*, tinguin o no tinguin evidències arqueològiques visibles en superfície, hagin o no hagin estat excavats. Aquesta decisió neix arran de les controvèrsies que giren, en l'arqueologia en general i especialment en l'arqueologia en zones àrides i semiàrides (veure [Dunnell 1992](#); [Kantner 2008](#)), vers la utilització dels termes "jaciment" o "assentament" per a identificar indrets on es documenten dispersions d'artefactes i ecofactes en superfície, sense estructures arqueològiques visibles i que generalment no tenen cap excavació o sondeig estratigràfic, sinó que provenen de nous descobriments (fortuïts o no) sense o amb molt poca informació quantitativa o qualitativa sobre la significància de la dispersió en superfície (p.e. contatges i descripció dels materials recollits o delimitació de l'extensió).

Per a cada localització arqueològica s'ha creat una clau primària que identifica el jaciment o mostreig geoarqueològic per evitar discrepàncies o duplicitats amb altres identificadors. La simplificació del registre arqueològic documentat en superfície s'ha basat en les categories tipològiques de la Civilització de la Vall de l'Indus en referència al Gujarat establertes per Rajesh ([2011](#)), mentre que s'han mantingut dues tipologies independents per a la presència d'indústria microlítica i materials de

5. MATERIALS I MÈTODES

la tradició Anarta, a causa de les ambigüitats cronològiques que representen quan es troben sense context estratigràfic. D'altra banda, també es diferencien les localitzacions amb un únic tipus de cultura material (i que per tant permeten la identificació a priori d'una ocupació monofase o un escenari socioeconòmic concret, i.e. contextos aceràmics de caçadors-recol·lectors, grups pastorals Anarta, grups *Sorath Harappan* o grups *Late Sorath Harappan*) d'aquelles localitzacions que presenten un palimpsest barrejat amb materials de dos o més possibles escenaris socioeconòmics o tipocronològics. Els atributs per a cada localització també inclouen una descripció de l'any i equip de la troballa, l'any i equip de la correcció de les coordenades amb GPS, la localització i extensió del jaciment, si és coneix, i una part descriptiva destinada a referències bibliogràfiques i possibles noms i codis designats anteriorment per a la mateixa localització (Taula 8).

La base de dades actual no inclou els nous assentaments microlítics documentats per Nath i Kumaran (2012) a la franja interior del Gujarat del Nord, seguint la conca fluvial del riu West Banas, ja que gran part de les coordenades publicades són errònies i no es coneix cap correcció posterior. La base de dades tampoc inclou el jaciment de Langhnaj i la duna d'Akhaj, ja que es troben a la conca fluvial del riu Sarasbati, fora de l'àrea d'observació d'aquesta recerca, i a més a més, avui en dia la seva localització exacta s'ha perdut per la forta erosió de les dunes fòssils a l'est de l'àrea d'estudi (Rajesh, comunicació personal).

5. MATERIALS I MÈTODES

Taula 8. Descripció dels atributs per a cada localització arqueològica.

Camp d'atribut	Descripció
<i>location</i>	Codi identificador, clau primària
<i>x, y</i>	Coordenades horitzontals i verticals (UTM)
<i>scatter</i>	0 = cap evidència arqueològica; 1 = evidències arqueològiques en superfície
<i>firstsource</i>	Codi per al primer <i>gazetteer</i> o campanya on es documenta la localització
<i>gpsvalue</i>	0 = coordenades encara per revisar; 1 = coordenades revisades
<i>gpsyear</i>	Any de la revisió de la localització i correcció de les coordenades
<i>gpssource</i>	Equip investigador responsable de la revisió
<i>evidence</i>	Descripció o atribució tipocronològica de la cultura material
<i>typeMIX</i>	Palimpsest superficial amb la presència de micròlits i/o material Anarta i/o materials de diverses fases
<i>typeHG</i>	Presència única de micròlits, superfície aceràmica
<i>typeAT</i>	Presència única de materials Anarta
<i>typeEHS</i>	Presència única de materials <i>Early Harappan Sindh</i> . Inclou les tradicions: "Amri Nal"; "burial", "Early Sindh", "Early Harappan", "Pre-Prahbas"
<i>typeUHCS</i>	Presència única de materials <i>Urban Harappan (Classic/Sorath)</i> . Inclou definicions "Classic Harappan" i "RGPIIB"
<i>typePOUH</i>	Presència única de materials <i>Post Urban Harappan</i> . Inclou les tipologies "RGPIIC", "RGPIII" i "LRW"
<i>typeHIS</i>	Presència única de materials històrics/medievals
<i>evMI</i>	Evidències en superfície de micròlits
<i>evAT</i>	Evidències en superfície de materials Anarta
<i>evEHS</i>	Evidències en superfície de materials <i>Early Harappan Sindh</i>
<i>evUHS</i>	Evidències en superfície de materials <i>Urban Harappan (Classic/Sorath)</i>
<i>evPOUH</i>	Evidències en superfície de materials <i>Post Urban Harappan</i>
<i>evHIS</i>	Evidències en superfície de materials històrics/medievals
<i>village</i>	Població més pròxima
<i>taluka</i>	Agrupació de viles on es troba la localització
<i>district</i>	Districte on es troba la localització
<i>size</i>	Extensió aproximada de la dispersió de materials, en metres x metres
<i>ha</i>	Extensió aproximada de la dispersió de materials, en hectàrees
<i>name</i>	Nom complet de la localització
<i>oldname</i>	Noms i codis que apareixen en <i>gazetteers</i> anteriors per a les mateixes coordenades
<i>lat, lon</i>	Coordenades verticals i horitzontals geogràfiques (graus/minuts/segons)
<i>ref</i>	Referències bibliogràfiques d'antics <i>gazetteers</i> , si n'hi ha

5.2. Cartografia i fotografies històriques

Tot sovint, la cartografia històrica és la primera font d'informació geogràfica de que podem disposar per analitzar canvis produïts en el paisatge. En els últims anys, la digitalització i obertura de portals en línia dedicats a la cartografia històrica obre noves possibilitats per a la visualització i avaluació d'aquests productes (Taula 9). Per a l'Índia, molts productes cartogràfics corresponen al període de la colonització britànica. Tot i que la seva escala és massa gran per a la identificació de patrons d'interès arqueològic, l'observació d'aquests productes pot aportar informació sobre el paisatge que pot ser del nostre interès, com per exemple la presència de pous naturals o zones de maresmes. D'entre aquests productes, destaquem la sèrie de publicacions de l'*Imperial Gazetteer of India*, col·lecció disponible en línia a la *Digital South Asia Library*.

Taula 9. Principals recursos en línia per a l'adquisició de mapes històrics per al nord-oest indi [últim accés als enllaços 15/04/2016].

Producte	Descripció	Recurs en línia
<i>Old Maps Online</i>	Miscel·lània de mapes històrics	http://oldmapsonline.org
<i>David Rumsey Collection</i>	Miscel·lània de mapes històrics	http://www.davidrumsey.com
<i>Digital South Asia Library</i>	Mapes i informació etnològica recollida en els volums de l' <i>Imperial Gazetteer of India</i> (1847-1922)	http://dsal.uchicago.edu/reference/gazetteer/ http://dsal.uchicago.edu/maps/

D'altra banda, en un primer moment de la recerca també es va avaluar l'extensa cartografia de les publicacions científiques que aborden el paleoclima o la influència tectònica al nord-oest indi durant el Quaternari. Els treballs de Sareen *et al.* (1993a), Maurya *et al.* (1995), Merh i Chamyal (1997), Tandon *et al.* (1997), Srivastava *et al.* (2001), Chamyal *et al.* (2003) i Juyal *et al.* (2003) s'han fet servir per contextualitzar la fossa tectònica de Khambat i les implicacions de la geomorfologia i tectònica regional en les observacions de la teledetecció.

5.2.1. Els mapes topogràfics d'ús militar

Les sèries topogràfiques de domini públic per al nord-oest indi produïdes per el *Survey of India* són molt limitades a causa de la proximitat de la frontera amb el Pakistan. Els mapes de base topogràfica

5. MATERIALS I MÈTODES

entre 1:5000 fins 1:10000 produïts per el *Survey of India* estan restringits per a ús militar (*Defense Series Maps*), mentre que les bases topogràfiques més generals (1:25000 fins 1:250000, *Open Series Maps*) no estan disponibles en format digital.

La limitació d'aquestes productes contrasta amb la qualitat i disponibilitat dels mapes topogràfics soviètics i nordamericans realitzats a la dècada de 1950 (Taula 10). Aquests mapes són una font molt útil tant per a circular pel territori (cal dir que fins fa ben poc, la toponímia local només estava parcialment inclosa en servidors de dades geogràfiques com el portal Bhuvan o Google Earth), com per identificar canvis produïts en els últims 70 anys (per exemple, migracions de canals fluvials o detecció de zones de maresmes i inundació).

Taula 10. Recursos cartogràfics: mapes topogràfics d'ús militar (1950) [últim accés als enllaços 15/04/2016].

Producte	Descripció	Recurs en línia
<i>US Army Service Topographic Map</i>	Sèrie topogràfica 1:250000, realitzada el 1955 per l'exèrcit nord-americà en base a mapes anteriors del <i>Survey of India</i>	http://www.lib.utexas.edu/maps/ams/india
<i>Soviet Military Maps</i>	Sèries topogràfiques 1:200000 i 1:500000, realitzades el 1956 per l'exèrcit soviètic en base a mapes anteriors del <i>Survey of India</i>	https://mapstor.com

5.2.2. Les fotografies històriques CORONA

Les fotografies CORONA corresponen a un dels primers programes de reconeixement i espionatge militar desenvolupat pels Estats Units en el marc de la Guerra Freda i les primeres exploracions espacials. El programa CORONA (1959-1972) consistí en el llançament d'un seguit de satèl·lits equipats amb càmeres fotogràfiques per espionar el bloc soviètic. Cada missió serví per millorar els aspectes tècnics de les càmeres, fins que l'última càmera utilitzada (anomenada KH-4B) tenia una resolució espacial de fins a 2 m (Taula 11). Les fotografies CORONA es van desclassificar el 1995, i des de llavors han estat àmpliament utilitzades en projectes arqueològics i s'han convertit en una eina essencial per avaluar paisatges culturals i arqueològics abans de l'impacte demogràfic i urbanístic dels últims 50 anys (veure, p.e. [Tappan et al. 2000](#); [Galiatsatos 2004](#); [Goossens et al. 2006](#) i [Palmer 2013](#)). Les imatges CORONA també s'han utilitzat en regions remotes com al primer recurs fotogràfic

5. MATERIALS I MÈTODES

per detectar estructures antròpiques, especialment en zones àrides i semiàrides (Philip *et al.* 2002; Fowler i Fowler 2005; Beck *et al.* 2007; Casana *et al.* 2012).

Taula 11. Característiques de les fotografies CORONA utilitzades en aquest estudi i detalls per a la seva adquisició [últim accés als enllaços 15/04/2016].

Producte	Període actiu	resolució espacial	Agència i cost
CORONA KH-4B	Missions 1101-1116 1967-1972	Nadir (centre imatge) fins a 2 m, notable distorsió als extrems de la tira fotogràfica	Disponible a través de centres de distribució de l'USGS, p.e.: http://earthexplorer.usgs.gov/
	Missió 1117 (en aquest estudi) 25 maig 1972		Productes gratuïts, però cal abonar 30\$ per els costos d'escaneig i digitalització de la imatge, si aquesta encara no està en format digital

Les fotografies històriques CORONA que s'han utilitzat en aquesta recerca corresponen a 14 fotografies de la sèrie KH-4B. Els paràmetres de la càmera utilitzada en les missions KH-4B són encara avui en dia objecte d'estudi, i això ha fet que es generi un intens debat sobre la correcta ortorectificació de les fotografies, procés necessari per eliminar distorsions i realitzar interpretacions correctes (veure les últimes discussions a Casana i Cothren 2013 i Scollar *et al.* 2016). Per tal d'ortoreferenciar les imatges, es necessiten punts de control. La obtenció de punts de control sovint s'ha realitzat a través d'imatges multiespectrals d'alta resolució, si ve els mètodes actuals fan servir punts de control capturats directament des de Google Earth (Ur *et al.* 2014; Galiatsatos *et al.* 2015). En aquesta recerca, l'ortorectificació d'aquestes fotografies va integrar punts de control capturats amb DGPS i punts capturats amb Google Earth, ja que, en un primer moment, aquesta tesi va explorar les possibilitats que ofereix la capacitat estèreo de les fotografies CORONA per extreure models digitals d'elevació (DEM, de *Digital Elevation Model*), i es va creure convenient disposar d'una xarxa de punts de control d'alta resolució davant la manca de productes d'elevació d'alta resolució per a l'àrea d'estudi.

La discussió sobre l'extracció de DEMs a partir de fotografies estereoscòpiques CORONA va tenir cert auge en la recerca arqueològica ara fa uns anys (Galiatsatos *et al.* 2005; Casana i Cothren 2008; Galiatsatos *et al.* 2008; Mészáros *et al.* 2009). Seguint aquesta direcció, aquesta recerca va centrar esforços en l'obtenció d'un DEM regional que pogués millorar la resolució espacial dels DEMs existents (p.e. els 90 metres de resolució espacial oferts per el DEM SRTM) i que, al mateix temps,

5. MATERIALS I MÈTODES

pogués treure profit de la resolució temporal de les fotografies CORONA. Per tant, es creia que el DEM generat a partir d'imatges estèreo CORONA podria informar sobre processos erosius ocorreguts en el paisatge. A tal fi, es va utilitzar el programa ERDAS LPS per extreure la informació altimètrica, però el resultat final fou inferior als nous models digitals d'elevació produïts per la *Indian Space Research Organisation* i oferts de forma gratuïta (p.e. Cartosat-2, veure [Figura 12](#)). D'altra banda, la generació de DEMs a partir de fotografies estereoscòpiques CORONA i punts de control altimètrics actuals no satisfà l'observació de variacions altimètriques en el paisatge, ja que simplement estariem visualitzant un ràster històric sobre un model altimètric actual.

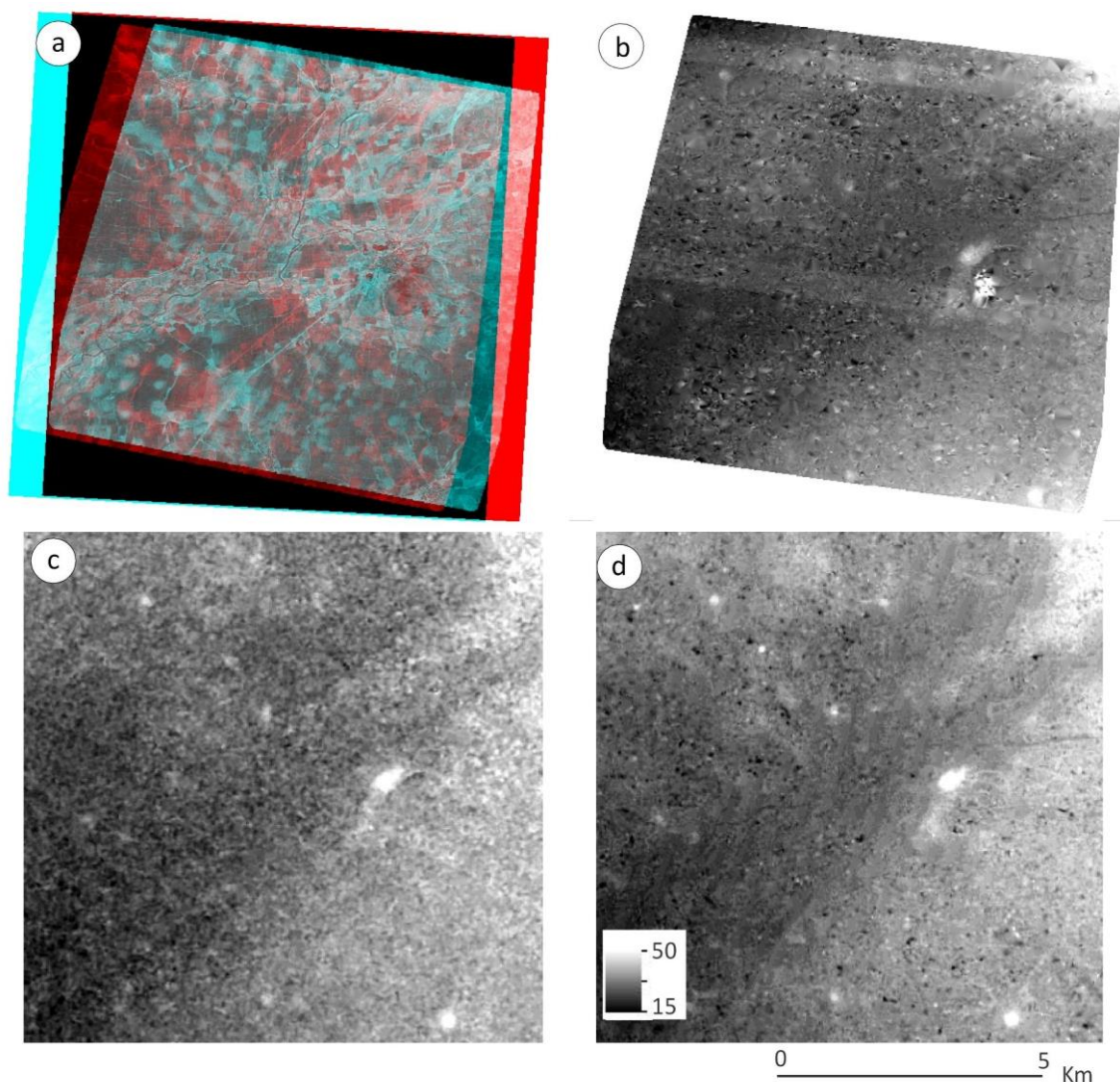


Figura 12. Exemple de les propietats estèreo de les fotografies CORONA, aplicades a la conca del riu Khari, i comparació amb productes d'altimetria regional: (a) Anàglif produït a partir de dues imatges epipolars; (b) DEM (19 m) extret d'imatges estèreo CORONA; (c) SRTM

DEM (30 m); (d) CartoDEM (28 m). Els píxels més alts (en blanc a les imatges) corresponen als poblats i viles actuals, la majoria dels quals s'assenten a sobre de dunes fòssils.

5.3. Teledetecció i imatges de satèl·lit

La teledetecció és el conjunt de ciències i tecnologies que permeten obtenir informació d'objectes, àrees o fenòmens sobre la superfície terrestre a través de sensors, de forma remota, mitjançant mètodes que utilitzen l'energia electromagnètica (p.e. la llum, la calor o les ones de ràdio) com a medi per detectar i mesurar les característiques de l'objecte d'estudi (Chuvieco 2010). En aquesta recerca, fem servir indistintament els termes teledetecció i observació terrestre com a sinònims, i ens referim sempre a la detecció remota per mitjà d'informació capturada en sensors i plataformes en satèl·lits d'òrbita terrestre.

Els sensors capten la informació de la superfície terrestre i les diferents cobertes que hi són presents a partir de la radiació electromagnètica emesa o reflectida per aquestes segons les zones de l'espectre visible on operin els sensors. Aquesta recerca es basa sobretot en observacions fetes a les regions de l'espectre visible (VIS, 400-700 nm) i l'infraroig proper (IRp, 700-1300 nm) per als sensors òptics passius, i la banda C de les microones (8-4 GHz) per a les observacions de radar (Figura 13).

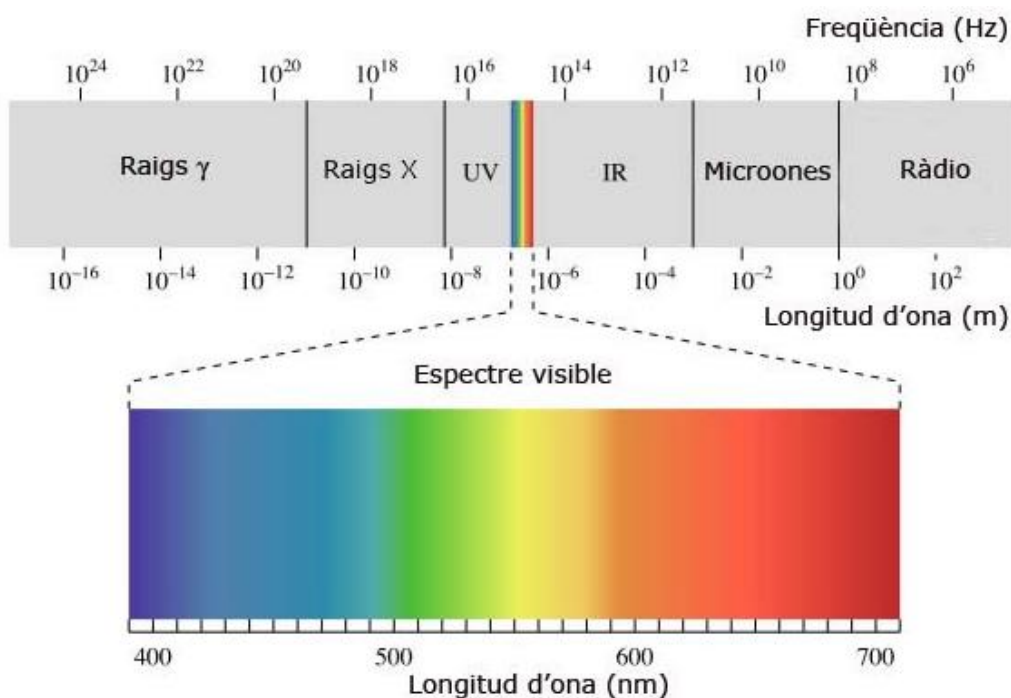


Figura 13. Regions de l'espectre electromagnètic, adaptat de <http://www.rcg.cat>.

5. MATERIALS I MÈTODES

En els últims anys, la teledetecció s'ha consolidat com una eina essencial per a la prospecció arqueològica i la documentació de paisatges culturals, tal i com demostra l'augment de les publicacions i monografies dedicades a les aplicacions de la teledetecció en arqueologia (vegeu, per citar-ne algunes, Wiseman i El-Baz 2007; Parcak 2009; Ciminale *et al.* 2009; Lasaponara i Masini 2011, 2012, 2014; Comer i Harrower 2013 i Hanson i Oltean 2013). Aquest fet es deu a la progressiva millora dels sensors (p.e. resolució espacial i temporal) i, sobretot, a l'obertura de polítiques de distribució de dades per a ús científic.

5.3.1. Els sensors multiespectrals

En aquesta recerca, les observacions a escala regional s'han fet principalment a partir d'imatges multiespectrals dels sensors òptics Landsat, ASTER i IKONOS (Taula 12). La majoria de sensors òptics són passius, és a dir, es limiten a captar la radiació electromagnètica emesa per un focus extern. Aquest focus acostuma a ser el Sol, i el sensor mesura la irradiància solar sobre els objectes i les cobertes de la superfície terrestre (veure Chuvieco 2010).

Taula 12. Característiques dels sensors actius utilitzats en aquest estudi i detalls per a la seva adquisició [últim accés als enllaços 15/04/2016].

Producte	Període actiu	Bandes i resolució espacial	Agència i cost
Landsat-1 MSS	1972-1978	VIS-IRp (80 m)	
Landsat-2	1975-1982	VIS-IRp (60 m)	
Landsat-5 TM	1984-2011	VIS-IRp (30 m)	
Landsat-7 ETM+	1999-present (amb defectes tècnics des de 2003)	Pan (15 m) VIS-IRp (30 m)	Descàrrega gratuïta en qualsevol servidor dels centres de distribució en xarxa de la NASA-UGGS, p.e.: http://glovis.usgs.gov/ http://earthexplorer.usgs.gov/
Landsat-8 OLI	2013-present	Pan (15 m) VIS-IRp (30 m) IRoc (30 m)	ASTER: Descàrrega gratuïta des d'abril 2016
ASTER (140TH i L1B)	1999-present	VIS-IRp (15 m) IRoc (30 m) IRol (90 m)	
IKONOS-2	1999-present	VIS-IRp (4 m)	Distribuïdor comercial, consultar preus a https://www.digitalglobe.com

5. MATERIALS I MÈTODES

El processament d'imatges s'ha realitzat a partir de procediments estàndards per a la detecció i identificació d'elements del paisatge i l'observació de mapes de canvi a partir de sèries temporals. Les anàlisis multiespectrals inclouen (1) composicions en fals color, principalment en combinacions de l'infraroig proper (Smith i Pain 2009); (2) classificacions no supervisades (p.e. ISODATA, segons Liu i Mason 2009; Parcak 2009), i (3) anàlisi de components principals (PCA, de *Principal component Analysis*, segons Lillesand et al. 2008). El programari més utilitzat per al processament d'imatges previ a la seva integració en SIG ha estat ENVI (versions 4.5 fins a 5.3).

Els mètodes de classificació no supervisada i l'anàlisi de components principals realitzen un agrupament dels patrons que emergeixen per a cada banda espectral sense que l'usuari determini un entrenament previ a partir d'unes classes preconfigurades. A partir d'aquest procés, s'obté un mapa amb classes espectrals. Utilitzant el mapa com a referència, podem assignar o transformar les classes espectrals en informació temàtica d'interès. En aquest estudi, aquest mètode s'aplicà per entendre les principals característiques fisiogràfiques de l'àrea d'estudi. A escala local, les dunes fòssils, amb el sediment eòlic exposat en superfície, molt més sorrenc i sec que els camps interdunals que les envolten, són fàcilment detectables en qualsevol preclassificació prèvia d'una imatge multiespectral, ja que un dels principals factors que afecta la reflectància solar és la humitat dels sòls (Hugenholtz et al. 2012). A més a més, la sensibilitat de l'infraroig proper per detectar vegetació (Lillesand et al. 2008) permet diferenciar els sòls de cultiu en depressions interdunals i els sòls erms o sense cultivar de moltes dunes fòssils. Aquestes propietats espectrals s'han utilitzat com a base per a detectar dunes fòssils no explorades anteriorment i dirigir així les prospeccions regionals per tal de corregir i millorar la carta arqueològica. Aquest mètode semisupervisat s'ha complementat amb l'exploració de transectes altimètrics basats en DEMs d'alta resolució, que han resultat molt pràctics a l'hora de detectar possibles alteracions produïdes per la prominència de dunes fòssils.

5.3.2. Els sensors de radar

Aquesta recerca ha explorat una sèrie d'imatges multitemporals Envisat ASAR (Taula 13), corresponents a diferents adquisicions durant l'estació del monsó i el postmonsó entre el 2004 i el 2009, per identificar la resposta mitjana de cada estació a les inundacions del monsó i els processos edàfics (evaporació, evotranspiració i infiltració) que tenen lloc entre les dues estacions.

Taula 13. Característiques del sensor Envisat ASAR utilitzat en aquest estudi i detalls per a la seva adquisició [últim accés als enllaços 15/04/2016].

Producte	Període actiu	Bandes i resolució espacial	Agència i cost
Envisat ASAR, Image Mode, Single Look Complex	2002-2012	Banda C (20x4 m)	Llicència gratuïta per a ús científic sota projecte aprovat per el portal científic de l'ESA <i>Earth Online</i> https://earth.esa.int

A diferència dels sensors òptics, els sensors de radar són sensors actius, és a dir, emeten una senyal pròpia dins la radiació electromagnètica de les microones, dirigida cap a la superfície terrestre. Els sensors de radar d'obertura sintètica (SAR, de *Synthetic Aperture Radar*) capturen el senyal d'eco (és a dir, el retorn de l'energia emesa pel propi sensor) segons la interacció i el rebot que té l'energia emesa quan contacta amb els diferents objectes i tipus de coberta terrestre. La intensitat de la resposta d'eco es coneix com a amplitud. La principal propietat que altera la resposta de l'amplitud és la rugositat del sòl, que inclou les formes generades per els objectes presents a la superfície terrestre (Figura 14).

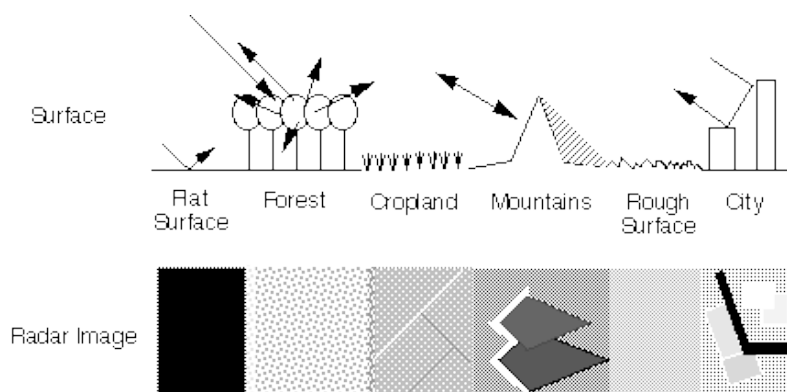


Figura 14. Respostes de l'energia emesa per els sensors SAR en diverses superfícies (<http://airsar.jpl.nasa.gov>).

Una superfície molt rugosa (un exemple extrem seria un poble amb cases i edificis, però també és aplicable a les ondulacions que produeixen les onades en el mar o els camps de conreu treballats amb arada, per exemple) produeix una alta resposta en els valors de l'amplitud a causa dels múltiples rebots de les microones al contactar amb superfícies irregulars. En canvi, els cossos d'aigua estancada, en condicions sense o amb molt poc vent, són superfícies llises que retornen una senyal

molt més baixa de l'amplitud al no produir-se cap rebot directe en la direcció en que emet el sensor. Així doncs, la diferència en la senyal d'amplitud entre cossos d'aigua i altres elements del paisatge permet una fàcil identificació dels primers. Aquesta propietat ha estat àmpliament utilitzada per detectar cossos d'aigua, l'extensió d'inundacions i, mitjançant sèries temporals, poder monitoritzar dinàmiques hidrològiques (vegeu per exemple [Kussul et al. 2011](#); [Kuenzer et al. 2013](#); [Khan et al. 2014](#)).

Un altre avantatge dels sensors de radar sobre la majoria de sensors òptics és que les longituds d'ona de les microones on operen els radars són més grans que la majoria de les partícules de l'atmosfera ([Davie et al. 2000](#)). Per tant, la detecció per radar pot penetrar capes de núvols i capturar informació de la superfície terrestre en qualsevol condició atmosfèrica. A més a més, en ser un sensor actiu que emet la seva pròpia senyal electromagnètica, el radar pot capturar dades tant de dia com de nit.

L'alta sensibilitat de l'amplitud a la rugositat del sòl genera molt soroll granular de fons, conegut com a *speckle noise*. Aquest soroll és inherent en les imatges de radar, i es manifesta en una alta variabilitat i falsa heterogeneïtat en valors de píxel quan aquests representen objectes majors a la seva resolució espacial ([Normand 1995](#)). La presència d'*speckle* dificulta la interpretació de la imatge, ja que enfosqueix els seus detalls i destorba la identificació de zones amb una senyal d'amplitud uniforme.

Per tal de reduir l'*speckle* i millorar la interpretació de la imatge de radar, en aquesta recerca hem aplicat dos mètodes diferents però complementaris. El primer mètode, la transformació de la imatge en una imatge *multi-look*, s'aplica abans d'interpretar les imatges, i consisteix en reduir la desviació estàndard de l'*speckle* mitjançant la partició de la imatge en grups de píxels alineats segons la direcció del sensor, tot conservant la informació original i ajustant la imatge a un píxel de forma rectangular, que és el que permet la seva posterior integració amb imatges òptiques multiespectrals ([Ferretti et al. 2007](#)).

El segon mètode per reduir l'*speckle* inclou l'ús de filtres espacials i temporals. Els filtres espacials redueixen la resolució original del píxel *multi-look* (ja que simplement s'aplica un nou agrupament de píxels) i en segons quins casos tenim el risc de perdre informació. En canvi, els filtres temporals

sumen la informació de diverses imatges adquirides en diferents períodes, i generen una nova imatge en que cada píxel representa el valor de la mitjana de la senyal d'amplitud (*mean amplitude*) per a la sèrie temporal, sense perdre resolució espacial, però disminuint significativament l'*speckle*. En el nostre cas, la sèrie temporal s'ha dividit en les estacions del monso i el postmonso, i per a cada estació s'ha aplicat un llindar semiautomàtic que identifica els valors de píxel classificats com a superfície inundada o cos d'aigua, superfície àrida o seca i superfícies que potencialment tenen més humitat en el sòl seguint patrons observats en les mitjanes d'amplitud en altres regions semiàrides ([Bartsch et al. 2008, 2012](#); [Cigna et al. 2013](#)). Els mapes de canvi entre les dues estacions són molt útils a l'hora de detectar aquelles àrees que es veuen afectades per l'estacionalitat del monso (o per altres influxos, sobretot antròpics) o que es mantenen estables durant els períodes d'observació de la sèrie temporal—no només cossos d'aigua, sinó també altres objectes o superfícies. Per tant, les aportacions que ofereixen els sensors de radar SAR a la nostra àrea d'estudi representen una aproximació empírica i qualitativa per a velles hipòtesis: la localització de les dunes (superfícies estables) a zones ben aprop de depressions interdunals que mantenen aigua i humitat fins mesos després del monso. En molts casos, com en el cas del jaciment de Vaharvo, moltes d'aquestes depressions foren possibles paleollacs estables durant l'Holocè mig (NoGAP, estudi en curs i [A. Balbo, comunicació personal](#)).

5.3.3. Els models digitals d'elevació

A la secció anterior sobre les fotografies CORONA ja hem vist que actualment existeixen diversos DEMs disponibles per a l'àrea d'estudi, entre els que destaquen les diverses versions del DEM SRTM i del DEM per a l'Índia CartoDEM ([Taula 14](#)). La resolució espacial d'aquests DEMs, entre 90 i 20 m per píxel, és òptima per a la majoria d'estudis regionals. En el nostre cas, el producte que millor opera en la nostra àrea d'estudi són el DEM SRTM i el CartoDEM, tots dos a 30 metres. Aquests productes s'han fet servir sobretot per extreure les corbes de nivell de les planes del Gujarat del Nord i poder relacionar els canvis altimètrics amb la presència de les falles i fosses tectòniques que creuen l'àrea d'estudi.

5. MATERIALS I MÈTODES

Malauradament, la precisió d'aquests productes és insuficient per a captar la diversitat altimètrica a nivell local i poder, així, detectar dunes fòssils amb facilitat o realitzar altres anàlisis altimètriques comunes en SIGs (p.e. la inclinació i desnivell del terreny, la detecció de xarxes hidrogràfiques o les anàlisis de visibilitat). D'altra banda, actualment l'extracció d'un DEM es pot realitzar de forma relativament senzilla a partir de diverses tècniques i metodologies: per estereoscopia d'imatges de satèl·lit a alta resolució (p. e. el DEM ASTER GDEM), per interferogrames d'imatges de radar SAR (per exemple, el DEM SRTM), per captura de punts LiDAR, per fotogrametria d'imatges a baixa amplitud (per exemple, els drones) o resseguint el rellu amb un DGPS, que permet una cobertura molt més ràpida que no pas amb una estació total. La majoria d'aquestes tecnologies, malauradament, no estan disponibles per a la nostra àrea d'estudi (no hi ha cobertura de dades LiDAR públiques i existeixen limitacions per a l'ús de drones), i en molts casos les imatges en estèreo d'alta resolució, o els productes que se'n deriven, tenen un alt cost fora de la majoria dels pressupostos de projectes arqueològics.

Taula 14. Característiques dels models digitals d'elevació utilitzats en aquest estudi i detalls per a la seva adquisició [últim accés als enllaços 15/04/2016].

Producte	Resolució espacial	Agència i cost
SRTM CGIAR v4.1	90 m	Descàrrega gratuïta d'escenes a http://www.cgiar-csi.org
SRTM USGS v3	90 m 30 m	Descàrrega gratuïta en qualsevol servidor dels centres de distribució en xarxa de la NASA-UGGS, p.e.: http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/
ASTER GDEM	30 m	http://earthexplorer.usgs.gov/
CartoDEM	30 m	Descàrrega gratuïta pel territori de l'Índia a través del visor de l'ISRO: http://bhuvan.nrsc.gov.in

Davant d'aquestes limitacions, els companys del projecte NoGAP han explorat l'extracció de perfil altimètrics a les dunes de Datrana IV i Loteshwar a partir d'una malla de punts capturats amb estació total (Figura 15). Aquesta tècnica ofereix uns resultats molt acurats però requereix molt temps d'execució i captura de dades com per a integrar-la en les prospeccions arqueològiques i en les anàlisis a escala regional (Madella *et al.* 2011, 2012b).

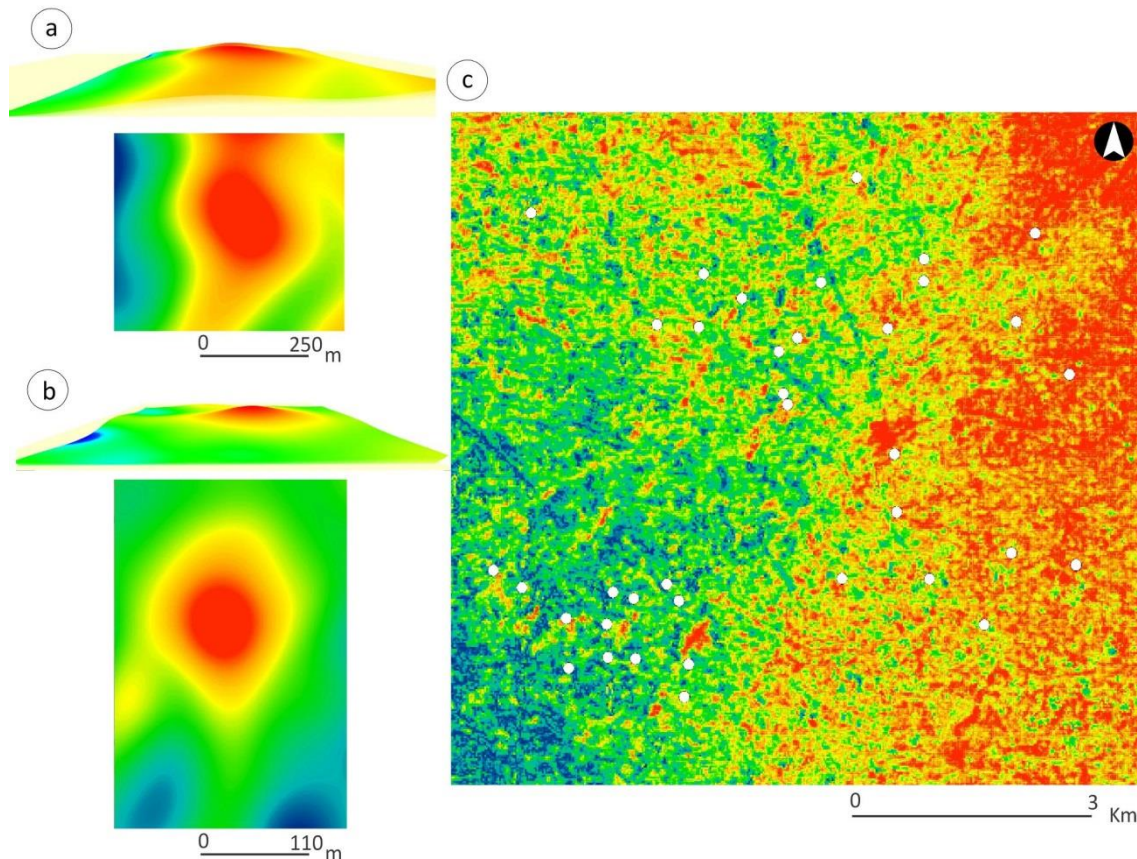


Figura 15. Limitacions dels DEMs regionals per a la detecció de dunes fòssils. (a) Model digital d'elevació realitzat amb estació total al jaciment de Datrana IV; (b) Model digital d'elevació realitzat amb estació total al jaciment de Loteswhar. En els dos casos s'observa la ondulació produïda per la duna fòssil i els camps interdunals més propers; (c) Distribució d'assentaments (en blanc) visualitzats a sobre una imatge ASTER GDEM, a on s'observa la limitació dels DEMs regionals per a la detecció de dunes fòssils.

5.4. Geoarqueologia i anàlisi estadística

Aquesta recerca ha explorat tres estratègies de prospecció geoarqueològica dissenyades com a campanyes de *ground truth* o contrastació i validació de les observacions de la teledetecció: prospecció regional, prospecció en transsecte local i prospecció en transsecte intrajaciment. L'objectiu d'aquestes exploracions, a banda de corregir o documentar noves evidències arqueològiques en superfície, ha estat també la observació *in situ* de la fisiografia local, la documentació qualitativa i quantitativa de les propietats de sòls i sediments i l'exploració metodològica de mètodes estadístics per agrupar i classificar indicadors geoarqueològics.

5.4.1. Prospeccions regionals

Les exploracions a nivell regional s'han desenvolupat seguint, principalment, l'eix vertical que configura la conca fluvial del riu Rupen i el seu afluent Khari des de la *Little Rann* fins a les muntanyes Aravalli per tal de documentar la variabilitat dels diversos gradients ecològics i les macrounitats fisiogràfiques que configuren el paisatge (Madella *et al.* 2011, 2012a, 2012b, Figura 16). D'altra banda, moltes validacions *in situ* de possibles assentaments s'han concentrat a l'àrea de Loteshwar, una de les zones més ben estudiades del Gujarat del Nord i, per tant, amb una presència d'assentaments en duna fòssil força més abundant (Figura 17). En aquesta àrea és a on s'han dut a terme les prospeccions intrajaciment descrites en al quart treball del compendi d'articles que forma el cos principal d'aquesta tesi.

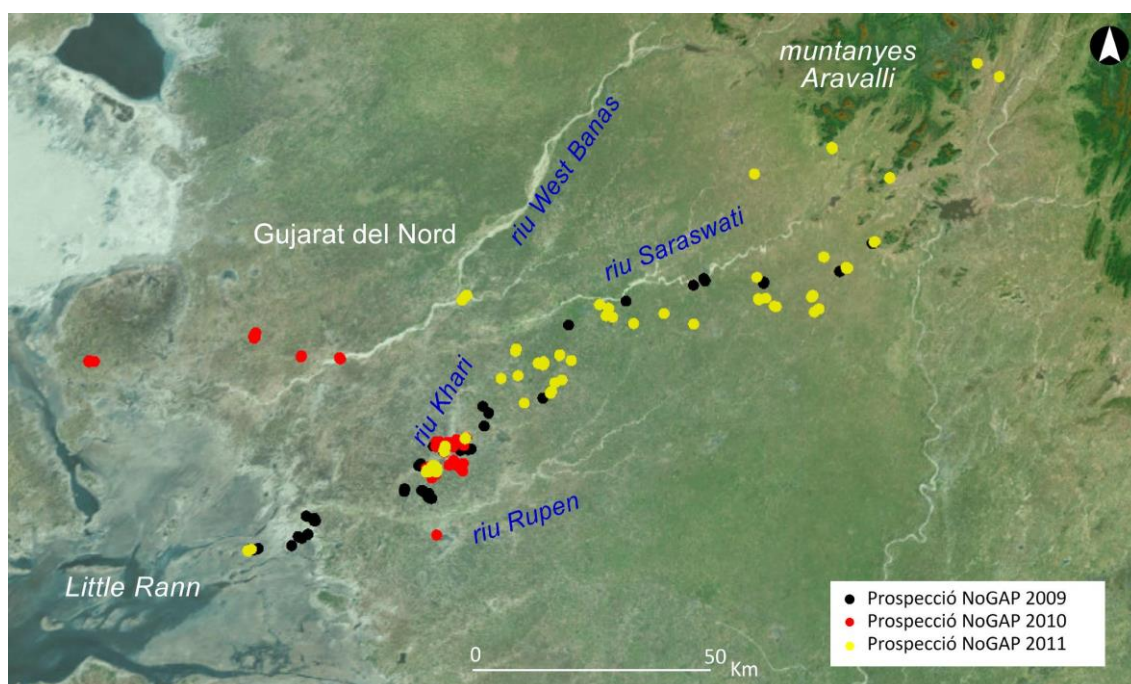


Figura 16. Extensió de les prospeccions i validacions de camp efectuades en el marc del projecte NoGAP (mapa base: SRTM 30m i ESRI World Map).

La mobilitat al camp i la comparació de dades geogràfiques *in situ* s'ha dut a terme gràcies a la combinació de fotografies històriques, imatges de satèl·lit i mapes topogràfics històrics, productes que s'han integrat en una versió remota de Google Earth Pro, fent servir la memòria caché guardada per l'aplicació Google Earth Voyager en connexió amb unitats GPS Garmin eTrex (veure Rondelli *et al.* 2013 per a aplicacions prèvies d'aquesta metodologia a l'Àsia Central). Aquesta metodologia ha

permès una aplicació fàcil i de baix cost per guiar prospeccions arqueològiques i avaluar observacions de la teledetecció *in situ*, i ha estat aplicada posteriorment per Rajesh i Krishnan (2014) al Gujarat i per Markofsky *et al.* (en premsa) al desert del Karakum, Turkmenistan.

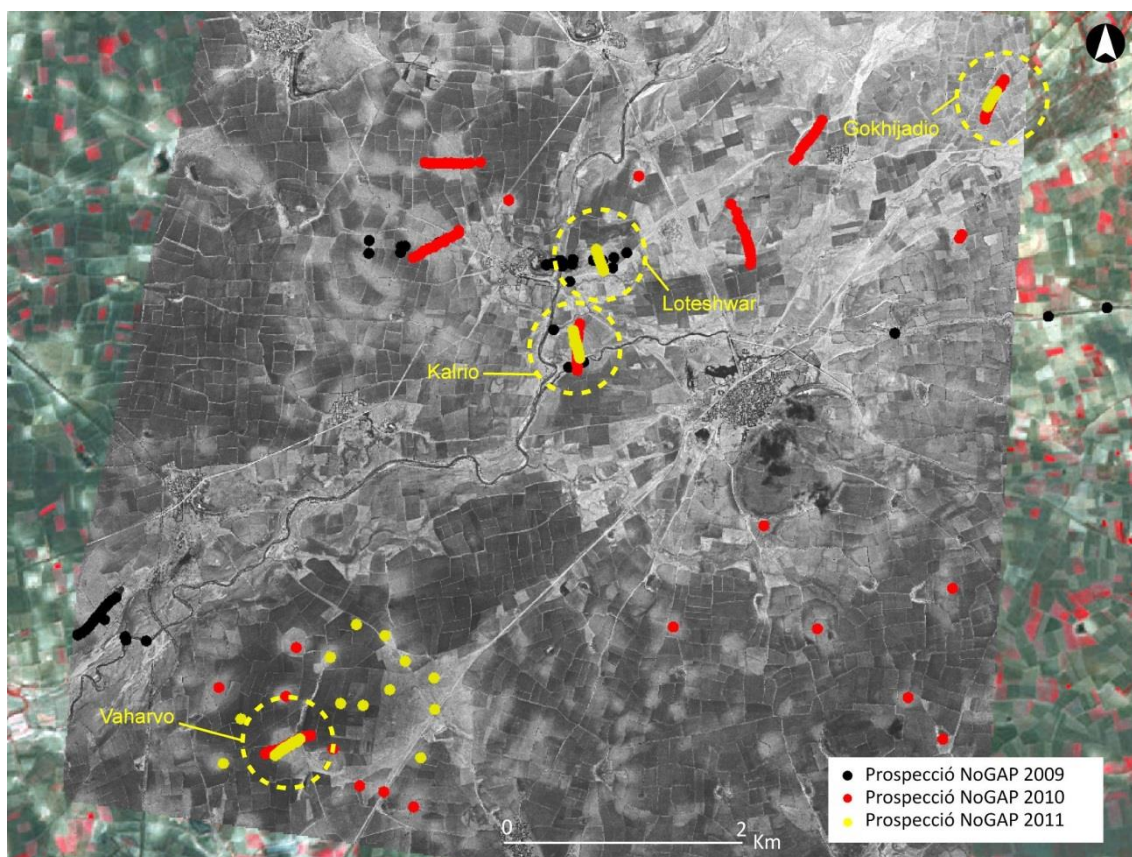


Figura 17. Prospeccions i sondejos del projecte NoGAP a la conca del riu Khari. En groc, els jaciments prospectats en transecte intrajaciment i descrits a la secció 6.4. La imatge de base (CORONA KH-4B, maig 1972) facilita la identificació de dunes fòssils i sòls interdunals.

5.4.2. Prospeccions intrajaciment

A escala intrajaciment, aquesta tesi presenta l'exploració de prospeccions en transecte superficial per tal de documentar de forma qualitativa i quantativa les evidències arqueològiques i les signatures fisicoquímiques recollides en la superfície de dunes fòssils. L'extensió d'aquest estudi s'ha centrat en les dunes de Loteshwar, Vaharvo, Kalrio i Gokhijadio, situades a la conca fluvial del riu Khari. Aquestes dunes foren explorades en primer lloc durant les prospeccions regionals, que avaluaren l'estat de la duna de Loteshwar i documentaren el potencial arqueològic de Vaharvo, Kalrio i Gokhijadio.

5. MATERIALS I MÈTODES

Per a cada jaciment, es dissenyà un transecte que creuava la duna fòssil per la seva part més alta, connectant les dues interdunes en els seus extrems. Les àrees de mostreig, d'1 m², es van emplaçar cada 5 m pels primers 50 m pròxims al vèrtex de la duna i cada 10 m per a la resta de la pendent, tot seguint les àrees de major concentració d'artefactes i ecofactes arqueològics. A cada àrea de mostreig es recollí tot el registre material visible en superfície per procedir a la seva quantificació, en nombre i pes total per a cada element. A més a més, es recollí informació qualitativa *in situ* de les propietats del sediment superficial (color Munsell, textura i mida de gra, així com la descripció del tipus de cobertura terrestre (tipus de vegetació i usos del sòl)). A banda, es recollí una mostra de sediment (c. 10 g) per a la seva caracterització fisicoquímica.

5.4.3. Anàlisis fisicoquímiques

Les propietats fisicoquímiques de les mostres de sediment recollides durant la prospecció en transecte a Vaharvo, Loteshwar, Kalrio i Gokhijadio s'han analitzat mitjançant tres analítiques principals: distribució de mida de partícula (PSD, de *Particle Size Distribution*), pèrdua al foc o pèrdua per ignició (LOI, de *Loss of Ignition*) i espectrometria d'emissió atòmica per plasma acoblat inductivament (ICP-AES, de *Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy*). La distribució de la mida de partícula es va estimar per a sediments fins (<2 mm) utilitzant un mesurador de partícules CoulterLS©. Les mostres contenien aproximadament 0,5 g de sediment dissolt en solució de polifosfat de sodi al 10% (Puy i Balbo 2013). Les mostres amb alt contingut orgànic es van pretractar amb peròxid d'hidrogen per eliminar el material orgànic (Goldberg i Macphail 2006). Finalment, els valors en micròmetres van ser convertits en unitats *phi* (Krumbein 1938; Puy *et al.* 2014). La pèrdua per ignició s'utilitzà per generar indicadors d'humitat del sòl, matèria orgànica, carbons, carbonat de calci i residus minerals a partir de la combustió de sediment en cicles de 4h a 105°C, 400°C, 550°C i 925°C respectivament (Heiri *et al.* 2001). Finalment, es va obtenir la concentració de 35 elements principals a partir de l'anàlisi per espectrometria d'emissió atòmica per plasma acoblat inductivament (Wilson *et al.* 2008). Les mostres van ser pretractades amb *aqua regia* i analitzades al laboratori del grup ALS a Sevilla.

5.4.4. Anàlisi estadística

Les anàlisis estadístiques s'han utilitzat per destacar possibles relacions entre indicadors fisicoquímics del sediment exposat a la superfície de dunes fòssils i el registre arqueològic en superfície. Aquest enfocament es basa en una agrupació jeràrquica d'indicadors fisicoquímics, la classificació supervisada de les evidències arqueològiques i la creació de models d'anàlisi discriminant lineal (LDA, de *Linear Discriminant Analysis*). LDA és un mètode d'aprenentatge automàtic, paramètric i supervisat que calcula la millor transformació lineal d'un conjunt de variables a partir de la separació i agrupació en dos o més classes d'objectes o esdeveniments que han estat prèviament introduïts per l'investigador a partir de la classificació supervisada d'una mostra de les dades originals (Fukunaga 1990).

Els models LDA, en el nostre cas, s'han fet servir per testar la idoneïtat i la consistència d'indicadors fisicoquímics per a la identificació de signatures fisicoquímiques associades a diversos graus d'intensitat i tipus d'ocupacions humanes. Els models de classificació i aprenentatge automàtic LDA s'han escollit perquè permeten una classificació independent de cada unitat de mostreig, independentment del transecte intrajaciment o la categorització arqueològica *a priori* de la duna en què han estat recollides. És per a això que el quart article va més enllà de la simple exploració ordinal i jeràrquica de mostres fisicoquímiques i mostra dos models LDA: el primer assegura una distribució no uniforme del registre arqueològic en superfície, mentre que el segon classifica els identificadors fisicoquímics a partir d'una hipòtesi arqueològica, però amb variables totalment independents del registre arqueològic. Aquesta metodologia es recull en els tres blocs d'anàlisi següents:

- Anàlisi de components principals (PCA) i agrupació jeràrquica dels indicadors fisicoquímics. Aquest bloc ha explorat la variabilitat fisicoquímica de les mostres i ha permès avaluar la distribució espacial dels patrons fisicoquímics al llarg de la superfície de dunes fòssils.
- Classificació supervisada dels conjunts arqueològics a partir de la quantificació del pes total d'artefactes i ecofactes recollits en cada mostreig. En aquest cas, s'ha volgut comprovar que el significat del registre arqueològic en superfície depèn en gran mesura de la dualitat entre la presència o absència de material lític o ceràmic. Un primer model LDA ha explorat la solidesa de classificar les evidències arqueològiques en base a quatre tipus d'ocupació humana en duna fòssil:

5. MATERIALS I MÈTODES

(1) conjunts aceràmics propis de contextos de caçadors-recol·lectors, (2) conjunts ceràmics propis de grups agropastorals, (3) palimpsests mixtes, i (4) mostres que reflecteixen àrees sense evidències arqueològiques però que *a priori*, des de la superfície no permeten indicar si l'absència de materials és degut a una causa tafonòmica (p.e. transport de materials) o bé a l'absència d'activitats humanes.

- Aplicació d'un segon model LDA per testar la solidesa d'utilitzar exclusivament els indicadors fisicoquímics per a la classificació fiable del tipus i intensitat d'ocupacions humanes, l'empremta de les quals queda avui en dia exposada en el sediment superficial de dunes fòssils. En aquest cas, els indicadors fisicoquímics són entrenats per classificar el conjunt de mostres en base a les classes arqueològiques anteriors però utilitzant l'ordinació espacial de les mostres fisicoquímiques. D'aquesta manera, obtenim una classificació i una distribució espacial de signatures fisicoquímiques que es poden posar en relació amb diversos processos i patrons d'origen natural i antròpic presents a la superfície de dunes fòssils.

El conjunt de dades analitzat consisteix en 151 mostres provinents dels transectes intrajaciment realitzats a Vaharvo (47 mostres), Gokhijadio (30 mostres), Loteshwar (35 mostres) i Kalrio (41 mostres). Per a l'ordenació i l'agrupació jeràrquica d'indicadors fisicoquímics també s'han inclòs 13 mostres procedents de les prospeccions regionals que no mostren cap evidència arqueològica, per tal de millorar la discriminació entre els patrons fisiogràfics produïts a escala regional i local. Totes les anàlisis estadístiques s'han realitzat en l'entorn de programari R (RStudio versió 0.98.1049, [R-Core-Team 2014](#)).

5.5. Integració en plataformes SIG

La integració de dades ràster i vectorials en un entorn de Sistemes d'Informació Geogràfica (p.e. QGIS, ArcGIS, Global Mapper) ha permès l'emmagatzematge, visualització i gestió de la informació arqueològica i cartogràfica per a l'àrea d'estudi, i l'elaboració dels mapes temàtics que es presenten en els articles d'aquesta tesi (p.e. mapa fisiogràfic, mapa multitemporal d'inundacions). La major part de les dades SIG són primàries—provenen o bé de l'observació de la superfície terrestre a partir de sensors remots o bé de la recerca efectuada al camp ([Conolly i Lake 2006](#)).

5. MATERIALS I MÈTODES

Les dades secundàries, en canvi, provenen principalment de la digitalització vectorial o del postprocessament d'imatges de satèl·lit. Els principals rius que neixen a les zones altes de les Aravalli Hills i desemboquen a la *Little Rann* (West Banas, Saraswati i Rupen) es van digitalitzar seguint l'ordre jeràrquic de cada conca hidrogràfica a partir dels mapes topogràfics històrics i les observacions de radar SAR (Taula 15). En els models fluvials, els nombres d'ordre s'utilitzen per classificar de manera convencional i uniforme els diversos cursos i segments que configuren un sistema de drenatge fluvial (Brown 1997). Aquest ordre també és útil per determinar si el flux fluvial és de tipus dendrític o paral·lel, característiques que ajuden a interpretar sistemes fluvialitzats afectats pel clima, la geomorfologia i el tectonisme, entre d'altres factors. D'altra banda, els canals d'irrigació s'han digitalitzat a partir de noves imatges multiespectrals i s'han identificat les principals àrees afectades per a la construcció de nous canals (Conesa et al. 2015). Les dinàmiques d'inundació observades en les imatges de radar SAR (Conesa et al. 2014) s'han convertit en polígons vectorials per identificar les àrees inundades durant el monsó i el postmonsó. Finalment, les macro-unitats fisiogràfiques s'han digitalitzat a partir de la classificació semisupervisada d'imatges multiespectrals i DEMs (Balbo et al. 2013).

Taula 15. Relació d'elements vectorials integrats en SIG.

Vector	Morfologia	Descripció	Font
Punts	Relictes fòssils (dunes, interdunes, paleocanals)	Jaciments arqueològics (revisats o no)	1ària: treball de camp (GPS)
		Mostrejos geoarqueològics	
		Validacions de camp	
Línies	Corrents fluvials	Ordres de drenatge dels rius West Banas, Saraswati i Rupen	2ària: Digitalització
	Canals	Canal i subcanals del projecte Nal Sarovar	2ària: Digitalització
	Llacs i <i>tanks</i>	Depressions amb retenció d'aigua mitjançant l'observació per radar SAR	2ària: Classificació
Àrees	Illes	Illes de la <i>Little Rann</i>	2ària: Digitalització
	Unitats fisiogràfiques	Interpretació de les diverses unitats fisiogràfiques	2ària: Classificació

El sistema de coordenades més utilitzat per georeferenciar jaciments arqueològics a l'Índia són les coordenades geogràfiques, expressades en les unitats angulars sexagesimals de latitud i longitud.

Aquest sistema permet una fàcil anotació de coordenades i té una àmplia difusió internacional. Durant el treball de camp s'utilitzà preferentment aquest sistema, ja que permet l'intercanvi de dades amb altres investigadors. La integració en entorns SIG, en canvi, utilitza la projecció el·lipsoïdal *Universal Transverse Mercator* (UTM). Com que la Terra no és una esfera perfecta sinó un geoid, el sistema UTM utilitza una formulació matemàtica per calcular la seva forma aproximada, expressada en forma de datum. El datum utilitzat ha estat el *World Geodetic System 1984* (WGS 84). Malgrat que l'àrea d'estudi queda integrada en les zones 42 i 43 (nord) de la projecció UTM, i tenint en compte que la regió on es focalitza l'estudi cau majoritàriament a la zona 42, les referències espacials de la zona 43 s'han forçat dins el fus 42 per poder treballar amb un codi UTM homogeni.

5.6. Disponibilitat i visualització de la base de dades arqueològica

Aquesta tesi doctoral es presenta amb dos fitxers complementaris que mostren la base de dades arqueològica i el fitxer font que s'ha utilitzat per a les anàlisis estadístiques del quart article (Taula 16). Els fitxers estan en format .kmz (fitxer propi de Google Earth que permet una ràpida integració en qualsevol plataforma d'informació geogràfica). Considerem que aquest format és molt més accessible que un annex imprès, i a més a més permet la ràpida visualització espacial tant de les localitzacions arqueològiques al Gujarat del Nord com de les unitats de mostreig presentades en el quart article, amb la quantificació arqueològica i els valors fisicoquímics per a cada mostra.

Taula 16. Fitxers complementaris (kmz) que inclouen la base de dades arqueològica del Gujarat del Nord i el resultat de les classificacions del quart article.

fconesa_locations_data.kmz	Base de dades arqueològica. Inclou també aquelles localitzacions explorades en el marc del projecte NoGAP on es documenta absència de registre material en superfície.
fconesa_proxies_data.kmz	Base de dades del mostreig arqueològic i fisicoquímic en superfície.

Les validacions de camp i les localitzacions de la base de dades geoarqueològica es representen com a un punt geogràfic amb els seus atributs corresponents. Assumim que els nostres jaciments no són una única coordenada en l'espai, sinó que estan formats per una o diverses àrees segons la distribució espacial de diversos indicadors antròpics. En aquest sentit, el tipus de mostreig intrajaciment i les anàlisis desenvolupades en el quart article representen un salt qualitatiu per a la

5. MATERIALS I MÈTODES

representació de la significança i l'extensió de les localitzacions en superfície i obren una nova perspectiva per a la representació de jaciments sense estructures visibles o preservades. Ara per ara, però, davant l'actual coneixement arqueològic a la regió s'ha escollit utilitzar el punt com a entitat bàsica vectorial per a la representació espacial de les dunes amb presència d'evidències arqueològiques en superfície a escala regional.

6. COMPENDI D'ARTICLES

6.1. Contributions of geoarchaeology and remote sensing to the study of Holocene hunter-gatherer and agro-pastoral groups in arid margins: the case of North Gujarat (Northwest India)

Andrea L. BALBO, Bernardo RONDELLI, Francesc C. CONESA, Carla LANCELOTTI, Marco MADELLA i P.

AJITHPRASAD

2013, *Quaternary International*, 308-309:53-65, [DOI:10.1016/j.quaint.2012.12.016](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.12.016)

Special Issue: *Geoarchaeology: a toolbox of approaches applied in a multidisciplinary research discipline*, editat per Sorcha DISKIN, Vanessa HEYVAERT, Kosmas PAVLOPOULOS i Brigitta SCHÜTT

Contents lists available at [SciVerse ScienceDirect](#)

Quaternary International

journal homepage: www.elsevier.com/locate/quaint

Contributions of geoarchaeology and remote sensing to the study of Holocene hunter–gatherer and agro-pastoral groups in arid margins: The case of North Gujarat (Northwest India)



Andrea L. Balbo^{a,*}, Bernardo Rondelli^a, Francesc Cecília Conesa^a, Carla Lancelotti^b, Marco Madella^{a,c}, P. Ajithprasad^d

^aComplexity and Socio-Ecological dynamics (CaSEs), Institució Milà i Fontanals, Spanish National Research Council (IMF-CSIC), C/Egipciaques 15, 08001 Barcelona, Spain

^bInstituto de Historia, Centro de Ciencias Humanas y Sociales (CCHS), CSIC, C/Albasanz 26-28, 28037 Madrid, Spain

^cCatalan Institute of Research and Advanced Studies (ICREA), IMF-CSIC, C/Egipciaques 15, 08001 Barcelona, Spain

^dMaharaja Sayajirao University of Baroda (MSBU), Baroda, India

ARTICLE INFO

Article history:

Available online 20 December 2012

ABSTRACT

The present work aims at setting the bases for the critical study of settlement patterns and resource management among Holocene hunter–gatherer and agro-pastoral groups in arid margins. The case study is set on the SW margin of the Thar Desert, in N Gujarat, an ecotone sensitive to the slightest shifts in precipitation patterns (Indian Summer Monsoon). The potential significance of published and newly acquired archaeological information is discussed in the light of physiographical data collected from satellite imagery and field exploration. The review of available and newly acquired records includes: (a) The integration of field and remote observation of regional traits and (b) The definition of active morphological processes that may bias archaeological preservation and visibility. A synthetic geo-archaeological map of the study area is proposed that integrates physiographical and archaeological evidence at the regional scale. The potential significance of the archaeological evidence in the region (i.e. presence/absence/concentration of archaeological materials in different physiographical units) is discussed in terms of preservation and visibility. At this stage, results are considered at the regional level of macroscopic units. The results constitute the first step towards the full multi-scalar integration of landscape architectures, stratified archaeological sites and surface sediments at regional and local levels.

© 2012 Elsevier Ltd and INQUA. All rights reserved.

1. Introduction

Understanding of long-term human environmental adaptability and anthropogenic modification of ecological niches depends on understanding the past settlement dynamics and resource management (Barton et al., 2010). In archaeology, these aspects are usually derived from the observation of statistically recurrent factors or events (i.e. patterns). However, archaeological evidence is fragmentary and its significance needs to be evaluated critically in

a multi-scalar approach that takes into account preservation and visibility. This paper aims at evaluating such variables for the archaeological record recovered in N Gujarat over the past decades, taking into account active morphogenic processes (as seen in satellite imagery and field explorations), present-day land-use and land-cover, as well as possible research biases. This assessment provides the basis for future interpretations of presently observed patterns, and for planning further research in the region in view of the highlighted morphogenic constraints.

Non-urban archaeology in N Gujarat consists mostly of open-air scatters of archaeological material relating to the last hunter–gatherer and the first agro-pastoral inhabitants of the region. Only a few of these scatters have been systematically excavated and dated (Patel, 2009; Madella et al., 2010; Ajithprasad, 2011). The bulk of the archaeological dataset used for this work integrates newly discovered with previously published evidence available for N

* Corresponding author.

E-mail addresses: balbo@imf.csic.es (A.L. Balbo), bernardo.rondelli@imf.csic.es (B. Rondelli), francesc.cecilia@imf.csic.es (F. Cecília Conesa), carla.lancelotti@imf.csic.es (C. Lancelotti), marco.madella@icrea.es (M. Madella), ajitkaroli@rediffmail.com (P. Ajithprasad).

Gujarat (Ajithprasad, 2004; Madella et al., 2010; Ajithprasad and Sonawane, 2011; Bhan, 2011).

The full appreciation of the significance of pre-urban archaeology in N Gujarat greatly depends on the ability to relate it to past and present environmental conditions and physiographic processes. Information exists regarding past climatic and environmental conditions (Juyal et al., 2003, 2006; Madella and Fuller, 2006; Singh et al., 2007; Singhvi et al., 2010). However, little work has been done to date to understand how environmental change may have affected archaeological visibility and preservation, a fundamental step to propose robust syntheses of prehistoric settlement dynamics. These developments are necessary for understanding of the development, maintenance and interaction of different socio-ecological systems (e.g. hunter-gatherers, agropastoralists, settled agriculturalists) in arid regions (Le Houerou, 2002; Morales et al., 2009; McAllister et al., 2011), that are the result of long-term synergies between social and ecological agents.

2. Study area: ecotones and arid margins of NW India

The area covered in the present study is located along the southernmost boundary of the Thar Desert, and extends from the Little Rann of Kutch to the foot of the Aravalli Hills (Fig. 1a). The present work focuses on the catchment of the three major regional rivers: the West Banas, the Saraswati, and the Rupen (Fig. 1a). This is presently one of the driest regions in India (apart from the Thar Desert), with average yearly precipitation being half the average recorded for the whole Indian sub-continent (http://www.tropmet.res.in/static_page.php?page_id=51). The study area represents an arid marginal region, prone to severe droughts on one hand and to frequent floods on the other (Fig. 1b) (Attri and Tyagi, 2010).

The state of Gujarat is made of a low-lying peninsula extending into the Arabian Sea, defined to the north by the Aravalli-Delhi fold belt and the Kutch Rift, and to the south by the Narmada Rift and the Gulf of Cambay (Kar, 1993; Tandon et al., 1997; Prasad et al., 1998) (Fig. 1a). The narrow strip of land between the Sabarmati River to the SE and the Little and the Great Rann of Kutch to the NW (plus the Island of Kutch) is best described as an arid margin. N Gujarat can be considered an ecotone due to its geographical position, between the hyper-arid Thar Desert to the north and the humid sub-tropical Saurashtra to the south. In this region, small changes in yearly Indian Summer Monsoon (ISM) patterns cause significant variations in seasonal precipitation at the local level (Chamyal et al., 2003; Singh and Ranade, 2010) (Fig. 1b). Precipitation boundaries along this NW/SE trend have changed over time, directly affecting the maximum extent of the Thar Desert to the south in the late Pleistocene and early Holocene (Fig. 1b) (Goudie et al., 1973).

Previous work has defined some of the main climatic phases affecting NW India at the end of the Pleistocene and during the Holocene (Allchin and Goudie, 1971; Goudie et al., 1973; Kale et al., 2000; Madella and Fuller, 2006; Prasad and Enzel, 2006; Prasad et al., 2007). However, those palaeoclimatic summaries were focused at sub-continental level, lacking detail at the local and regional levels (see discussion in Madella and Fuller, 2006). Information at the local level, which is fundamental to the understanding of resource availability (i.e. water accessibility, vegetation cover, presence of animals), has been derived mostly from climatic geomorphology (Gutierrez, 2005).

Climatic conditions have strongly affected the morphological setting of this geologically homogeneous region, mostly made of alluvium accumulated over Neogene deposits during the Pleistocene (Merh and Chamyal, 1997; Tandon et al., 1997; Prasad et al., 1998; Chamyal et al., 2003). The upper fluvial sequences were deposited during humid phases 54–30 ka BP (Srivastava et al., 2001). Dunes formed on top of those deposits during arid

climatic phases 26–5 ka BP (Chawla et al., 1992; Juyal et al., 2003; Saini and Mujtaba, 2012). Around 7 ka, climate and dunes stabilised and the Thar Desert reached its present-day extent (Saini and Mujtaba, 2012 and references therein). Climatic models at the continental and global scales suggest that the Asian monsoon has been progressively weakening throughout the Holocene (e.g. Liu et al., 2003), although strengthening has been observed locally over the past 1.5 ka (Anderson et al., 2010).

The region is tectonically active, with palaeotectonic activity detected as late as 3–0.3 ka (Srivastava et al., 2001). The last major earthquake was recorded in 2001 (7.8 Richter).

N Gujarat offers ideal conditions for the study of the persistence of hunter-gatherers and their interaction with agro-pastoralists in the mid and late Holocene. Here, archaeological preservation (due to little urbanization) and landform visibility (due to sparse vegetation), together with the environmental sensitivity that characterizes the region, facilitate the integrated study of human-environment covariance and co-evolution (Allchin and Goudie, 1971; Agrawal and Pande, 1977).

3. Material and methods

Geoarchaeological investigation integrates palaeoenvironmental information with archaeological research in a multi-scalar perspective to account for the evolution of human-environment relationship (Butzer, 1982; Bubenzer and Reimer, 2007; Balbo et al., 2010). Remote sensing has become a fundamental mainstream tool in this approach (Lasaponara and Masini, 2011). Historically, the main application of remote sensing in archaeology has been the localization, direct or through geo-ecological parameters, of archaeological sites (Wilkinson et al., 2006; Siart et al., 2008, 2009; Lasaponara and Masini, 2011). Because of this, the area of influence of the method has been restricted to large built sites of historical archaeology and recent prehistory (Wilkinson et al., 2006; De Laet et al., 2007; Di Giacomo et al., 2011; Grøn et al., 2011; Traviglia and Cottica, 2011). Examples of a more landscape-oriented use of geoarchaeology and remote sensing are known in alluvial environments (Challis and Howard, 2006; Wilkinson et al., 2010), and few exemplar case studies have been conducted in desert and arid environments in Africa, the Mediterranean, the Near East and SW Asia (Bubenzer and Reimer, 2007; Siart et al., 2008; Derooin et al., 2011). On the Indian sub-continent, the use of remote sensing has focused on geomorphologic studies (Kar, 1993; Prasad et al., 1998). However, a recent analysis has highlighted the potential of remote sensing for the study of Harappan sites along palaeochannels of the Indus River catchment (Rajani and Rajawat, 2011). Similarly, Singh et al. (2008, 2010) contextualize the archaeological record in Western Uttar Pradesh and Haryana with the support of remote sensing and geoarchaeology. India is now easing the use of remote sensing in archaeological research thanks to the recent loosening of sharing policies within the Indian Space Research Organization (ISRO) (Bagla, 2011), and the launching of specific satellites for environmental monitoring by the Indian Remote Sensing satellite program (ISR).

Satellite imagery is the most useful in marginal regions with little or inconsistent available mapping data, as it allows identification of physiographic features in a multi-scale perspective (Dincauze, 2000; Goldberg and Macphail, 2006). In the present study, the use of satellite imagery involves Digital Elevation Models (DEM) (Bolch et al., 2005) and multispectral analyses (Smith and Pain, 2009).

DEM data were used to define general topography and derive contour lines, relief and slope (Table 1) (Siart et al., 2009). The base DEM was extracted from Shuttle Radar Topography Mission data (SRTM 3 Arc degrees, ~90 m, <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>).

6.1. CONTRIBUTIONS OF GEOARCHAEOLOGY AND REMOTE SENSING

A.L. Balbo et al. / Quaternary International 308-309 (2013) 53–65

55

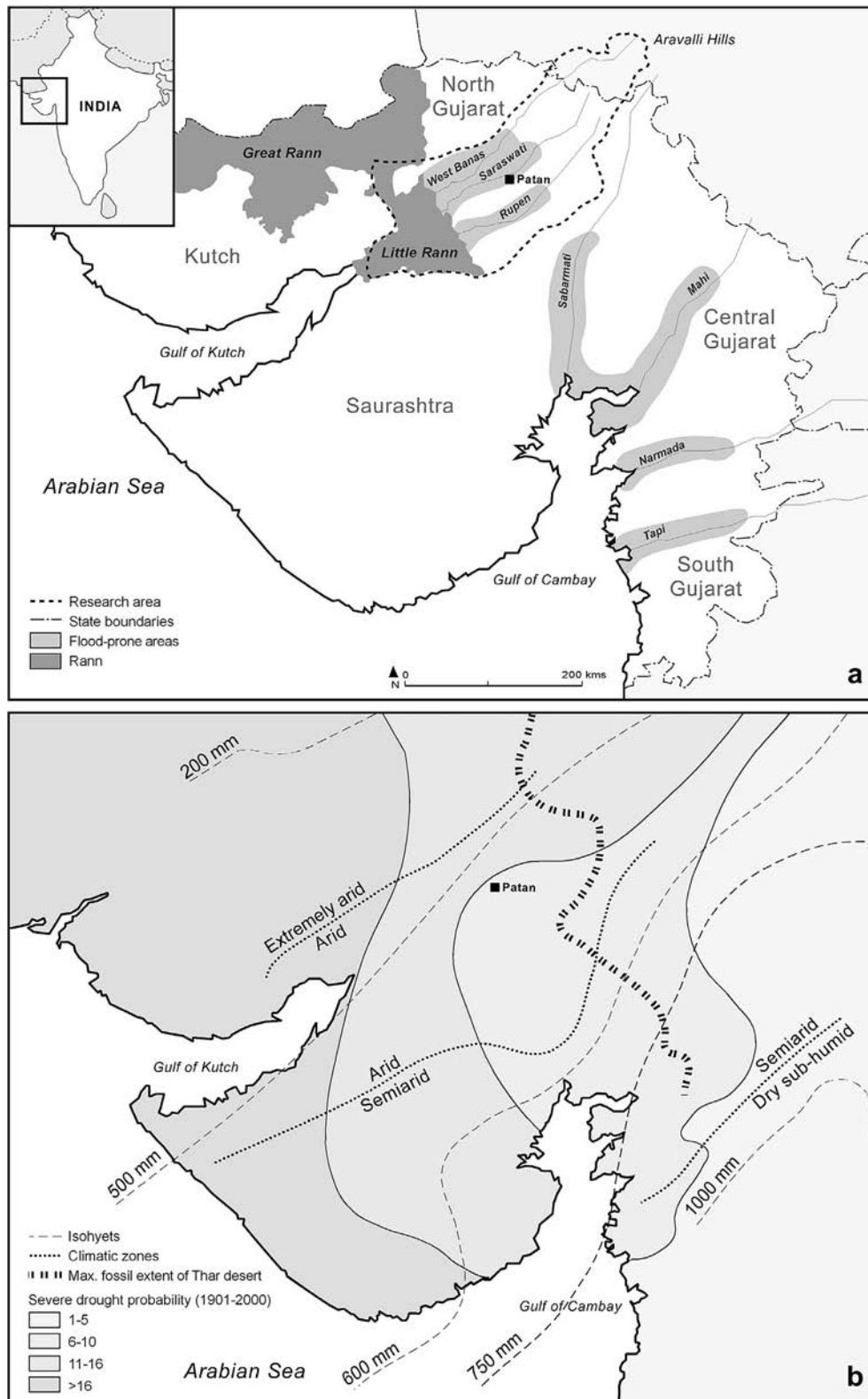


Fig. 1. (a) Location map of the study area (thick dotted line) within N Gujarat (Inset: Gujarat within India). Flood prone areas (medium gray shading along main regional rivers) for the period 1901–2000 as indicated in Attri and Tyagi (2010, p. 104). (b) The same map with indication of: (i) drought prone areas (higher likelihood of drought is indicated by darker grey shades) for the period 1901–2000 as indicated in Attri and Tyagi (2010, p. 64), (ii) isohyets, (iii) maximum fossil extent of Thar Desert (Singhvi et al., 2010, p. 3096), (iv) climatic zones (Chamyal et al., 2003, p. 70).

6.1. CONTRIBUTIONS OF GEOARCHAEOLOGY AND REMOTE SENSING

ASTER GDEM data (1 Arc degree, 30 m resolution, <http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>) were used locally when higher resolution was needed. Clouds in this monsoon-dominated region prevent full coverage of the area with ASTER. SRTM data are continuous independent of weather. Published historical maps (Russian and American, [poehali.org, http://www.lib.utexas.edu/maps/ams/india/](http://www.lib.utexas.edu/maps/ams/india/)) and CORONA satellite photographs (KH4B 1972) were used to support mapping of physiographical features (Fowler and Fowler, 2005; Beck et al., 2007).

Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER, 15 m resolution) imagery was used to define morphological features (Table 1) (Altaweel, 2005; Lillesand et al., 2008). Physiographic zones (land units in Fig. 2) were derived from a combination of: (a) Landsat, (b) ASTER and (c) Ground-truth fieldwork. Unsupervised classification of Landsat 5 and 7 was performed using Principal Component Analysis (PCA) and ISODATA. ASTER images were processed using PCA. PCA was based on established combinations of bands (Friedl and Brodley, 1997; Rogan et al., 2003) to

Table 1
Image metadata for core satellite products used in this study.

Mission	Sensor	Product	Scene ID	Acquisition	Clouds	Multi resolution	Bands used
LANDSAT 5	TM	L1	149043_04320000123	1/23/00	0%	30	1234567
LANDSAT 5	TM	L1	149044_04420000123	1/23/00	0%	30	1234567
LANDSAT 7	ETM+	L1	1149044_04419991027	10/27/99	0%	30 (15 PAN)	12345678
LANDSAT 7	ETM+	L1	1149043_04320000927	9/27/00	0%	30 (15 PAN)	12345678
TERRA	ASTER	140TH	003:02112004055659	2/11/04	0%	15	VNIR1-2-3N
TERRA	ASTER	140TH	003:04152004055613	4/15/04	0%	15	VNIR1-2-3N
TERRA	ASTER	140TH	003:04222004060228	4/22/04	0%	15	VNIR1-2-3N
TERRA	ASTER	140TH	003:04222004060219	4/22/04	0%	15	VNIR1-2-3N
TERRA	ASTER	140TH	003:11212005054918	11/21/05	0%	15	VNIR1-2-3N
TERRA	ASTER	140TH	003:04212006055554	3/21/06	0%	15	VNIR1-2-3N
TERRA	ASTER	140TH	003:04052006055525	4/5/06	0%	15	VNIR1-2-3N
TERRA	ASTER	140TH	003:04052006055552	4/5/06	0%	15	VNIR1-2-3N
TERRA	ASTER	140TH	003:04052006055543	4/5/06	0%	15	VNIR1-2-3N
TERRA	ASTER	140TH	003:04142006054925	4/14/06	0%	15	VNIR1-2-3N
TERRA	ASTER	140TH	003:04142006054917	4/14/06	0%	15	VNIR1-2-3N
TERRA	ASTER	140TH	003:04242007055628	4/24/07	0%	15	VNIR1-2-3N
TERRA	ASTER	140TH	003:01262010055607	1/26/10	0%	15	VNIR1-2-3N
TERRA	ASTER	140TH	003:01262010055558	1/26/10	0%	15	VNIR1-2-3N
TERRA	ASTER	140TH	003:05182010055611	5/18/10	0%	15	VNIR1-2-3N
SRTM			3N23E072V1	02/2012		3-ARC	
SRTM			3N23E073V1	02/2012		3-ARC	
SRTM			3N24E072V1	02/2012		3-ARC	
SRTM			3N24E073V1	02/2012		3-ARC	
SRTM			3N24E071V1	02/2012		3-ARC	
SRTM			3N23E071V1	02/2012		3-ARC	
TERRA	ASTER	GDEM (2)	V2_ON24E072	10/17/11		1-ARC	
TERRA	ASTER	GDEM (2)	V2_ON24E071	10/17/11		1-ARC	
TERRA	ASTER	GDEM (2)	V2_ON23E071	10/17/11		1-ARC	
TERRA	ASTER	GDEM (2)	V2_ON24E074	10/17/11		1-ARC	
TERRA	ASTER	GDEM (2)	V2_ON23E073	10/17/11		1-ARC	
TERRA	ASTER	GDEM (2)	V2_ON24E073	10/17/11		1-ARC	

Multispectral analyses applied here include: (a) Natural and false colour composites (Smith and Pain, 2009), (b) Unsupervised classification (ISODATA) (Liu and Mason, 2009; Parcak, 2009) and (c) Principal Component Analysis (PCA) (Lillesand et al., 2008). Landsat 5 Thematic Mapper (TM, 30 m resolution), Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper (ETM+, 30 m resolution) and Advanced

define such features as rock outcrops, plant cover, soil moisture and water bodies (Table 2). ISODATA was used for automatic classification of land units. The number of ISODATA land unit classes (5, 7, 10) was derived from preliminary experiments with PCA. Satellite image treatment software used was ENVI 4.5 (band combination, ISODATA, PCA) and GRASS (DEM, PCA).

Table 2
Multispectral band combination for the identification of major physiographic units.

Sensor & bands	Reflectance response	Characterization of physiographic units
TM & ETM 4-3-2	In the standard "false colour" composite image, vegetated areas appear in shades of red. Deeper red indicates broad leaf vegetation, lighter red sparse vegetation.	Vegetation, Irrigated agriculture
TM & ETM 4-5-3	Wetter soils appear black or dark blue because of the infrared absorption of water; on the basis of these colours, lakes, tanks and streams can be easily located.	Lakes, Islands, Little Rann, Dune—Interdune
TM & ETM 7-5-4	In this image, shades of yellow can be used to define textural and moisture characteristics of soils; the vegetation appears blue.	Alluvial deposits, Soil moisture, Palaeochannels
TM & ETM 7-4-5	This combination of these bands is the same as for the previous image but the vegetation appears green. Both these images allow identification of lithological units.	Rock outcrops
AST VNIR1-2-3N	Near infrared and the nadir visible bands of ASTER produces a high reflectance of dune sand deposits and soil moisture characteristics of soils	Vegetation, Irrigated agriculture, Alluvial deposits

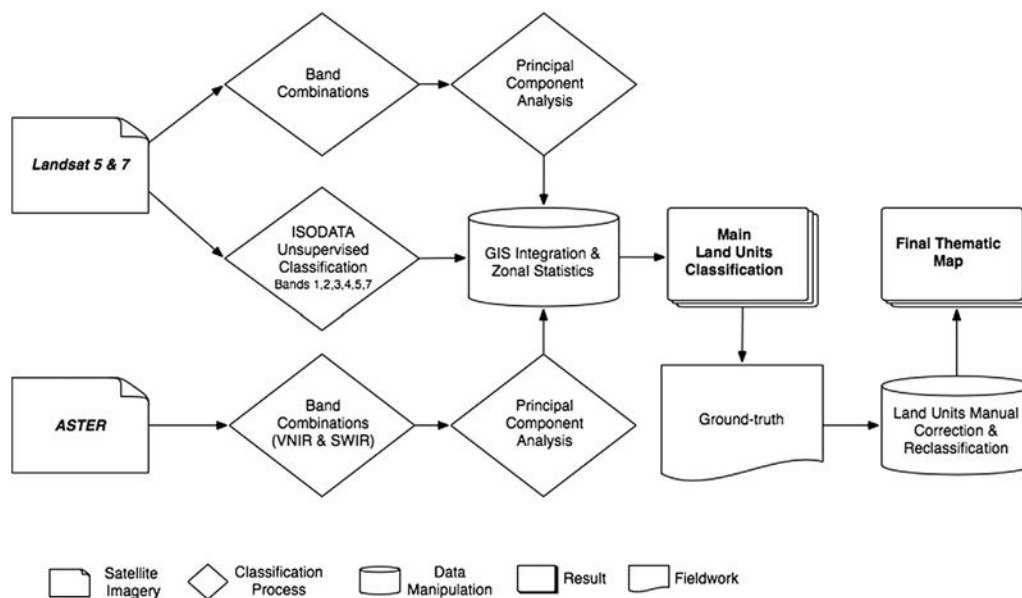


Fig. 2. Flowchart summarizing the main steps involved in the mapping process.

Multispectral response on satellite imagery was contrasted with field observations (Prasad et al., 1998; Challis and Howard, 2006; Bubenzer and Reimer, 2007; Fitzsimmons, 2007; Stellmes et al., 2010). Ground-truth zones were chosen based on results from PCA and ISODATA analyses. Visited land features included (but were not restricted to):

- (1) Boundaries between land units (e.g. the Dune–Interdune to silt belt transition zone, the edge of the Little Rann).
- (2) Large interdunal depressions and palaeolakes, especially in areas of high archaeological density (e.g. in the Dune–Interdune zone), or absence of the same (e.g. in the lower silt belt).
- (3) Active channels and palaeochannels within the West Banas Alluvial Fan Deposits.
- (4) River morphologies showing possible axial displacements due to tectonics (e.g. West Banas near the Dune–Interdune to silt belt boundary).
- (5) Islands on the margin of the Little Rann.
- (6) A transect was explored across the silt belt, assessing the hypothesized subdivision in upper and lower silt belt on the basis of dune morphology.
- (7) The foot of the Aravalli assessing geological substratum as well as active aeolian and erosive processes (e.g. gullies).

Archaeological information results from a combination of previous surface surveys and excavations (Seth et al., 2007; Madella et al., 2010; Ajithprasad and Sonawane, 2011) with newly collected field evidence. Previously conducted systematic surveys covered only parts of the study region (i.e. the Dune–Interdune unit). Other areas within the study region appeared as virtually uncharted previous to the present study (e.g. the lower portion of the silt belt). The current survey was organized accordingly following two distinct strategies: corrective and exploratory.

- (1) In areas that had previously undergone intensive systematic archaeological survey, intervention focused on the homogenization of data collected in previous campaigns. Survey coverage from previous campaigns was assumed to be exhaustive. In these areas the primary aim of the intervention was the correct

positioning of previously identified archaeological scatters, especially those recorded before the introduction of Global Positioning System technology (GPS). In the process, ambiguous situations were rectified in terms of site names and typo-chronological characterization of archaeological scatters. Areas of particular interest for further research were also identified (e.g. concentrations of sites with similar chrono-cultural assemblages near extant palaeoenvironmental features). Exposed profiles within interdunal areas were surveyed to assess the possible presence of buried archaeological material.

- (2) The main aim of the survey within uncharted areas was the identification of archaeological sites, or the definition of possible reasons for their absence. Due to the vast extent of the area to be covered and the limited amount of time available, the strategy did not allow for integral coverage of the region. Instead, the survey was organized along a transect connecting the Little Rann to the foot of the Aravalli Hills along the main slope gradient. Potential contexts were identified on satellite imagery following patterns observed in previously surveyed areas and systematically explored through field walking.

All records were consistently integrated in a database including information related to corrected geographical position and classification of assemblages in terms of artefacts (e.g. lithic tools, ceramic) and a/biotic remains (e.g. sediments, bones and plant remains). All data (physiographical and archaeological) were georeferenced to Universal Transverse Mercator (UTM) zone 42N datum World Geodetic System (WGS) 1984 (Robinson et al., 1995) and normalised for use in GoogleEarth software for overlay mapping and field survey (real-time tracking using remote GoogleEarth cache files and GPS devices). Remote and field data were integrated into Geographic Information System (GIS) platform ESRI ArcGIS 10 (data integration and final map production) (Bauer et al., 2004; Siart et al., 2009) for spatial analysis and modelling.

4. Results

The DEM of the study area shows a general descending altitudinal trend from the Aravalli Hills to the NE to the Little Rann to the

SW. The main bedrock outcrops correspond to the Aravalli Hills (Fig. 3b), although smaller bedrock outcrops are observed near the Little Rann in correspondence with the Datrana Hills (Fig. 3a) and Granite Lowlands. Lithology is Cretaceous and Jurassic (plutonic) for the Aravalli Hills, and Eocene for the Datrana Hills (Geological Survey of India 2001). The East Cambay Basin Margin Fault (EC BMF) marks the boundary between the Aravalli Hills and the dune fields located in the SW (Maurya et al., 1995, p. 611; Srivastava et al., 2001, p. 218; Rangarajan, 2008, p. 6).

The field of dunes found at the foot of the Aravalli Hills extends to the Little Rann, and may be subdivided into three zones on altitudinal and pedological/sedimentological grounds: (1) the Uplands where erosion gullies dominate the dune landscape (Fig. 3b); (2) the Silt Belt with thick interdunal soils; and (3) the Dune–Interdune Belt reaching the edge of the Little Rann. The last two are dominated by Quaternary and Holocene alluvial and aeolian deposits (Geological Survey of India, 2001). Although similar in terms of surface morphology, the Silt Belt and the Dune–Interdune Belt can be differentiated combining: (a) Spectral signatures from satellite images, (b) Tectonic information from published sources and (c) Field reconnaissance. The Silt Belt gives much higher reflection within the NIR band (ASTER and Landsat) than the Dune–Interdune Belt when false color composites are used (Fig. 4). The boundary between the Silt and Dune–Interdune Belts runs along the 40 m asl contour line, in coincidence with the West Cambay Basin Margin Fault (WC BMF) (Maurya et al., 1995, p. 611; Srivastava et al., 2001, p. 218; Rangarajan, 2008, p. 6). A flattening in the general slope trend is observed along this boundary that may be correlated with the presence of this tectonic feature (Fig. 4). The limited resolution of currently available DEM limits the possibility to further assess the significance of the detected change in slope. However, field observations confirm the existence of a flatter topography in the zone found directly above the 40 m asl, and deeper river incision below. Based on elevation data and field exploration, the Silt Belt can be divided into two physiographic units: (a) The lower Silt Belt, SW of Patan, with a generally flatter topography (smaller dunes generally 5 m high or less, similar to those found in the Dune–Interdune area) and (b) the upper Silt Belt, NW of Patan to the foot of the Aravalli, with a steeper topography (larger dunes 10–50 m high).

The Little Rann is the most depressed portion of the study area. In false color, this area produces a very high reflectance (bright white). A similarly high reflectance is observed for the dunes in the Dune–Interdune Belt and for River Deposits. A number of small promontories of Quaternary origin are observed within the Little Rann that become islands during exceptionally high seasonal precipitation (Maurya et al., 2009).

The three main watercourses within the study area are, from north to south: the West Banas, the Saraswati and the Rupen, of which the shorter Kari is an affluent. The West Banas has the biggest catchment area, the Rupen the smallest. Most stream captures within these watercourses are aligned along two boundaries: the boundary between the Aravalli Hills and the Silt Belt and that between the Silt and Dune–Interdune Belts. These two alignments roughly define the upper and lower limits of the West Cambay Rift. The lower portion of the West Banas is characterized by the presence of a broad aggrading alluvial fan. Discharge conditions promote frequent river cuttings and avulsions. Palaeochannels radiating from the apex of the alluvial fan, across its surface, are numerous and well defined within this predominantly depositional landform. Channel avulsions and migrations within this portion of the West Banas are detected in remote imagery and historical cartography (Fig. 5). Relict meandering channels cutting through the banks of the braided West Banas are occasionally reactivated during the rainy season (Fig. 5). Fig. 5f provides a scale for the seasonal variations in water load of the West Banas.

When the overall distribution of archaeological scatters is observed in conjunction with the physiographical characteristics described above the following patterns emerge (Fig. 6):

- 1 Archaeological scatters are situated on high areas:
 - a. Dunes of the Dune–Interdune Belt (Fig. 7b, c)
 - b. Dunes of the Silt Belt (Fig. 7b, c)
 - c. Islands within the Little Rann (Quaternary river deposit outcrops) (Fig. 7a).
- 2 One new archaeological scatter was recorded within the lower Silt Belt (Fig. 6), and a number of new archaeological scatters were recorded within the upper Silt Belt. These incidences significantly integrate previously published archaeological scatters located within the Dune–Interdune Belt (Fig. 6).

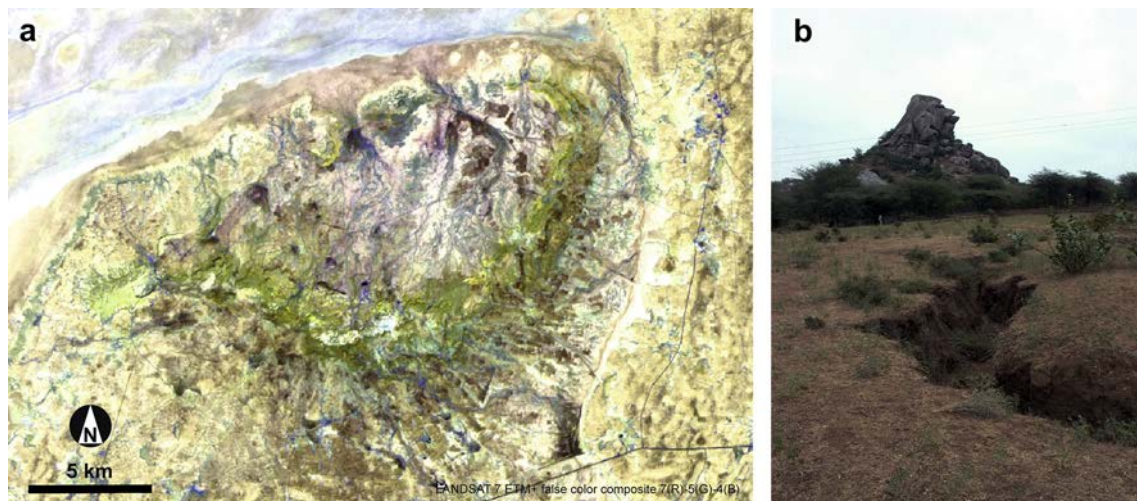


Fig. 3. (a) Datrana Hills on Landsat 7 ETM+ false color composite 7(R)-5(G)-4(B) (location: Fig. 6 zone 1). (b) Dune gullies at the foot of the Aravalli (location: Fig. 6 zone 2). (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

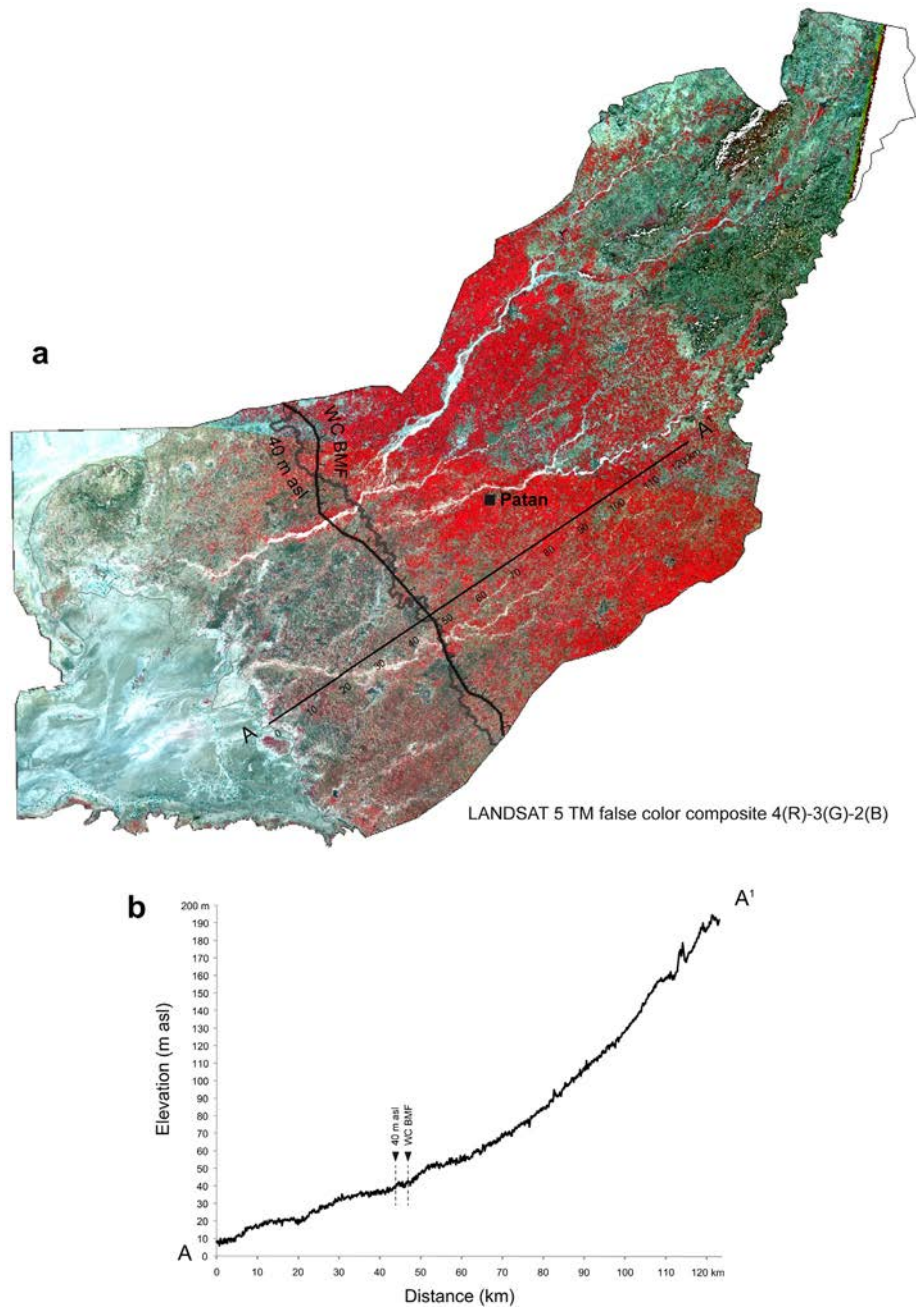


Fig. 4. Mosaic of two Landsat 5 TM (Table 1) false color composite 4(R)-3(G)-2(B) of study area. (a) Silt to Dune–Interdune Belts transition (thin solid line 40 m asl) and positioning of the WC BMF (Maurya et al., 1995, p. 611; Srivastava et al., 2001, p. 218; Rangarajan, 2008, p. 6). (b) Cross profile along the main slope gradient (A–A') within the study area. Note flattening and gradient change in correspondence with the 40 m asl contour line and WB BMF. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

3 Two archaeological scatters are found within the West Banas Alluvial Fan Deposits. The scarcity of incidences within this landform is in contrast with the archaeological density recorded in the surrounding Dune–Interdune Belt (Fig. 5).

5. Discussion

Understanding of the significance of archaeological distribution patterns observed at the locality level within N Gujarat depends on appreciation of their preservation and visibility relative to

physiographical units and morphogenic processes at the regional scale. In these terms, one of the main observed inconsistencies was the stark contrast between the high concentration of archaeological scatters within the Dune–Interdune Belt and their virtual absence within the lower Silt Belt.

5.1. Physiographical traits

The Silt to Dune–Interdune Belts boundary is consistent with a flattening in slope gradient observed along the 40 m asl contour line and with the positioning of the West Cambay Basin Margin

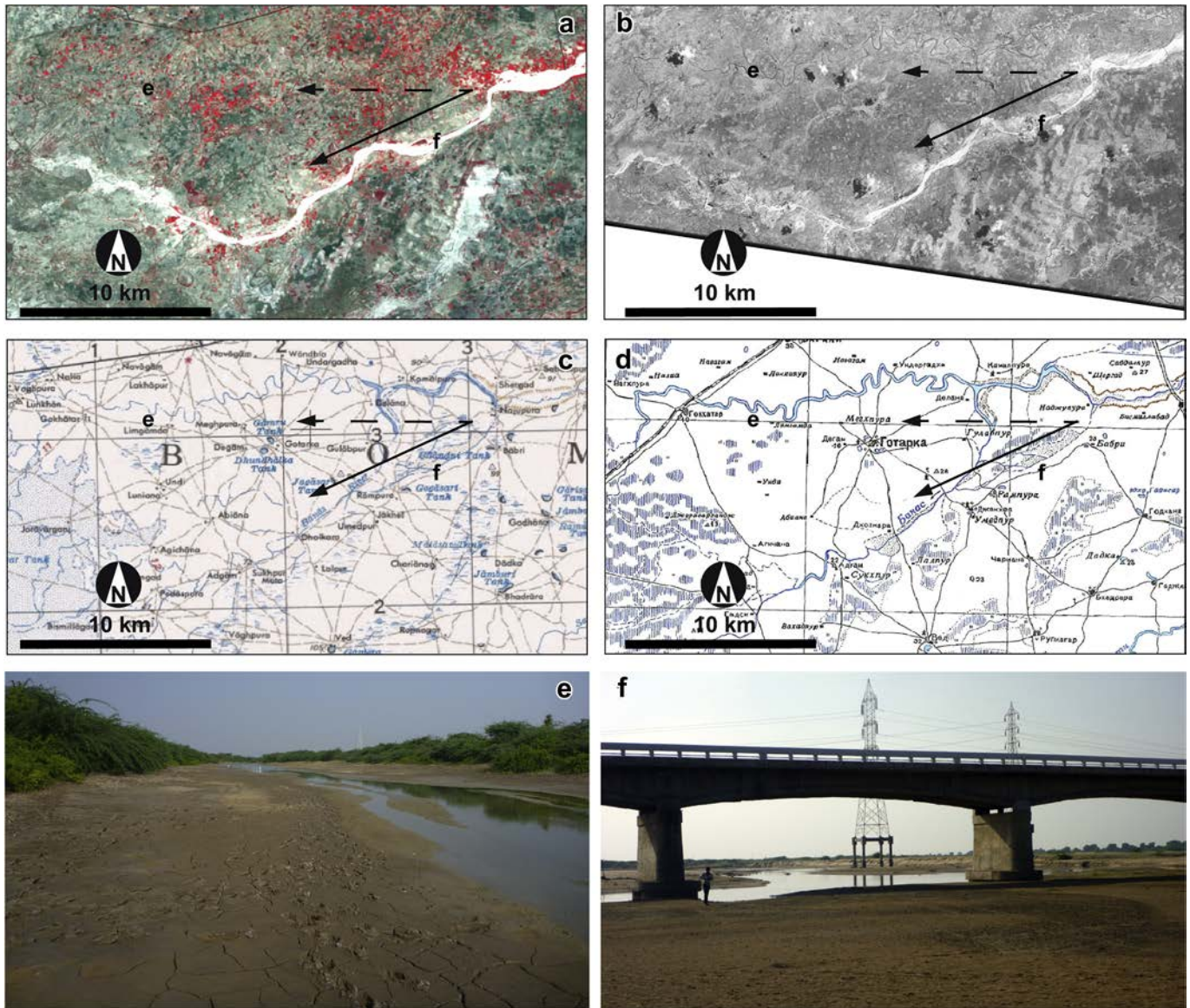


Fig. 5. Detail from West Banas Alluvial Fan Deposits showing the presence of palaeochannels radiating from the main course of the West Banas at the apex of the fan: (a) Landsat 5 TM (2000), (b) CORONA (1972), (c) American cartography (1955, <http://www.lib.utexas.edu/maps/ams/india/>), (d) Russian cartography (1955, pohali.org). Solid arrow indicates direction of present day braided main rivercourse, dashed arrow indicates direction of meandering palaeochannel (location: Fig. 6 zone 3). (e) View of palaeochannel and (f) View of main West Banas rivercourse from the river thalweg in low water conditions. Note exposition of foundation pillars for high voltage line posts as scale for river water transport during rain season. Photographs e and f were taken looking upstream. Geographical position of photographs e and f are indicated in images a–d.

Fault (WC BMF) (Fig. 4) (Maurya et al., 1995, p. 611; Srivastava et al., 2001, p. 218; Rangarajan, 2008, p. 6). The Cambay Rift is contained approximately within the Silt Belt physiographic unit, defined by the WC BMF to the SW and the EC BMF to the NW, i.e. the stretch of land found between the Dune–Interdune area and the Aravalli Hills. Underground water reservoirs in the Cambay Rift seem richer than those found in the Dune–Interdune area, possibly due to the local subsiding tectonics. These physiographical traits have probably contributed to an earlier stabilization of dunes within the Silt Belt compared to the Dune–Interdune Belt (Juyal et al., 2003, 2006). The Silt Belt produces a much higher reflection of the infrared band than the Dune–Interdune Belt when false color composites are used. The higher infrared reflectance of the lower Silt Belt is most likely the result of more densely cultivated fields that take advantage of the wetter soils of this area. The difference in soil moisture between the Silt and Dune–Interdune Belts is likely to

be representative of past vegetation (and pedological) conditions. More luxuriant vegetation in the Silt Belt is observed in historical panchromatic CORONA images (1960–70s), taken before the generalized introduction of mechanized agriculture and the construction of the Narmada Canal network starting from the 1980s (http://www.nri.gujarat.gov.in/NMC_more.htm). The lowering of the water table and consequent salinisation of interdunal soils within the Dune–Interdune area propped the building the Narmada Canal (Ranade and Kumar, 2004; Bhan, 2011). Throughout the Holocene, the Silt Belt was probably characterized by more developed and moisturized soils than the Dune–Interdune area, supporting a savanna-like environment. Some relicts of this type of vegetation are to be seen today in pockets of arboreal stands at the foot of the Aravalli Hills, where the steeper slope limits the possibility of agricultural exploitation. The lower Silt Belt is presently characterized by homogeneous finer sediments (silt) and supports

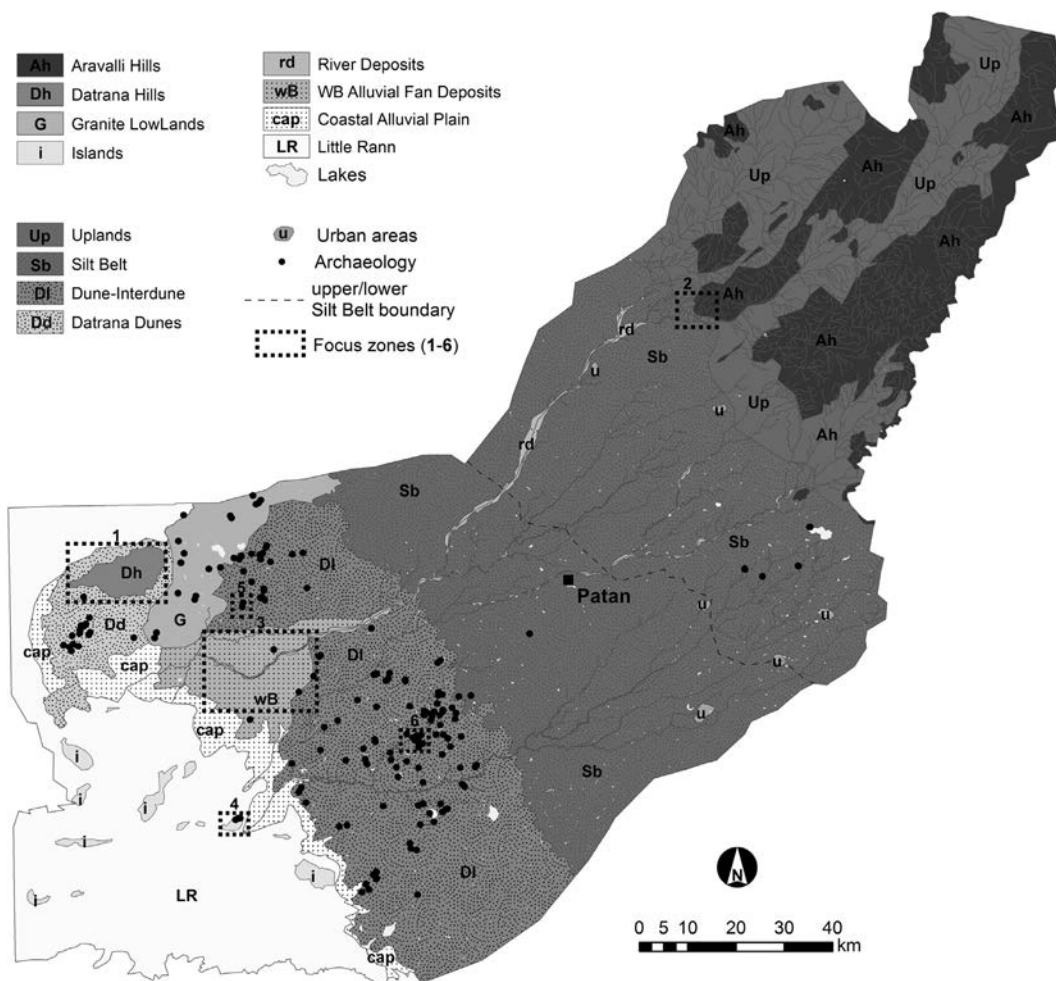


Fig. 6. Main physiographical units with positioning of archaeological scatters. Zones refer to focus areas presented in the main text and in other figures.

more intensive agriculture than does the nearby Dune–Interdune area. Topography in the lower Silt Belt is generally flatter (i.e. dunes appear lower and flatter) than in the Dune–Interdune Belt and upper Silt Belt.

High-reflectance is observed in a number of units within the study area: barren dunes of the Dune–Interdune Belt, river deposits (including those of the West Banas Alluvial Fan Deposits) and the Little Rann (in remote imagery from the dry season). This similarity seems to be the result of a combination of factors including sparse vegetation, sand-dominated sediment and the concentration of salts on the ground surface. This homogeneity in remote imagery reflects in part the genesis and depositional history of the sediments that compose those units. Sediments eroded from palaeodunes of the Silt and Dune–Interdune Belts are transported downwards within the river catchments and deposited along the watercourses and ultimately within the Rann (Figs. 4 and 6).

5.2. Implications for archaeological scatter positioning, preservation and visibility

Concerning archaeological evidence, virtually the entirety of the archaeological scatters has been found on high (non-floodable) areas (dunes and islands). Systematic survey in the upper Silt Belt confirms this pattern, and has produced a number of new archaeological scatters on dune-tops, e.g. Akhaj (Juyal et al., 2003), Langhnaj (Allchin et al., 1978), and sites in Fig. 6. Archaeologically,

the lower Silt Belt seems to represent a sort of empty corridor between the Dune–Interdune zone to the SW and the upper Silt Belt to the NE, a counter tendency within the general regional patterns of archaeological scatter distribution. However, the recent discovery of an extended archaeological scatter within this area is a warning on the risks of taking the absence of archaeological remains at face value and inferring low occupation densities during prehistoric times. The concurrence of flattened slope gradient, flatter topography and wetter soils along the SW margin of the Cambay Rift suggests recent tectonic activity may be partly responsible for the masking of archaeological evidence in this portion of the study area. The only archaeological evidence within the lower Silt Belt was found embedded in the profile of a shallow irrigation channel (30 cm deep) dug on the side of a large flat dune. It is possible that occupants of the lower Silt Belt took advantage of an earlier stabilization of dunes in this area, where higher soil moisture and richer underground water reservoirs would have contributed to an earlier development of well-drained deep soils. On the other hand, the very presence of such fertile soils eventually led to the more intense agriculture characterizing this area compared to the Dune–Interdune Belt, contributing to low archaeological visibility and preservation. Apart from producing a dense vegetation cover, intense agriculture in this part of India coincides with the recent introduction of mechanized means and channel irrigation, all elements that contribute greatly to the obliteration of the archaeological record.



Fig. 7. Examples of locality scale archaeological scatter distribution. (a) Hunter–gatherer–fisher site Vachadada Bet on seasonal island within the Little Rann (Fig. 6 zone 4), (b) Hunter–gatherer and agro-pastoral sites on tall dunes preserved on the N edge of the West Banas Alluvial Fan Deposits (Fig. 6 zone 5), (c) Hunter–gatherer dune scatters organized around a large interdunal depression along the S margin of the Silt to Dune–Interdune Belts transition line (Fig. 6 zone 6). Images b and c are not zenithal.

All archaeological scatters within the Dune–Interdune Belt are found on dunes (Figs. 6 and 7b, c). This might be explained as the result of low visibility in interdunal areas due to sediment accumulation following dune stabilization in the mid and late Holocene (Chawla et al., 1992; Juyal et al., 2003; Saini and Mujtaba, 2012). However, no sites have been observed so far embedded within interdunal and fluvial deposits explored by the authors and in previous studies (Brown, 1997; Tandon et al., 1997). Interdunal settlements in floodable areas may have been ephemeral, with short times of dwelling resulting in weak anthropogenic markers that are difficult, if not impossible, to detect. Whichever the case, the observed pattern is likely to reflect a general preference for settlement on high non-floodable areas, a reasonable assumption in a region characterized by strong seasonal precipitation.

Archaeological scatters are numerous and homogeneously spread across the Dune–Interdune Belt, but almost absent within the West Banas Alluvial Fan Deposits. Only two Harappan settlements have been found here (both younger than 4.5 ka BP). The lack of older archaeological scatters within the West Banas Alluvial Fan Deposits is most likely due to active aggradation and burial processes. Frequent river cuttings and avulsions may also have played a role in the obliteration of the archaeological record in this area (Fig. 5). The West Banas has the most extended catchment area within the study region, and the highest load, resulting on the high dynamicity characterizing this watercourse until recent times. The

seasonal concentration of precipitations and the high precipitation variance between the dry and the wet seasons make this part of India one of the areas more exposed to floods within the sub-continent (Fig. 1a) (Attri and Tyagi, 2010). This is expressed in the dramatic shifts of the West Banas riverbed (implying accumulation of river fan deposits, river avulsion, palaeochannel formation, burial and erosion of archaeological evidence). The finding of two Harappan sites within the West Banas Alluvial Fan Deposits, combined with satellite and historical maps, suggests that fan accretion may have been more intense previous to 4.5 ka, although sustained to the present day. Frequent river avulsions would have sustained high biodiversity due to the seasonal water recharge, soil enrichment (through river flood deposit accumulation) and long-term persistence of wet areas. With the nearby Rann, this area represents today a preferential zone for migrating birds and game (Ishnava et al., 2011), an occurrence that might have made it attractive to past inhabitants of the region.

5.3. Ongoing and further work

Further research is needed to make extrapolations based on the significant but scarce evidence offered by the single archaeological scatter so far discovered in the lower Silt Belt. Ongoing work in these terms includes the georeferencing of CORONA satellite images covering the study area (Casana and Cothren, 2008). Being

some of the earliest available remote imagery (1960s), CORONA will allow assessment of the state of the lower Silt Belt (and its relationship with other physiographic unit) prior to the introduction of intensive agriculture and the construction of large irrigation channels (1990s onwards). The same images will be employed in support of local reconstructions of the environment surrounding clusters of the most significant archaeological scatters. Historical physiographical data will be integrated with information retrieved from on-going work including:

- (a) The description, analysis and dating of Holocene aeolian, interdunal and fluvio-lacustrine sediment architectures via Ground Penetration Radar (GPR) mapping, sediment logging and OSL dating.
- (b) The production of high-resolution DEMs using DGPS mapping,
- (c) Optically Stimulated Luminescence (OSL) and Accelerated Mass Spectrometry (AMS) dating of excavated archaeological sites.
- (d) The systematic study of wild and domestic plant and animal resources exploited by local groups in the past.

Current work in this sense takes into account settlement preferences observed at the regional scale. The cluster of hunter–gatherer archaeological scatters on dunes near Vaharvo Timbo constitutes one of the current focus areas where information from archaeological excavation and sediment logging of the surrounding interdunal depressions are combined (Figs. 6 and 7c). Future work is planned on Tertiary and Quaternary outcrop islands of the Little Rann (Maurya et al., 2009). Here, the recent discovery of the hunter–gatherer settlement of Vachadada Bet stimulates research in previously unexplored settings. The site is found in proximity of a year-round natural spring within the Rann (Figs. 6 and 7a) and shows abundant accumulations of otoliths and microlithic artefacts, confirming the existence of subsistence strategies based on fishing. Research is also being conducted within the Aravalli and Datrana Hills where the absence of archaeological scatters is possibly mainly due to the lack of systematic research. On-going work in these two areas concerns in particular the characterization and provenance of lithic raw materials.

The standardization of archaeological evidence integrated in the present work is based on the presence/absence of specific artefacts, biotic and abiotic remains (Misra, 1973; Patel, 2009). On these bases, archaeological assemblages are assigned to three groups representing different subsistence systems. These groups will be investigated in future work focusing on site distribution patterns at locality scale.

- (1) Hunter–gatherer groups, fully dependent on hunting and foraging.
- (2) Agro-pastoral groups, dependent on the synchronization of pastoral and agricultural activities, although hunting and gathering may have been part of their economic strategy.
- (3) Urban groups, defined mainly by their association with Urban Phase Harappan agglomerations and trade.

Interdunal sedimentary sequences from the Dune–Interdune and Silt Belt zones are currently under study. Preliminary OSL estimates indicate that the upper portion of these sequences covers the mid and late Holocene, providing a promising prospect for correlation with the local archaeological record, which spans over the same period. Environmental and climatic variations in the mid and late Holocene at the local scale have not been as important as those observed for the Pleistocene/Holocene transition. The dominant landscape processes over the past 7 ka (previous to the introduction of mechanical water pumps) seem to have been the following: (1) progressive stabilization of dunes, (2) slow infilling of

interdunal areas (estimated as an average of ~2 m since dune stabilization, although this study is ongoing), (3) progressive siltation of interdunal shallow lakes. A better definition of this mid and late Holocene climatic trend, especially concerning point 3 above, is needed to define socio-ecological strategies in their environmental context. To do so, previous studies have focused on aeolian deposits, providing a good overview of the dune stabilization process and progressive desert retirement (Chawla et al., 1992; Juyal et al., 2003; Saini and Mujtaba, 2012). The proposed focus on interdunal deposits should provide new sets of proxies to complement information previously retrieved from aeolian sequences.

The present work sets the bases to look critically at Holocene settlement patterns observed at the regional scale in the ecotones of N Gujarat. It also provides a geoarchaeological framework based on the integrated use of satellite imagery, field exploration and archaeological data systematization for the study of hunter–gatherer and agro-pastoral groups in arid margins, that takes into account possible biases due to past and current regional physiographical mechanisms. The development of further research at the local level, framed within the preliminary regional assessment provided here, is now necessary to infer on socio-ecological behavior among different groups in arid regions (Le Houerou, 2002; Morales et al., 2009; McAllister et al., 2011).

6. Conclusions

The significance of the archaeological evidence in N Gujarat may now be critically addressed from a multi-scalar perspective (regional to locality), on the bases of physiographical observations made at different levels. These provide information on archaeological preservation and visibility in support of interpretations regarding site distribution patterns. The integration of novel information from remote imagery and field exploration allows preliminary hypotheses on environmental conditions, hinge zones between different environmental realities and past human–environment interaction:

- (a) Settlements within the study area are found on high non-floodable areas (dune tops and seasonal islands) independently of the local physiography.
- (b) The earlier stabilization of dunes in the lower Silt Belt (possibly triggered by the Cambay Rift subduction), with the recent introduction of mechanized agriculture and intensive irrigation, seems to be a limiting factor for surface archaeological visibility.
- (c) Depositional and erosional processes within the West Banas Alluvial Fan Deposits limit visibility of archaeological evidence prior to 4.5 ka BP.
- (d) Archaeological scatters found on seasonal islands of the Little Rann attest to the existence of groups whose subsistence was at least partially based on fishing.

Without being exhaustive, this work aims at proposing a first example of environmentally informed reconstructions of human–environment interaction for past socio-ecological systems within the study area. Settlement patterns can now be discussed with more confidence, including not only the evaluation of possible research biases but also the effects of recent morphogenic processes on site preservation. The on-going characterization of surface and excavated archaeological finds and sediment architectures in collaboration with local and international partners will refine in the near future reconstructions of the evolution of different socio-ecological systems in the region. Sedimentary deposits have been sampled and are under study within and

outside archaeological contexts, on dunes as well as interdunal sequences. This systematic approach is a contribution to setting the bases for developing a robust framework for the study of past socio-ecological systems in arid margins, a necessary effort to evaluate past, present and future feasibility for human life in areas characterized by scarce, seasonally concentrated and patchy resources.

Acknowledgments

This research arises from collaboration between the MS University of Baroda and the IMF-CSIC (Spanish National Research Council) within the framework of the North Gujarat Archaeological Project (NoGAP) and SimulPast Project. We wish to thank our colleagues at the Institute of Seismological Research (Gandhinagar, India) and at the Sedimentology Laboratory of the University of Barcelona (Spain) for their contribution to ongoing work. This research was funded by the Spanish Ministry of Science and Innovation (MICINN: I+D HAR2010-16052 and CONSOLIDER-Ingenio 2010-00034), the Spanish Ministry of Culture (Excavaciones Arqueológicas al Exterior) and the MS University of Baroda (India). AB was funded via JAEDoc program and FC by JAEPredoc program (Spanish National Research Council and European Social Found), BR was funded by MICINN (SB2009-060). CL is a member of AGRIVESTMED Project. Archaeological data derive from research carried out at Maharaja Sayajirao University of Baroda (MSBU Baroda), the Research Institute for Humanity and Nature (RIHN Kyoto) and the Institució Milà i Fontanals (IMF-CSIC Barcelona). Access to Landsat, ASTER images and DEMs was granted by NASA-USGS servers (Land Processes Distributed Active Archive Center – LP DAAC – United States Geological Survey – USGS – Earth Resources Observation and Science Center - EROS) (lpdaac.usgs.gov). Access to GoogleEarthPro was granted via the GoogleEarth Outreach Program (earth.google.com/outreach).

References

Agrawal, D.P., Pande, B.M. (Eds.), 1977. *Ecology and Archaeology of West India*. Concept Publishers, New Delhi.

Anderson, D.M., Baulcomb, C., Duvivier, A.K., Gupta, A.K., 2010. Indian summer monsoon during the last two millennia. *Journal of Quaternary Science* 25 (6), 911–917.

Ajithprasad, P., 2004. Holocene adaptations of the Mesolithic and Chalcolithic settlements in North Gujarat. In: Yasuda, Y., Shinde, V. (Eds.), *Monsoon and Civilizations*. Roli Books Pvt. Ltd., New Delhi, pp. 115–132.

Ajithprasad, P., 2011. Chalcolithic cultural patterns and the early Harappan interaction in Gujarat. In: Toshiki, O., Witzel, M. (Eds.), *Cultural Relations between the Indus and the Iranian Plateau during the Third Millennium BCE*. Indus Project, Research Institute for Humanities and Nature, June 7–8, 2008. Harvard Oriental Series. Opera Minora, vol. 7. 11–40 Department of South Asian Studies. Harvard University, Columbia, MO.

Ajithprasad, P., Sonawane, V.H., 2011. The Harappa Culture in North Gujarat: a regional paradigm. In: Osada, T., Endo, H. (Eds.), *Linguistics, Archaeology and the Human Past*. Occasional Paper 12. Indus Project. Research Institute for Humanity and Nature, Kyoto, pp. 223–269.

Allchin, B., Goudie, A., 1971. Dunes, aridity and early man in Gujarat, Western India. *Man* 6 (2), 248–265.

Allchin, B., Goudie, A., Hedge, K., 1978. *The Prehistory and Palaeogeography of the Great Indian Desert*. Academic Press, London.

Altaweel, M., 2005. The use of ASTER satellite imagery in archaeological contexts. *Archaeological Prospection* 16, 151–166.

Attri, S.D., Tyagi, A., 2010. Climate Profile of India. In: *Contribution to the Indian Network of Climate Change Assessment*. Environment Monitoring and Research. Centre Indian Meteorological Department, New Delhi.

Bagla, P., 6 July 2011. India loosens policy on Sharing Remote Sensing Imagery. *Science Insider*.

Bhan, K.K., 2011. Pastoralism in Late Harappan Gujarat, western India: an ethno-archaeological approach. In: Osada, T., Uesugi, A. (Eds.), *Linguistics, Archaeology and the Human Past*. Occasional Paper 10. Indus Project. Research Institute For Humanity And Nature, Kyoto, pp. 1–26.

Balbo, A.L., Persson, P., Roberts, S.J., 2010. Changes in settlement patterns on the River Rena, southeast Norway: a response to Holocene climate change? *The Holocene* 20 (6), 917–929.

Barton, C.M., Ullah, I.I., Bergin, S., 2010. Land use, water and Mediterranean landscapes: modelling long-term dynamics of complex socio-ecological systems.

Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical & Engineering Sciences 368, 5275–5297.

Bauer, A., Nicoll, K., Park, L., Matney, T., 2004. Archaeological site distribution by geomorphic setting in the southern lower Cuyahoga River Valley, northeastern Ohio: initial observations from a GIS database. *Geoarchaeology* 19 (8), 711–729.

Beck, A.R., Philip, G., Abdulkarim, M., Donoghue, D., 2007. Evaluation of Corona and Ikonos high resolution satellite imagery for archaeological prospection in western Syria. *Antiquity* 81 (311), 161–175.

Bolch, T., Kamp, U., Olsenholler, J., 2005. Using ASTER and SRTM DEMs for studying geomorphology and glaciation in high mountain areas. In: Oluic (Ed.), *New Strategies for European Remote Sensing*. Millpress, Rotterdam, pp. 119–128.

Brown, A.G., 1997. *Alluvial Geoarchaeology*. In: *Floodplain Archaeology and Environmental Change*. Cambridge University Press, Cambridge.

Bubenzer, O., Reimer, H., 2007. Holocene climatic change and human settlement between the central Sahara and the Nile Valley: archaeological and geomorphological results. *Geoarchaeology* 22 (6), 607–620.

Butzer, K.W., 1982. *Archaeology as Human Ecology: Method and Theory for a Contextual Approach*. Cambridge University Press, Cambridge.

Casana, J., Cothren, J., 2008. Stereo analysis, DEM extraction and orthorectification of CORONA satellite imagery: archaeological applications from the Near East. *Antiquity* 82 (317), 732–749.

Challis, K., Howard, A.J., 2006. A review of trends within archaeological remote sensing in alluvial environments. *Archaeological Prospection* 240 (13), 231–240.

Chamyal, L.S., Maurya, D.M., Raj, R., 2003. Fluvial systems of the drylands of western India: a synthesis of Late Quaternary environmental and tectonic changes. *Quaternary International* 104, 69–86.

Chawla, S., Dhir, R., Singhvi, A., 1992. Thermoluminescence chronology of sand profiles in the Thar Desert and their implications. *Quaternary Science Reviews* 11, 25–32.

De Laet, V., Paulissen, E., Waelkens, M., 2007. Methods for the extraction of archaeological features from very high-resolution Ikonos-2 remote sensing imagery, Hisar (southwest Turkey). *Journal of Archaeological Science* 34, 830–841.

Deroin, J.-P., Téreygeol, F., Heckes, J., 2011. Evaluation of very high to medium resolution multispectral satellite imagery for geoarchaeology in arid regions – case study from Jabali, Yemen. *Journal of Archaeological Science* 38, 101–114.

Dincauze, D.F., 2000. *Environmental Archaeology*. In: *Principles and Practice*. Cambridge University Press, Cambridge.

Di Giacomo, G., Ditaranto, I., Scardozzi, G., 2011. Cartography of the archaeological surveys taken from an Ikonos stereo-pair: a case study of the territory of Hierapolis in Phrygia (Turkey). *Journal of Archaeological Science* 38, 2051–2060.

Fitzsimmons, K., 2007. Morphological variability in the linear dune fields of the Strzelecki and Tirari Deserts, Australia. *Geomorphology* 91 (1–2), 146–160.

Fowler, M.J.F., Fowler, Y.M., 2005. Detection of archaeological crop marks on declassified CORONA KH-4B intelligence satellite photography of Southern England. *Archaeological Prospection* 12 (4), 257–264.

Friedl, M., Brodley, C., 1997. Decision tree classification of land cover from remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment* 61 (3), 399–409.

Goldberg, P., Macphail, R.I., 2006. *Practical and Theoretical Geoarchaeology*. Blackwell, Oxford.

Goudie, A.S., Allchin, B., Hegde, K.T.M., 1973. The former extension of the Great Indian Sand desert. *The Geographical Journal* 139 (2), 243–257.

Grøn, O., Palmér, S., Stylegar, F.-A., Esbensen, K., Kucheryawski, S., Aase, S., 2011. Interpretation of archaeological small-scale features in spectral images. *Journal of Archaeological Science* 38 (9), 2024–2030.

Gutierrez, M., 2005. *Climatic Geomorphology*. Elsevier, Amsterdam.

Ishnava, K., Ramarao, V., Mohan, J., Kothari, I.L., 2011. Ecologically important and life supporting plants of little Rann of Kachchh, Gujarat. *Journal of Ecology* 3, 33–38.

Juyal, N., Kar, A., Rajaguru, S., Singhvi, A.K., 2003. Luminescence chronology of aeolian deposition during the Late Quaternary on the southern margin of Thar Desert, India. *Quaternary International* 104, 87–98.

Juyal, N., Chamyal, L., Bhandari, S., Bhushan, R., Singhvi, A.K., 2006. Continental record of the southwest monsoon during the last 130 ka: evidence from the southern margin of the Thar Desert, India. *Quaternary Science Reviews* 25 (19–20), 2632–2650.

Kale, V., Singhvi, A.K., Moshra, P., Banerjee, B., 2000. Sedimentary records and luminescence chronology of Late Holocene palaeofloods in the Luni River, Thar Desert, northwest India. *Catena* 40 (4), 337–358.

Kar, A., 1993. Neotectonic influences on morphological variations along the coastline of Kachchh, India. *Geomorphology* 8 (2–3), 199–219.

Lasaponara, R., Masini, N., 2011. Satellite remote sensing in archaeology: past, present and future perspectives. *Journal of Archaeological Science* 38 (9), 1995–2002.

Le Houverou, H.N., 2002. Man-made deserts: desertization. *Arid Land Research and Management* 16, 1–36.

Lillesand, T.M., Kiefer, R.W., Chipman, J.W., 2008. *Remote Sensing and Image Interpretation*. Wiley and Sons, New York.

Liu, J.G., Mason, P.J., 2009. *Essential Image Processing and GIS for Remote Sensing*. Wiley-Blackwell, Chichester.

Liu, Z., Otto-Bliesner, B., Kutzbach, J., Li, L., Shields, C., 2003. Coupled climate simulation of the evolution of global monsoons in the Holocene. *Journal of Climate* 16 (15), 2472–2490.

- Madella, M., Fuller, D.Q., 2006. Palaeoecology and the Harappan Civilisation of South Asia: a reconsideration. *Quaternary Science Reviews* 25, 1283–1301.
- Madella, M., Ajithprasad, P., Lancelotti, C., Rondelli, B., Balbo, A., French, C., Rodríguez, D., García-Granero, J.J., Yannitto, V., Rajesh, S.V., Gadekar, C.S., Briz, I., 2010. Social and environmental transitions in arid zones: the North Gujarat Archaeological Project—NoGAP. *Antiquity: Project Gallery* 84 (325).
- Maurya, D.M., Chamyal, L.S., Merh, S.S., 1995. Tectonic evolution of the Central Gujarat plain, western India. *Current Science* 69 (7), 610–613.
- Maurya, D.M., Thakkar, M.G., Khonde, N., Chamyal, L.S., 2009. Geomorphology of the Little Rann of Kachchh, W. India: Implication for basin architecture and Holocene palaeo-oceanographic conditions. *Zeitschrift für Geomorphologie* 53 (1), 69–80.
- McAllister, R.R.J., Holcombe, S., Davies, J., Cleary, J., Boyle, A., Tremblay, P., Stafford Smith, D.M., Rockstroh, D., LaFlamme, M., Young, M., 2011. Desert networks: a conceptual model for the impact of scarce, variable and patchy resources. *Journal of Arid Environments* 75 (2), 164–173.
- Merh, S.S., Chamyal, L.S., 1997. The Quaternary geology of Gujarat alluvial plains. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences* 63 (A 1), 1–98.
- Misra, V.N., 1973. Bagor, a late Mesolithic settlement in north-west India. *World Archaeology* 5 (1), 92–110.
- Morales, M., Barberena, R., Belardi, J.B., Borrero, L., Cortegoso, V., Durán, V., Guerci, A., Goñi, R., Gil, A., Neme, G., 2009. Reviewing human–environment interactions in arid regions of southern South America during the past 3000 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281 (3–4), 283–295.
- Parcak, S.H., 2009. *Satellite Remote Sensing for Archaeology*. Routledge, London.
- Patel, A.K., 2009. Occupational histories, settlements and subsistence in Western India: what bones and genes can tell us about the origins and spread of pastoralism. *Anthropozoologica* 44 (1), 173–188.
- Prasad, S., Enzel, Y., 2006. Holocene paleoclimates of India. *Quaternary Research* 66 (3), 442–453.
- Prasad, S., Pandarinath, K., Gupta, S.K., 1998. Geomorphology, tectonism and sedimentation in the Nal region, western India. *Geomorphology* 25, 207–223.
- Prasad, V., Phartiyal, B., Sharma, A., 2007. Evidence of enhanced winter precipitation and the prevalence of a cool and dry climate during the mid to late Holocene in mainland Gujarat, India. *The Holocene* 17 (7), 889–896.
- Rajani, M.B., Rajawat, A.S., 2011. Potential of satellite based sensors for studying distribution of archaeological sites along palaeo channels: Harappan sites a case study. *Journal of Archaeological Science* 38 (9), 2010–2016.
- Ranade, R., Kumar, M.D., 2004. Narmada water for groundwater recharge in North Gujarat. *Conjunctive management in large irrigation projects. Economic and Political Weekly*, 3510–3513.
- Rangarajan, S., 2008. Evidence of igneous diapirism in the northern part of Narmada Block, Cambay Basin, India. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter* 47, 5–11.
- Robinson, A.H., Morrison, J.L., Muehrcke, P.C., Imerling, A.J., Guptil, S.C., 1995. *Elements of Cartography*. John Wiley and Sons, London.
- Rogan, J., Miller, J., Stow, D., Franklin, J., 2003. Land-cover change monitoring with classification trees using Landsat TM and ancillary data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 69 (7), 793–804.
- Saini, H.S., Mujtaba, S.A.I., 2012. Depositional history and palaeoclimatic variations at the northeastern fringe of Thar Desert, Haryana Plains, India. *Quaternary International* 250, 37–48.
- Seth, H., Patel, L.C., Varhat, B., 2007. Harappan sites in Gujarat. In: Toshiki, O. (Ed.), *Linguistics, Archaeology and the Human Past. Occasional Paper 2. Indus Project. Research Institute for Humanity and Nature, Kyoto*, pp. 77–110.
- Siart, C., Eitel, B., Panagiotopoulos, D., 2008. Investigation of past archaeological landscapes using remote sensing and GIS: a multi-method case study from Mount Ida, Crete. *Journal of Archaeological Science* 35, 2918–2926.
- Siart, C., Bubenzer, O., Eitel, B., 2009. Combining digital elevation data (SRTM/ASTER), high resolution satellite imagery (Quickbird) and GIS for geomorphological mapping: a multi-component case study on Mediterranean karst in Central Crete. *Geomorphology* 112, 106–121.
- Singh, N., Ranade, A., May–June 2010. *Global Temperature and Indian Monsoon*. In: *Geography and You*, pp. 41–43.
- Singh, R.N., Petrie, C.A., Pawar, V., Pandey, A.K., Neogi, S., Singh, M., Singh, A.K., Parikh, D., Lancelotti, C., 2010. Changing patterns of settlement in the rise and fall of Harappan urbanism and beyond: a preliminary report on the Rakhigarhi Hinterland Survey 2009. *Man and Environment* 37 (1), 37–53.
- Singh, R.N., Petrie, C.A., French, C.A.I., Goudie, A.S., Gupta, S., Tewari, R., Singh, A.K., Sinha, R., Srivastava, R., Yadav, S., Singh, V.K., 2008. Settlements in context: reconnaissance in Western Uttar Pradesh and Haryana. *Man and Environment* 33 (2), 71–87.
- Singh, V., Prasad, V., Chakraborty, S., 2007. Phytoliths as indicators of monsoonal variability during mid-late Holocene in mainland Gujarat, western India. *Current Science* 92 (12), 8–13.
- Singhvi, A.K., Williams, M.A.J., Rajaguru, S.N., Misra, V.N., Chawla, S., Stokes, S., Chauhan, N., Francis, T., Ganjoo, R.K., Humphreys, G.S., 2010. A ~200 ka record of climatic change and dune activity in the Thar Desert, India. *Quaternary Science Reviews* 29, 3095–3105.
- Smith, M.J., Pain, C.F., 2009. Applications of remote sensing in geomorphology. *Progress in Physical Geography* 33 (4), 568–582.
- Srivastava, P., Juyal, N., Singhvi, A.K., Wasson, R.J., Bateman, M.D., 2001. Luminescence chronology of river adjustment and incision of Quaternary sediments in the alluvial plain of the Sabarmati River, north Gujarat, India. *Geomorphology* 36, 217–229.
- Stellmes, M., Udelhoven, T., Röder, A., Sonnenschein, R., Hill, J., 2010. Dryland observation at local and regional scale — Comparison of Landsat TM/ETM+ and NOAA AVHRR time series. *Remote Sensing of Environment* 114 (10), 2111–2125.
- Tandon, S., Sareen, B.K., Rao, M.S., Singhvi, A.K., 1997. Aggradation history and luminescence chronology of Late Quaternary semi-arid sequences of the Sabarmati basin, Gujarat, Western India. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 128, 339–357.
- Traviglia, A., Cottica, D., 2011. Remote sensing applications and archaeological research in the Northern Lagoon of Venice: the case of the lost settlement of Constanciacus. *Journal of Archaeological Science* 38 (9), 2040–2050.
- Wilkinson, K.N., Beck, A.R., Philip, G., 2006. Satellite imagery as a resource in the prospection for archaeological sites in central Syria. *Geoarchaeology* 21, 735–750.
- Wilkinson, T.J., French, C.A.I., Ur, J.A., Semple, M., 2010. The geoarchaeology of route systems in northern Syria. *Geoarchaeology* 25, 745–771.

6.2. Use of satellite SAR for understanding long-term human occupation dynamics in the monsoonal semi-arid plains of North Gujarat, India

Francesc C. CONESA, Núria DEVANTHÉRY, Andrea L. BALBO, Marco MADELLA i Oriol MONSERRAT

2014, *Remote Sensing*, 6:11420-11443, [DOI:10.3390/rs61111420](https://doi.org/10.3390/rs61111420)

Special Issue: *New Perspectives of Remote Sensing for Archaeology*, editat per Rosa LASAPONARA i

Nicola MASINI

Article

Use of Satellite SAR for Understanding Long-Term Human Occupation Dynamics in the Monsoonal Semi-Arid Plains of North Gujarat, India

Francesc C. Conesa ^{1,2,*}, Núria Devanthery ³, Andrea L. Balbo ^{1,2}, Marco Madella ^{1,2,4,5}
and Oriol Monserrat ³

¹ CaSEs-Complexity and Socio-Ecological Dynamics Research Group

² Spanish National Research Council (IMF-CSIC), c/ Egipcíacues, 15, Barcelona 08001, Catalonia, Spain; E-mail: balbo@imf.csic.es

³ Geomatics Division, Catalan Telecommunications Technology Centre (CTTC), Av. Carl Friedrich Gauss, 11, Parc Mediterrani de la Tecnologia, Castelldefels E-08860, Catalonia, Spain; E-mails: nuria.devanthery@cttc.cat (N.D.); oriol.monserrat@cttc.cat (O.M.)

⁴ Department of Humanities, Universitat Pompeu Fabra, C/ Ramon Trias Fargas, 25–27, Barcelona 08005, Catalonia, Spain; E-mail: marco.madella@icrea.cat

⁵ ICREA-Institució Catalana de Recerca i Estudis Avançats

* Author to whom correspondence should be addressed; E-mail: francesc.cecilia@imf.csic.es; Tel.: +39-442-65-76; Fax: +39-443-00-71.

External Editors: Rosa Lasaponara, Nicola Masini and Prasad S. Thenkabail

Received: 7 July 2014; in revised form: 17 October 2014 / Accepted: 20 October 2014 /

Published: 14 November 2014

Abstract: This work explores the spatial distribution of monsoonal flooded areas using ENVISAT C-band Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR) in the semi-arid region of N. Gujarat, India. The amplitude component of SAR Single Look Complex (SLC) images has been used to estimate the extent of surface and near-surface water dynamics using the mean amplitude (MA) of monsoonal (July to September) and post-monsoonal (October to January) seasons. The integration of SAR-derived maps (seasonal flooding maps and seasonal MA change) with archaeological data has provided new insights to understand present-day landscape dynamics affecting archaeological preservation and visibility. Furthermore, preliminary results suggest a good correlation between Mid-Holocene settlement patterns and the distribution and extension of seasonal floodable areas within river basin areas, opening interesting inroads to study

settlement distribution and resource availability in past socio-ecological systems in semi-arid areas.

Keywords: ENVISAT; SAR amplitude; Indian summer monsoon; archaeology; water areas; land use

1. Introduction

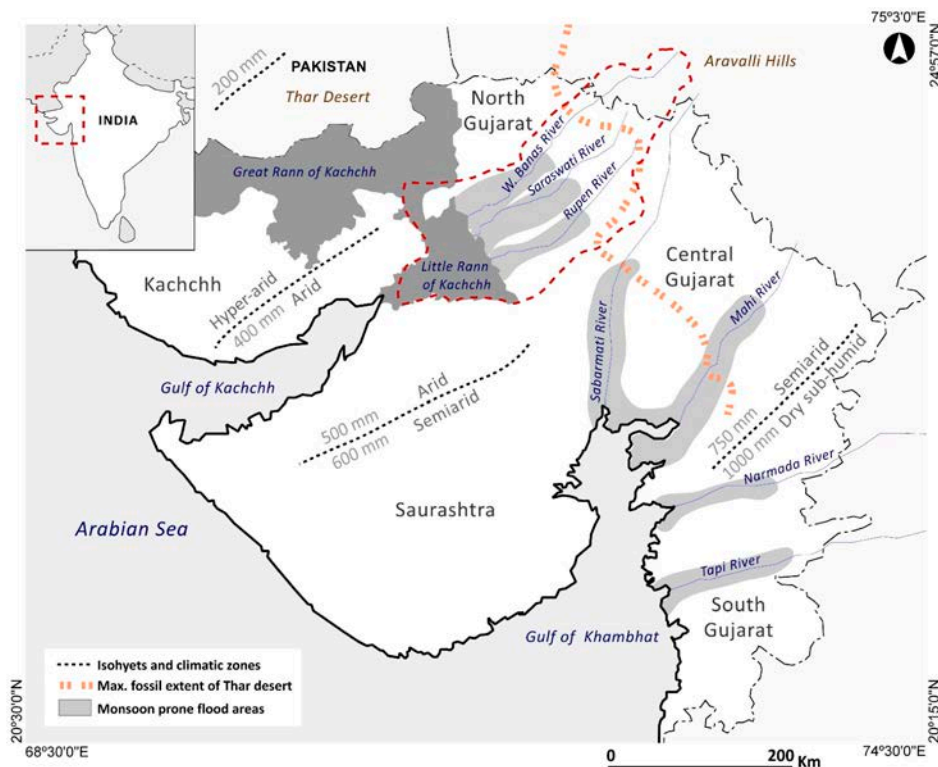
The understanding of past socio-ecological dynamics emerging in diverse ecological regions has been of particular importance for archaeologists working in South Asia [1–5]. Special attention has been given to regional and local-scale strategies to manage inundation and rain-fed cultivation, accounting for the diversity of landform and inter-annual rainfall variability in the Greater Indus Valley [6,7]. One of the driest regions of India, N. Gujarat is a well-studied peripheral area of the Indus Valley Civilization, being very sensitive to changes in the Indian Summer Monsoon (ISM) precipitation patterns. In these settings, even slight precipitation shifts can generate severe droughts or floods, thus affecting the availability of water and ultimately human adaptive capacity [8–10]. Throughout the Holocene this territory was characterized by desert retreat, the stabilization of dunes and the seasonal presence of water bodies. In this marginal and erratic monsoonal environment, the archaeological evidence suggests the presence of at least three major subsistence systems characterized by different degrees of resilience and adaptability: hunter-gatherers, agro-pastoralists and urban Harappan settlements [11–14]. More than 200 archaeological scatters have been recorded by surveys over the last 20 years [15]. Scatters consist mostly of patches of fragmentary artifacts (lithic, pottery and bone) found on the surface of relict features such as fossilized sand dunes and other non-floodable areas, such as outcrops and islands. To date, archaeological evidence suggests the occupation of these areas as seasonal sites that would take advantage of monsoonal water stored in interdune areas and rich grasslands located in saline or alluvial wastelands [16–18]. Within the framework of the N. Gujarat Archaeological Project (NoGAP, see [19] and [20] for a project overview) and the SimulPast project [21], the use of optical, historical and elevation Earth Observation (EO) data have been explored to support GIS-based landscape investigations [14,22] and modeling socio-ecological dynamics in semi-arid monsoonal environments [23]. Here we use ENVISAT ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) scenes and optical EO data to evaluate the potential of SAR to better understand the expression of the ISM rainfall in terms of seasonal flooding in the study area and to explore the relationship between seasonal water availability and past settlements patterns.

2. Study Area: Regional Settings and Modern Landscape Dynamics

N. Gujarat extends NE-SW from the foot of the Aravalli Hills to the coast of the Little Rann of Kachchh (LRK), a seasonally flooded marsh along the inner edge of the NW Indian continental platform, situated between the alluvial plains of N. Gujarat and the Kachchh peninsula (Figure 1). The LRK represents the uplifted floor of a former gulf inundated up to c. ~2 ka B.P [24]. To the west, the plains reach the current boundary of the Thar Desert, while the Sabarmati river catchment area and the

Nal Sarovar depression mark its eastern limits [9,25]. The study area integrates three main perennial river basin areas (the West Banas, Saraswati, Rupen and their tributary rivers) that follow the geological slope and drain into the LRK [8,26–28].

Figure 1. Location map of the NoGAP study area (thick dotted red line). Alluvial flood-prone areas are indicated as medium grey shading (after Attri and Tyagi [28], p. 104). Isohyet lines and climatic zones are from Juyal *et al.* [25] (p. 2633), and the maximum fossil extent of Thar Desert is after Singhvi *et al.* [29] (p. 3097).

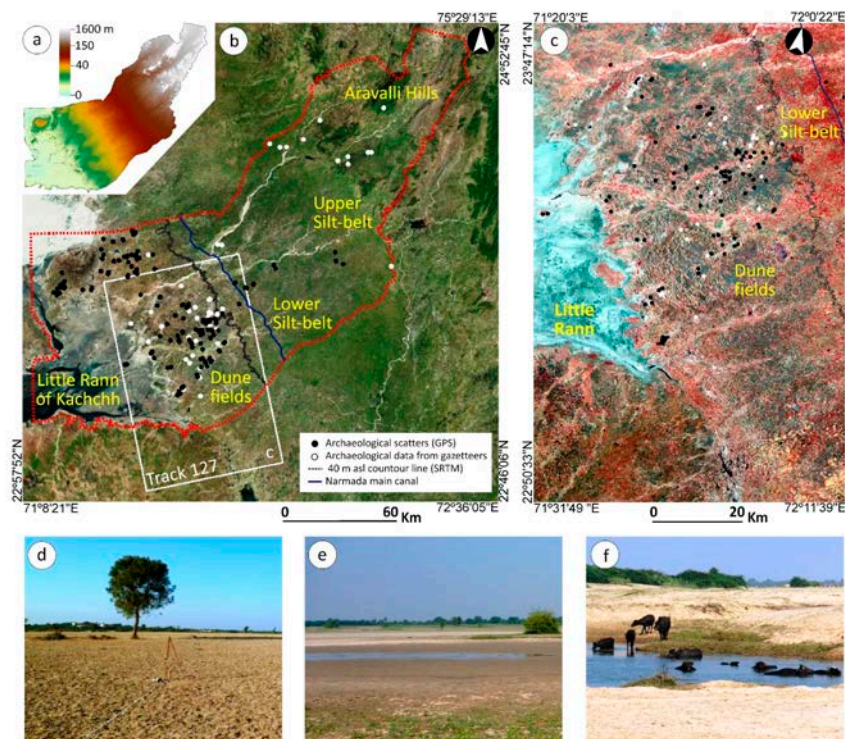


The landscape of N. Gujarat is characterized by the presence of relict sand dunes that were formed c. 26 ka BP [27]. Sedimentary deposits from the Mahi and Saraswati rivers in Gujarat show a progressive loss of fluvial influence c. 30 ka BP. This suggests that a drier climatic fluctuation affected the area and started deflation processes with Aeolian sediment deposition, thus expanding the active dune belt of the Thar Desert (Figure 1). This arid phase coincides globally with the Last Glacial Maximum (LGM), which fostered the expansion of semi-arid areas in the tropics [29,30]. The more humid Younger Dryas (YD) phase c. 12 ka BP restored the monsoon regime [26]. Precipitation anomalies in the ISM were low c. 12–10 ka BP, rising to maximum c. 8 ka BP and lowering until the retiring of the Thar Desert SW boundary to its present position c. 7ka BP, with the consequent stabilization of dunes c. 5 ka BP [31]. Palaeoclimatic records suggest monsoonal stability throughout the mid-Holocene, making this area more suitable for human occupation (see [23] and references therein). Current precipitation patterns indicate a low to moderate ISM characterized by highly erratic and asymmetrical rainfall with strong seasonal variability. The mean annual rainfall values follow a WE trend and vary from 400–800 mm (see isohyet lines in Figure 1). This high temporal and spatial

variability makes N. Gujarat a unique transitional ecosystem between the more humid Indian western coast and the hyper-arid Thar Desert.

The river pools, water tanks and more humid depressions formed patches of grasslands and thorn vegetation that supported considerable large numbers of cattle, goats, water buffaloes as well as wild herbivores and birds [32]. This traditional rain-fed landscape has been gradually transformed for more than four decades, during which the agricultural growth of the region was triggered by the explosion in subsided tube well irrigation, thus bringing more land under cultivation and allowing new rabi irrigated cash-crops and dry-summer crops [33]. Because of the low level of natural recharge of local aquifers, groundwater table has fallen steadily, and soil salinization has become a major problem. These often lead to migration from rural to urban areas [34]. To mitigate the effect of acute water shortages and water table depletion, the Narmada main canal (Nmc) of the Sardar Sarovar Project was recently built across the alluvial plains of N. Gujarat (Figure 2a,b) [35–38].

Figure 2. (a) Regional slope (SRTM 90 v4.1, <http://srtm.csi.cgiar.org>); (b) Archaeological scatters within NoGAP research area (red dotted line) and extent of ENVISAT ASAR scenes in ascending mode, Track 127, Swath I6 (base map: ESRI World Imagery); (c) Extent of Track 127 displayed as LANDSAT 8 OLI false colour composite (5-4-3, 3 April 2014); (d) Fossilized dune surface (Kalrio Timbo archaeological site) during post-monsoon (November 2011); (e) Interdune black cotton soils waterlogged during post-monsoon (November 2010); (f) West Banas riverbed (November 2011).



The orientation of the canal (SE-NW) is highly influenced by the presence of the West Cambay Basin Margin Fault (WCBMF), a linear disturbance that marks the southern boundary of the rich aquifers located within the tectonic graben (*i.e.*, Cambay Basin) that includes the lower Silt-belt plains (see Figure 2a). The WCBMF boundary coincides with the 40 m a.s.l. (*i.e.*, above sea level) contour

line, and defines a pedagogical and morphological change in the landscape that greatly affects water run-off dynamics and groundwater recharge and affects dune preservation and erosion. The dunes located south of the WCBMF (*i.e.*, dune and interdune fields) are well-preserved dome and linear dunes, while dunes within the lower Silt-belt plains have been highly eroded due to intense mechanized agricultural exploitation with tube-well irrigation. These morphological differences are highly visible in infrared imagery (Figure 2b), where red tones indicate healthy crops and vigorous vegetation in the lower Silt-belt alluvial plains, while bright and dark-green tones indicate sandy dune surfaces and more humid interdune soils respectively (see Balbo *et al.* [14] for further details). On the basis of these premises, the SAR-based landscape observations described in the present work focus on the hydrological dynamics resulting from precipitation discharge, run-off and seasonal concentrations of soil moisture.

3. Materials and Methods

The integration of multi-temporal EO datasets is pivotal for gathering information on landscape and environment variability, including resource spots. However, optical satellite imagery is often limited in monsoonal climates due to the high cloud coverage, the limited access related to on-demand cover and excessive cost for very high resolution data. On the other hand, SAR is an active sensor that emits electromagnetic pulses in the microwave region of the spectrum and collects the electromagnetic waves reflected by the illuminated objects in the direction of the sensor. Medium-resolution satellite SAR imagery has played an important role in tropical and semi-arid contexts due to the capability of microwaves to penetrate clouds, as well as detect soil moisture content in all weather conditions. The detection of soil moisture is key in the study of long-term landscape dynamics as it allows detecting palaeohydrological features, which provide evidence for resource spots important for past human occupation (see [39–43]).

The amplitude of the SAR image is a measure of the backscattered signal of the illuminated objects. The amplitude mainly depends on the roughness and on the dielectric constant of the illuminated target. It is well-established that illuminated rough surfaces provide higher amplitude values, while, in contrast, flat or smooth surfaces reflect most of the signal away from the satellite, thus providing low amplitudes values. Calm water, in particular, returns very low amplitude values compared to rough dry terrain or turbulent open waters. This property makes SAR amplitude images and derived maps very suitable to identify flooded areas and monitor runoff response to spatial variability in precipitation (for examples of flood detection and mapping [44,45]).

The full exploitation of SAR imagery for mapping monsoonal floods in NW India remains little explored in spite of the potential of such inexpensive and large-coverage EO products as ERS-1/2 or ENVISAT imagery. SAR imagery has recently been used to monitor hydro-meteorological hazards in the Indus basin, following the 2010 flooding event [46,47] and to address wetland classification and palaeodrainage reconstruction in Rajasthan [48,49]. ERS-1 data has been used to explore flood delineation in the Kutch region of Gujarat [50]. The use of SAR in South Asia is likely to further increase after the completion of the RISAT constellation by the Indian Space Research Organization, with the first Indian-made C-band SAR instrument for civilian use [51]. SAR instruments have found some use in connection with archaeological research in NW South Asia for mapping Harappan

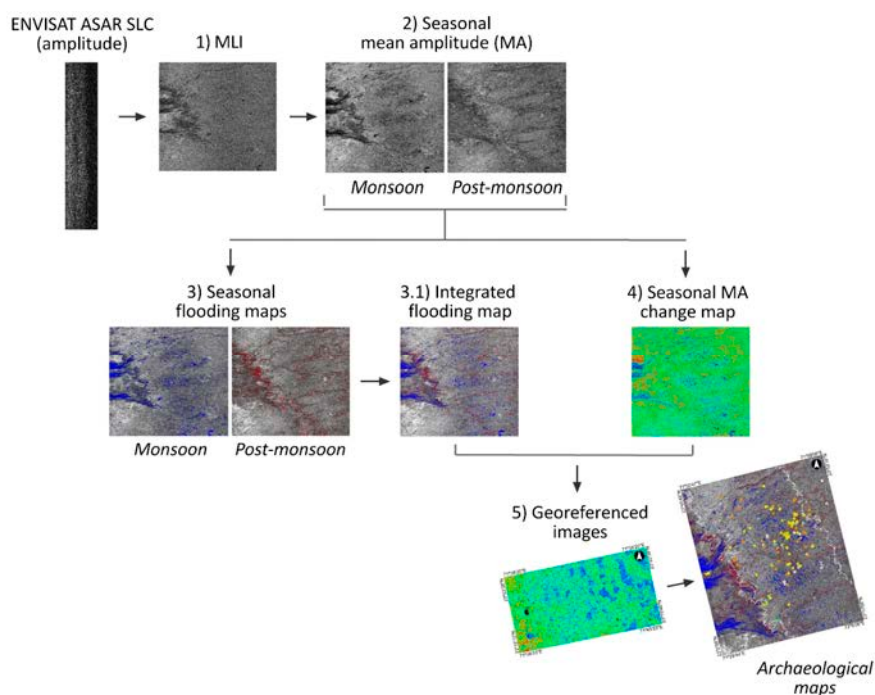
settlements within the Indus and the dried-up Ghaggar-Hakra river basins and tributary palaeochannels ([52–55] and references therein).

3.1. Data Processing

For this study we used five Single Look Complex (SLC) C-band ENVISAT ASAR images, which have a pixel resolution of approximately $20\text{ m} \times 4\text{ m}$. The images were acquired in ascending mode (Track 127, see the scene in Figure 2a) acquired between October 2004 and December 2009.

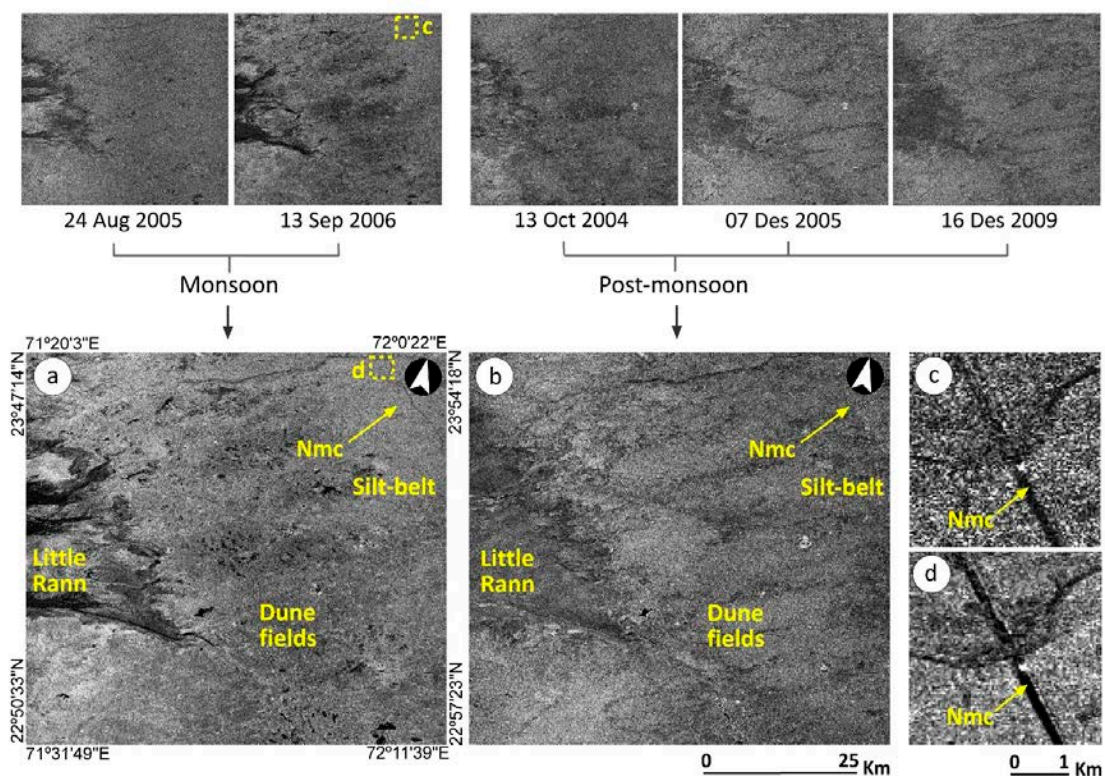
The ASAR scenes were co-registered with respect to a selected master scene and the amplitude image was generated from each scene. The amplitude of each single scene was equalized by dividing the amplitude image by the mean amplitude (MA) value of a subset located in an urban area. The urban area was chosen for the equalization because its measured amplitude has negligible variations during the entire period of study. Through this adjustment, the amplitudes were normalized between the different acquisitions in order to make them comparable. The equalized amplitude is then measured relative to the urban area. In order to reduce the original speckle, a multi-look (MLI) of factor 5×1 was performed in each amplitude image. Resulting images were rotated 270° and transposed to geographically orientate the SAR image. Figure 3 sketches the methodological approach, which also builds upon the ENVISAT ASAR amplitude component processing and post-processing chain proposed by Tapete *et al.* [56] and Cigna *et al.* [57].

Figure 3. Workflow employed for the ENVISAT ASAR image processing. After co-registration and equalization, a (1) multi-look (MLI) processing was applied to each amplitude scene. (2) Images were rotated, transposed, classified upon acquisition time and integrated in two seasonal stacks (MA seasonal images). (3) A water threshold was applied to obtain (Section 3.1) seasonal flooding maps. Besides, (4) MA images were divided to obtain the seasonal MA change map. (5) Final products were georeferenced and integrated into GIS platforms.



Multi-look single amplitude scenes were classified and integrated in two image stacks depending on their date of acquisition (Figure 4). The resulting images represent a seasonal MA scene for both the monsoonal and post-monsoonal season in our study area (Figure 4a,b). In addition, the use of MA images helped to considerably reduce temporal speckle (see the effects of speckle filter in Figure 4c,d).

Figure 4. (a) Monsoonal mean amplitude (MA) image generated from two monsoonal scenes; (b) Post-monsoonal MA image generated from three monsoonal scenes; (c) Detail of radar speckle in ASAR scene (13 September 2006, after MLI processing); (d) MA radar speckle reduction (monsoonal MA, after temporal filter).



3.2. Limitations of Using Seasonal MA Scenes

The temporal extent for each seasonal stack was defined after a yearly subdivision of the ISM precipitation patterns suggested as in Balbo *et al.* [23] (Table 1a). The climatic subdivision suggests that within any given year, the ISM generates a strong seasonality that defines three critical moments, each corresponding to a 4-month season. Table 1a shows the average precipitation for each season (mean, median and standard deviation). The Monsoon discharges almost the entire yearly rainfall during summer whereas the post-monsoonal and dry period are characterised by a high variability (note the high standard deviation). These patterns draw attention to the effects of the high inter-annual precipitation variability on the ground. For the period covered in this study (2004–2009), yearly average precipitations (Table 1b) do not exhibit critical events either monthly or annually. Therefore, the observed amplitude values can be used as a representative dataset for the monsoonal and post-monsoonal seasonal average rainfall for our study area. In this study, only the MA response for the monsoonal and post-monsoonal seasons is analysed. As evident from the average data in Table 1b, the major change in rainfall quantity occurs between the monsoon and post-monsoonal period

(a reduction of 80%) whereas the change between post-monsoon and dry period represents a minor change (a decrease of 2%).

Table 1. Climatic subdivision (after Balbo *et al.* [14]) and average seasonal rainfall from Kachchh-Saurashtra region (data from Indian Institute of Tropical Meteorology, <http://www.tropmet.res.in>).

(a)			
Yearly Seasonal Subdivision	Average Precipitation (mm) (1871–2011)		
	Mean	Median	Stdv
June to September (JJAS) Monsoon	1107	1040	492
October to January (ONDJ) Post-monsoon	50	25	61
February to May (FMAM) Dry season	30	11	54

(b)			
Seasonal Mean Precipitation (mm) for ENVISAT Life Mission (2002–2011)			
ENVISAT Mission Years	Acquired Scenes	Monsoon	Post-Monsoon
2002		850	6
2003		1490	10
2004	13 Oct	984	50
2005	24 Aug; 13 Dec	1426	4
2006	13 Sep	1692	5
2007		2346	7
2008		1379	37
2009	16 Dec	1414	9
2010		2235	116
2011		1641	6

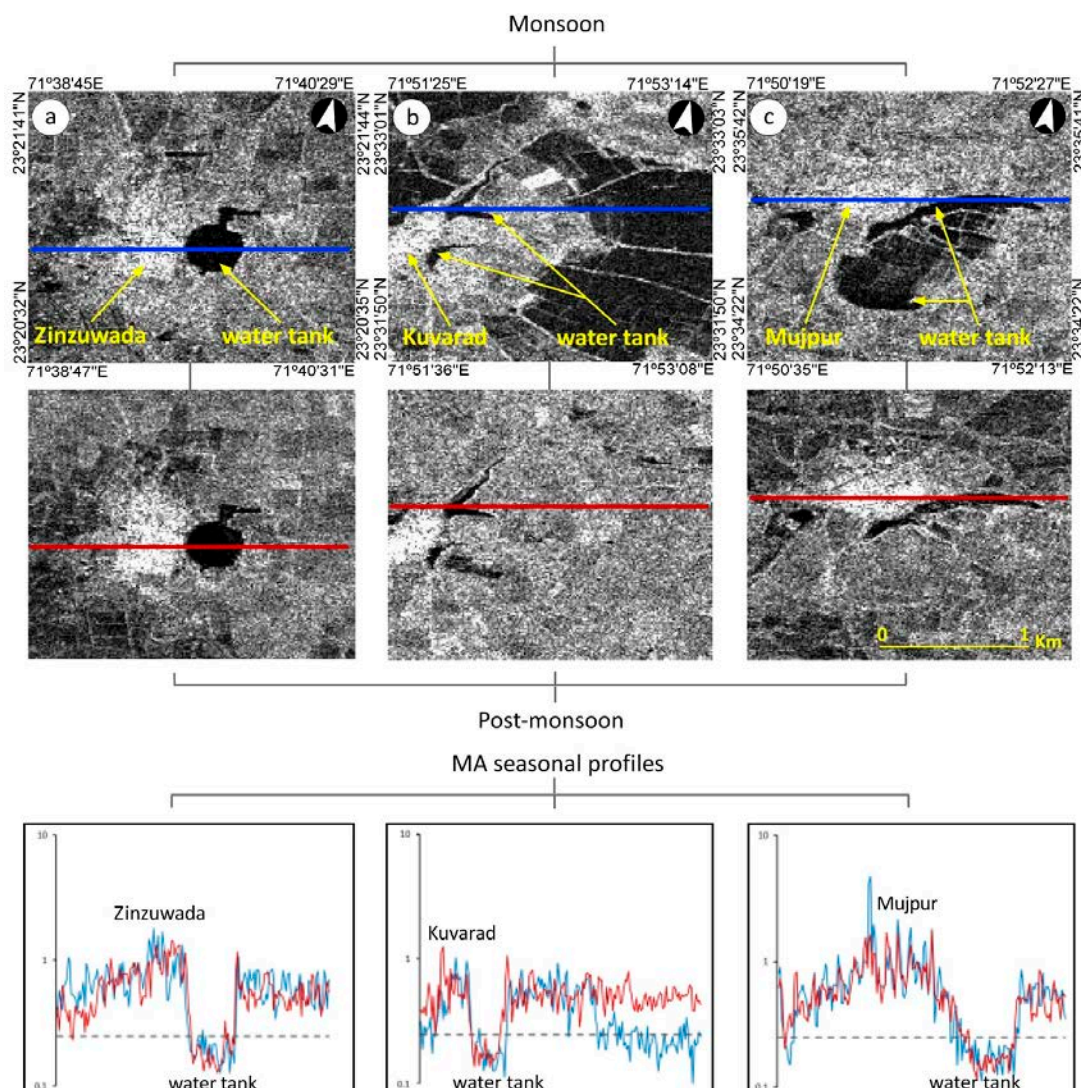
Moreover, the dry season was not integrated in a seasonal stack because only one ascending ENVISAT ASAR scene (acquired in February 2009) was available in the archives, and therefore we could not use mean amplitudes (and reduce the temporal speckle) as for the other periods.

3.3. Empirical MA Threshold for Identification of Flooded Areas

Several authors have applied thresholding methods for the detection of water bodies and to ascertain flooding patterns using the ENVISAT ASAR Global Mode or Wide Swath Mode ([56–59]). The underlying principle of such studies is the lower amplitude produced by calm water surfaces with respect to rougher terrain surfaces. Calm water (as opposite to turbulent water), reflects the incident electromagnetic signal away from the satellite, thus returning a very low amplitude value. Here we exploit this property to extract an empirical MA threshold for identification of flooded areas. The water MA threshold was selected by supervised identification of several types of water bodies in both

periods. In Figure 5, dark and very dark pixels represent a very low amplitude value, which can be related to the presence of water tanks and flooded fields. MA values are extracted from the horizontal profile for both periods. In all cases, the MA corresponding to water bodies was below 0.25 (see bottom row of Figure 5). The applied threshold for surface water was then set to 0.25 for our case of study. Notice that this threshold is valid for the equalization process that was applied to this dataset. Therefore, different equalization would imply different threshold. Water threshold masks were applied to monsoonal and post-monsoonal MA images to generate a new derived image depicting temporal water surface in each seasonal period. The seasonal flooding maps were integrated in a unique map depicting seasonal flooded areas.

Figure 5. Extraction of water threshold values in equalized MA seasonal images from clearly identified water tanks: (a) Zinzuwada village; (b) Kuvarad village; (c) Mujpur village. Image composition shows, in descending order: MA monsoonal image (horizontal blue line); MA post-monsoonal image (horizontal red line); and MA spatial profile (spatially indicated by the horizontal blue and red lines) for monsoonal and post-monsoonal seasons. The water threshold at 0.25 MA value is indicated as a grey dashed line.



3.4. Backscattering Signal Seasonal Change

A seasonal change map was computed by dividing the monsoonal by the post-monsoonal MA values to understand the seasonal reflectivity behaviour within the study area. The resulting MA seasonal change map was classified in three main categories: (a) surface lower reflectivity for the monsoonal period (values from 0 to 1); (b) surface lower reflectivity for the post-monsoonal period (values higher than 1); and (c) surface without change (*i.e.*, those pixels that remains constant between the two seasons, with values around 1). In general, seasonal changes in surface MA response can be influenced by changes in terrain roughness or soil moisture content. In N. Gujarat, those changes in surface reflectivity are highly affected by the type of seasonal land use (*i.e.*, cultivation, ploughing or resting wastelands) and runoff processes that greatly affects the seasonal extension of wetlands.

3.5. Georeferencing of Subsets of Interest

The final maps were georeferenced to ground coordinates (UTM WGS94, 42N) using the ENVI function image to map registration, which requires a set of Ground Control Points (GCP). This method was preferred rather than other available geocoding methods [39,57], requiring the use of a DEM to orthorectify the imagery. However, the flat topography characterizing the dune and interdune fields limit the possibility of using DEMs as available datasets (SRTM v4 or ASTER GDEM v2) proved to be too coarse for this purpose [14].

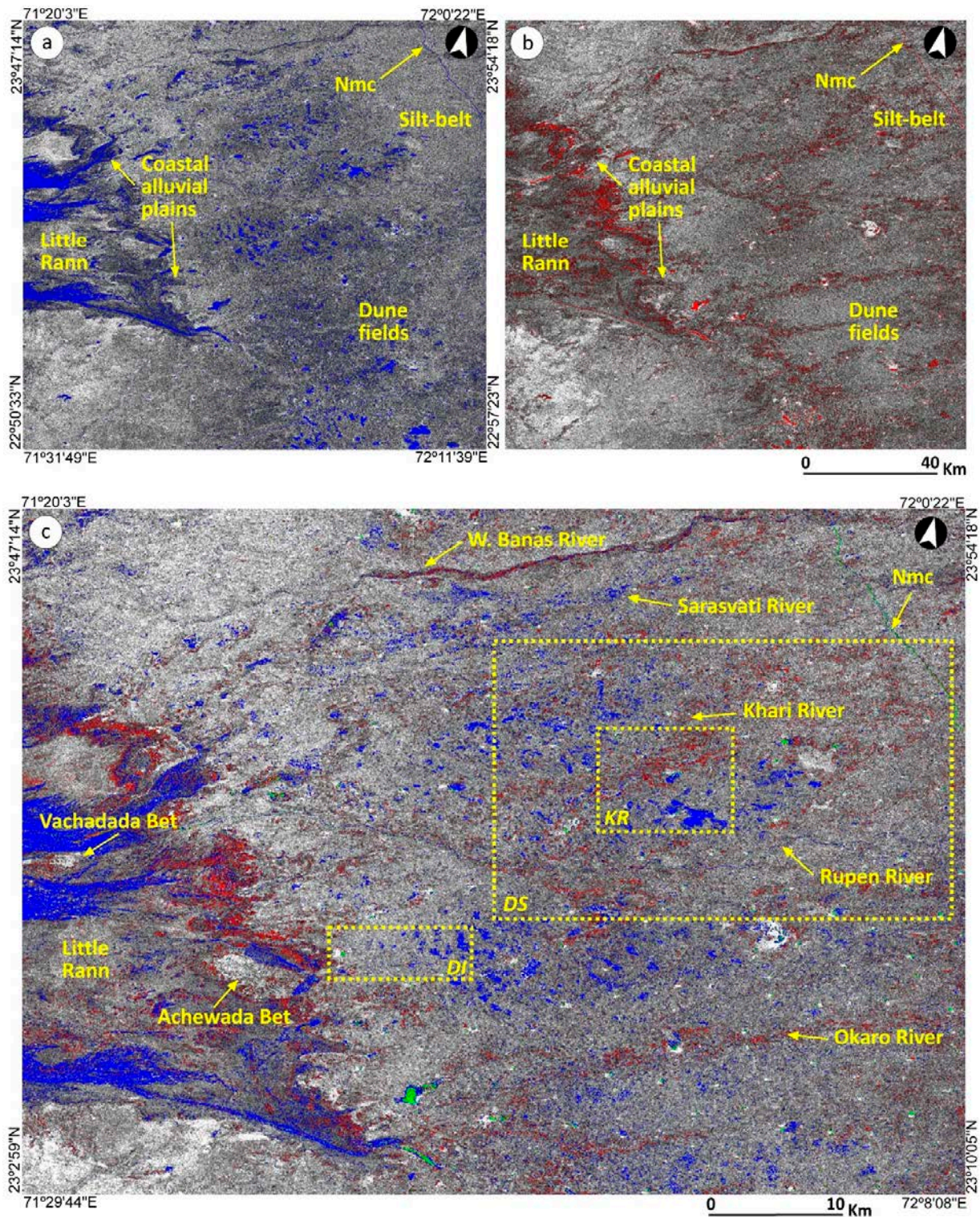
4. Results: Regional and Local Observations of Hydrological Dynamics

At the regional scale, the above-mentioned amplitude products helped to delineate three major geomorphological features in the study area. These are (a) the low-lying marsh area of the LRK and its islands (which are locally called as “bets”); (b) the coastal alluvial plains; and (c) the main rivers and watersheds that flow NE-SW towards the LRK (Figure 6).

At the local scale, results are presented in three subsets of interest within the study area to better evaluate the amplitude response in different archaeological and geomorphological settings (see dotted areas in Figure 6c):

1. Khari River (KR): This area integrates the Khari River basin area (a left bank tributary of the Rupen River) and is characterised by the presence of well-preserved dome dunes. This area has been largely explored in consecutive archaeological missions and contains several archaeological sites and scatters of dispersed materials.
2. Dune and interdune fields (DI): coastal area with fossilized dunes near Zinzuwada village. Despite the well-preserved linear dunes and fertile interdunes, to date no archaeological evidence has been found in this area.
3. Dune fields/Silt-belt (DS): This subset includes the lower Silt-belt alluvial plains (between the Narmada main canal and the WCBMF boundary) and the dune and interdune fields located between the eastern banks of the Saraswati River and the western banks of the Rupen River.

Figure 6. (a) Monsoonal flooding map (enhanced in blue) superimposed to monsoonal MA and (b) post-monsoonal flooding map (enhanced in red) superimposed to post-monsoonal MA; (c) Integrated seasonal flooding map. Pixels flooded on both seasons are represented in green. Dotted areas indicate the subsets of interest displayed in Figure 7 (KR), Figure 8 (DI) and Figure 9c (DS).



4.1. Little Rann of Kachchh

The maximum extent of the flood covering the LRK during the rainy season is clearly visible in Figure 6c (enhanced in blue). The mean elevation of the LRK surface is ~6 m a.s.l, which gradually decreases to 2 m towards the south-western basins [24]. This gently, regional slope drives the monsoonal spill and the post-monsoonal run-off from the coastal alluvial fans to the ocean. Although the LRK progressively dries up after the monsoonal rains, some flooded areas are still detected in Figure 6c during the post-monsoonal season (enhanced in red). Some remains of post-monsoonal water bodies can be related to stagnant water or contemporary intensive saltpan exploitation in parcels that capture monsoonal run-off. Islands (see Vachadada Bet and Achewada Bet in Figure 6c) and elevated plateaus can also be identified in both periods due to the roughness of its dry surfaces (with presence of abundant shrub vegetation). During the dry period, some small water bodies arise in the islands, suggesting a post-monsoonal use and maintenance of island ponds and water reservoirs.

It is worth noting that Figure 6b,c show a significant post-monsoonal increase of humid surfaces along the wastelands located in the coastal alluvial plains. The predominance of post-monsoonal pixels in these areas can be related to the intensification of irrigated crop fields and illegal salt panning documented by Prasad *et al.* [60] along the Wild Ass Sanctuary (*i.e.*, a protected biosphere reserve that encompasses the LRK and its coastal ecosystems). These land-use changes are critically affecting the habitat management of the Asiatic wild ass and endangered species such as Dalmatian pelican and lesser flamingo.

4.2. River Catchment Areas

The integrated seasonal flooding map in Figure 6c shows a wider and more visible monsoonal river flow within the dune and interdune fields, which corresponds to the alluvial plains that extend below the 40 m a.s.l. contour line. In the Silt-belt plains, in contrast, the riverbeds become narrower (*i.e.*, more incised). The West Banas River shows a low monsoonal flow, mainly concentrated in abundant pools and relict meandering channels, which are occasionally reactivated during the rainy season [14]. However, flooding events during high rainfall years can have high destructive impact [61]. The Rupen, Saraswati and Khari rivers have a more incised and narrow channel bed.

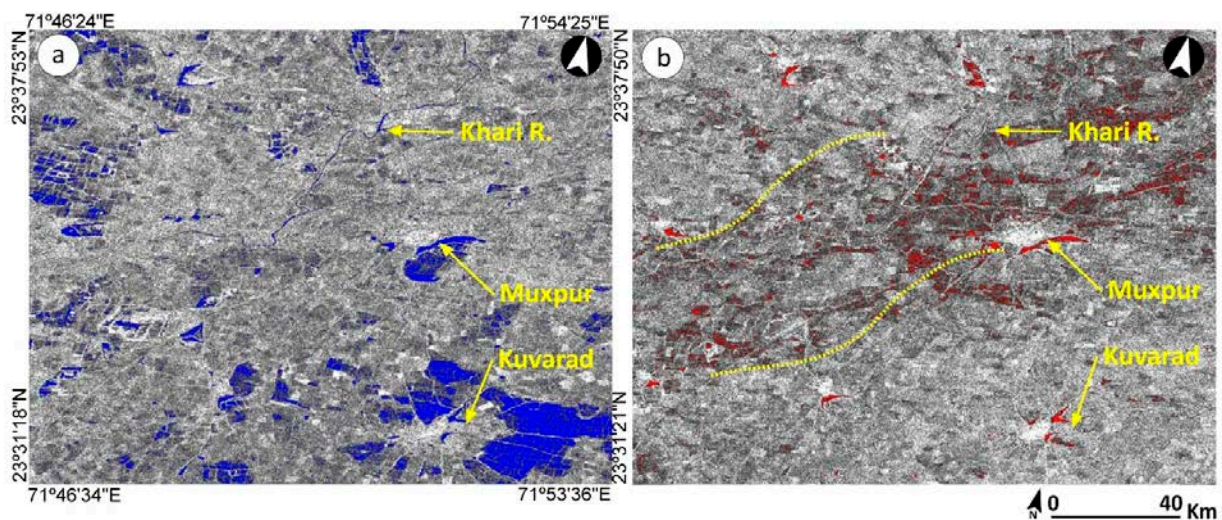
During the post-monsoonal months the detected water surfaces migrates from the dried-up riverbed towards the riverbanks and adjacent fields. Figure 7b shows post-monsoonal lower amplitude response (as suggested by the abundance of black and very dark tones) within the river catchment area, thus revealing the presence of some waterlogged areas and generally suggesting high soil moisture rates.

4.3. Village Tanks and Lakes

Village tanks and lakes have the best water harvesting performance. They reach maximum extension at the end of the monsoon and maintain water throughout the post-monsoon season (for a water tank comparison, see the tanks analyzed in Figure 5 and the seasonal flooding maps in Figure 7). In contrast, adjacent flooded interdune fields dry up shortly after the monsoon. High MA values (very bright clusters of pixels) are representative of village areas and indicate the presence of permanent and quasi-permanent water tanks with the settlements. The occurrence of quasi-permanent water bodies

correlates rather well with the distribution of villages and urban settlements (traditionally located on the top of large and prominent fossilized dunes). The original water bodies were extended in historical times and were regularly maintained to provide ecological services and much-needed water during the year. In the last years, several hydrological projects have promoted the cleaning and restoration of water tanks and temporal ponds as a way to develop sustainable water harvesting strategies [62].

Figure 7. Khari River (KR) subset of interest showing the flooding maps for (a) MA monsoonal (blue pixels) and (b) MA post-monsoonal images (red pixels). Note the post-monsoonal low amplitude (dark pixels) in the field banks located within the Khari River basin area (yellow dotted line).

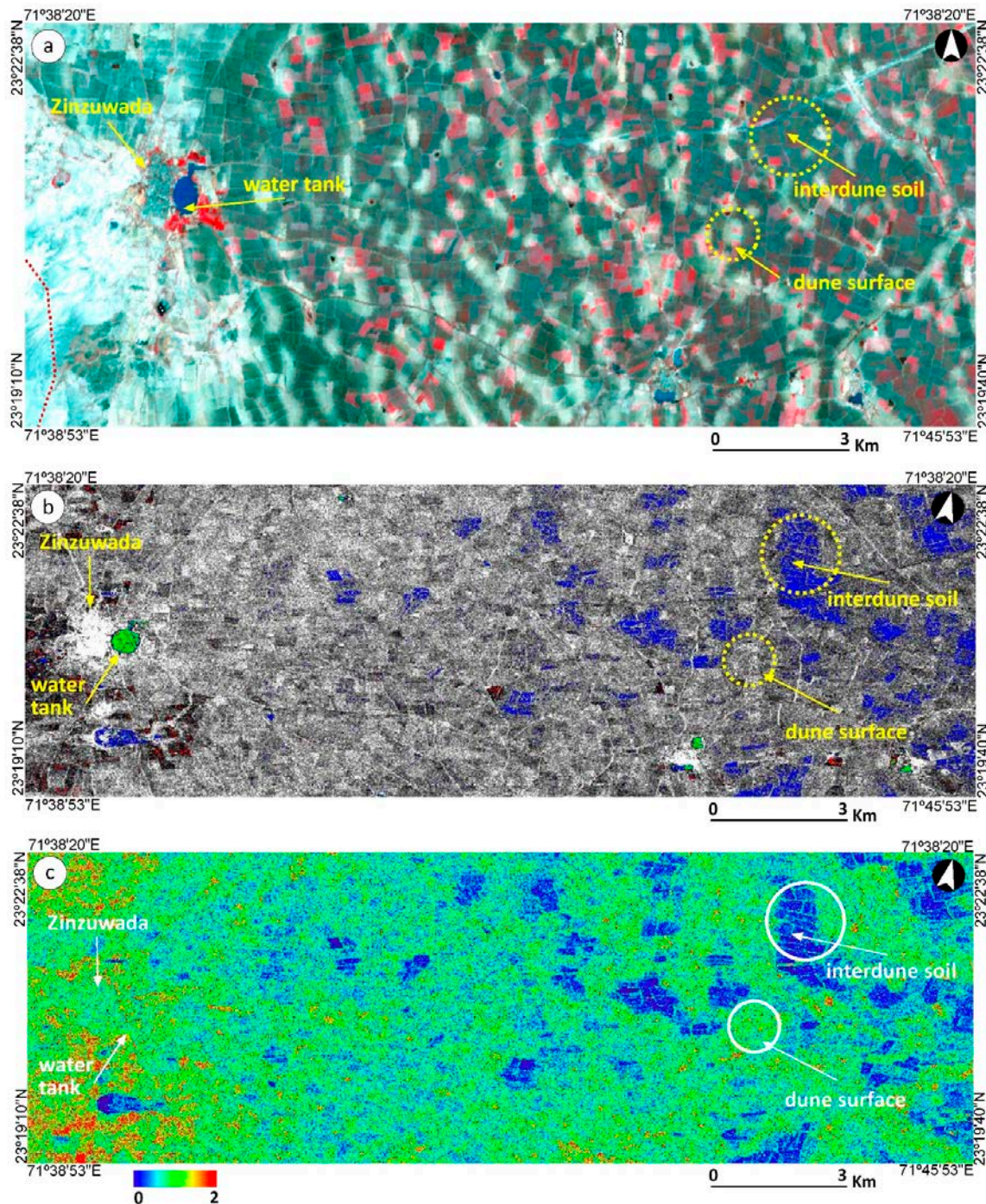


4.4. Interdune Waterlogging

Amplitude values reveal, as expected, significant changes between the two observed seasons in interdune waterlogging and water run-off (Figure 8). Interdune soils are dark coloured vertisols rich in clay and humus, locally known as black cotton soils and they are characterized by colluvium fine sediments (*i.e.*, clay) and rich organic content. In post-monsoonal multispectral false color imagery, the interdune surface is generally represented by dark green tones (Figure 8a). Clay soils have little water percolation but fast saturation rates, falling into cracks in dry periods [63]. The integrated seasonal flooding map in Figure 8b reveals significant flooding pixels in interdune fields during the monsoon, which suggest the presence of quick-lived water bodies with fast evotranspiration and loss of water content. Very low darkish amplitude in other fields may suggest abundant soil moisture but no water logging. Check dams and temporal ponds distributed in the dune-interdune sector of the study area retain water for short periods, depending of the intensity of rainfall.

Figure 8c displays the MA ratio between monsoonal and post-monsoonal MA values. A good correlation between values with small season variability can be related to permanent anthropic features in the landscape (*i.e.*, Zinzawada village and its water tank). On the other hand, the ratio of interdune fields reflects flood-prone areas that could retain soil moisture during the post-monsoonal period, whereas MA change values for fossilized dunes indicates a surface stability (*i.e.*, non-floodable areas) between seasons.

Figure 8. (a) Dune-interdune (DI) subset of interest in orthorectified ASTER false colour composite (3N-2-1) from 1 October 2004; (b) Integrated seasonal flooding map (blue for monsoon, red for post-monsoon and green for no change); (c) Seasonal MA change values (stretched histogram).



5. Discussion

5.1. Tectonic Influence and Modern Disturbances

Land use change, the construction of dams in the 60s and the presence of large irrigation canals has substantially altered the nature and frequency of flooding discharge and run-off in N. Gujarat.

In addition, observed changes in the water flow and the high variability of seasonal water-bodies might be also a partial result of post-monsoonal tube-well irrigation, which is a well-distributed activity hard to detect by the medium resolution provided by C-band imagery.

The Narmada main canal is the major hydrological infrastructure in the study area. Its size makes it visible in amplitude images (e.g., in Figure 6 where the green pixels indicate constant water flow in the canal through the year). The canal brings water into the study area from the catchments of the southern river basins. However, while the main canal started to function in the early 2000s, the secondary branches that serve the study area were only fully activated in 2010 [35–38]. Therefore, we can reasonably assume that the Narmada canal had virtually no effect on the natural available water capacity of our study area between 2004 and 2009, *i.e.*, during our time window observation.

Notwithstanding, the major factors involved in N. Gujarat hydrological patterns for the period of observation are related to tectonic influence and regional altimetry. The alluvial Quaternary deposition within the depression of the Cambay basin (*i.e.*, Silt-belt) set in place deeper unsaturated aquifers that allow (1) more rainfall infiltration into the soil surface and (2) faster water table recharge. In contrast, the more permeable inter-dune silts retain monsoonal moisture, whereas interdune fields located within river basin areas experience major infiltration rates and water run-off towards the Little Ran.

Overall, the following patterns emerge:

1. In the Silt-belt, unconfined aquifers and permeable silty soils favour water infiltration and water table recharge, reducing run-off and increasing soil pedogenesis.
2. In the dune/interdune fields, rain falling on impermeable saturated soils runs off.
3. River basins act as ecological corridors between the two areas, with presence of humid soils along the watersheds independently of the surrounding context.

5.2. Implications for Archaeology

The above observations of regional and local hydrological dynamics have provided a framework for evaluating present-day and historical trajectories of both natural and anthropic monsoonal patterns as well as the use and distribution of water resources. As a tool to evaluate these trajectories, the georeferenced SAR derived maps provided a new and robust means to examine the distribution patterns of the NoGAP archaeological data in the context of the amplitude signatures for the ISM rainfall. As noted above, paleoclimatic models for the Asian monsoon [31] suggest a rather stable seasonal variability through the Holocene. Therefore, the amplitude images used in this study can be used as an explorative approach to examine long-term human occupation in the study area,

At the regional scale, the major concentrations of mid-Holocene settlements are in the dune/interdune fields located between the 8 m and 40 m a.s.l. contour lines (Figure 9a). The boundary that marks the 8 m contour line also helps to delineate the coastal alluvial plains that connect the LRK with the continental lands. The absence of surface scatters in this area could be related to taphonomical processes influenced in recent times by the increase of cultivated fields and salt panning in this area.

Figure 9. (a) Georeferenced seasonal flooding map (blue for monsoon, red for post-monsoon and green for no change) and regional distribution of archaeological sites; (b) Integrated seasonal flooding map superimposed to regional elevation (SRTM 90 v4.1, <http://srtm.csi.cgiar.org>); (c) Integrated seasonal flooding map superimposed to the MA image for the Dune fields/Silt-belt (DS) subset of interest (dotted areas indicates the extent of Figure 10a,b).

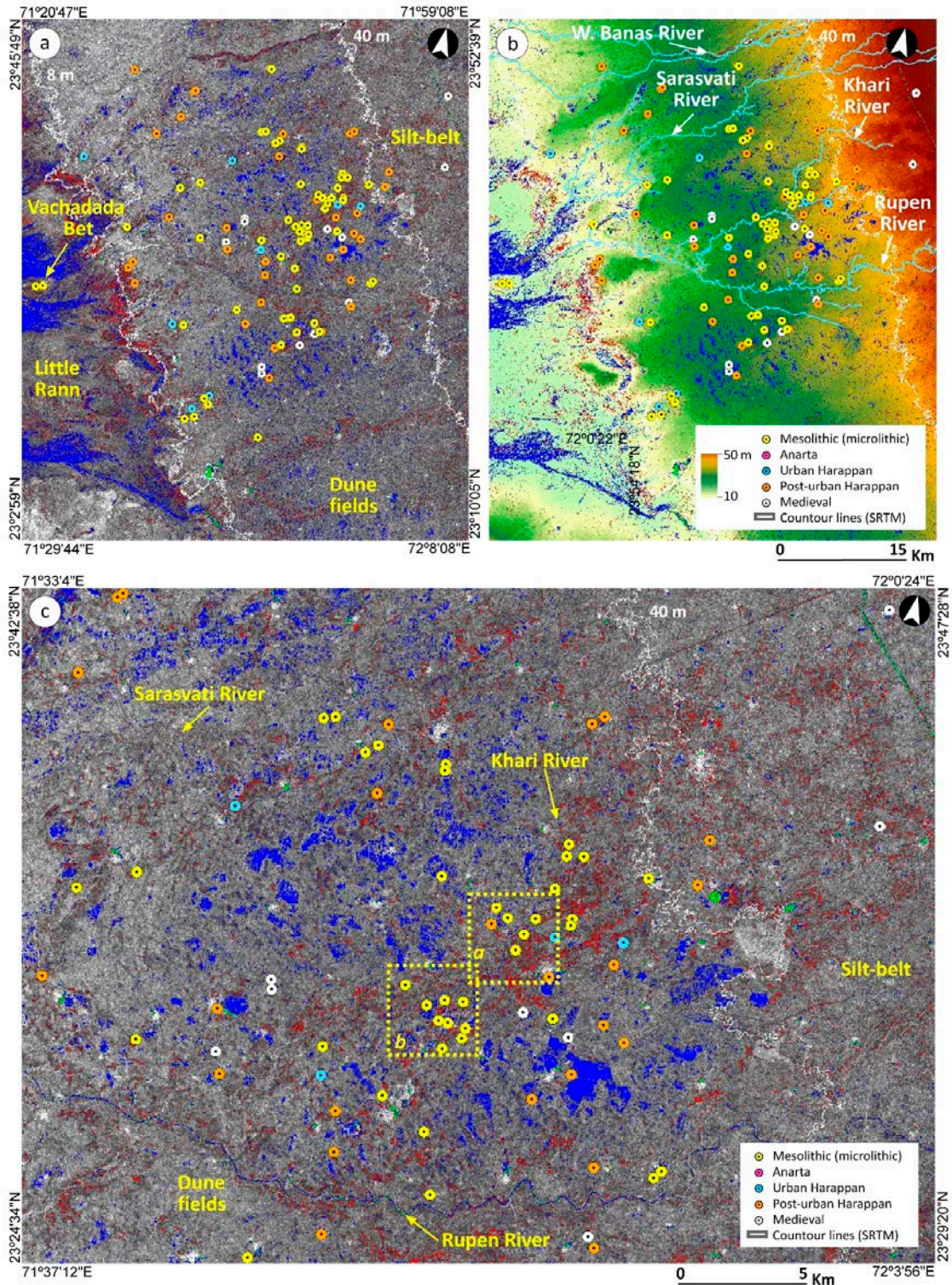
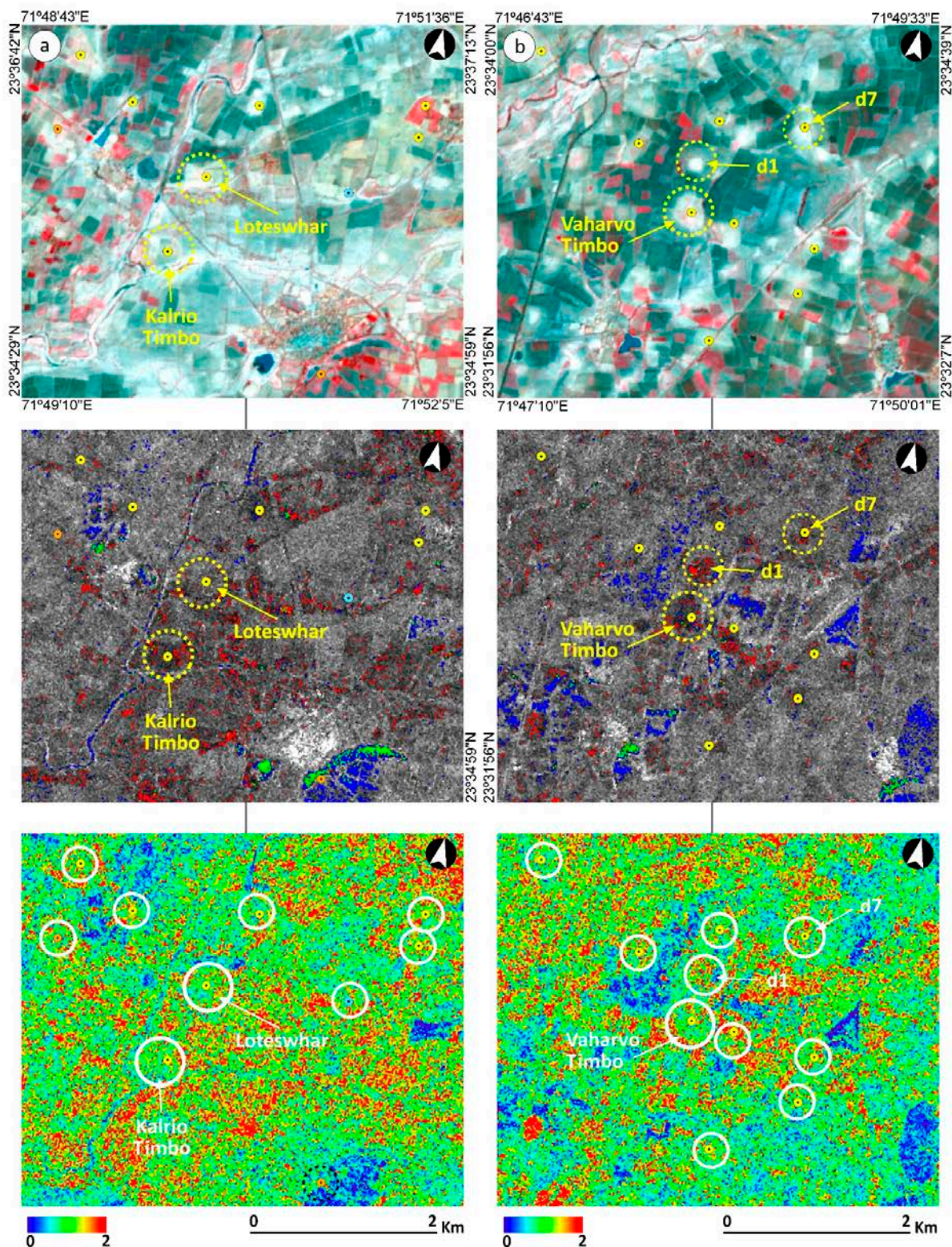


Figure 10. Subset detail of two archaeological areas within the Khari River basin area: (a) Loteswhar/Kalrio Timbo and (b) Vaharvo Timbo. Image composition shows, in descending order: orthorectified ASTER false colour composite (3N-2-1) from 1 October 2004; integrated seasonal flooding maps (blue for monsoon, red for post-monsoon and green for no change) superimposed to MA images; and seasonal MA change map (stretched histogram).



On the other hand, a major presence of Mesolithic hunter-gatherer sites (primarily represented by microlithic surface scatters) is attested within the Khari River basin. The abundance of these sites suggests a recurrent occupation of riverbanks for hunter-gatherer groups. As suggested by Bhan [16,64] the banks of the Rupen River and its tributaries have excellent growth of nutritious fodder which is available after the first monsoonal rainfall, attracting diverse types of regional fauna. This fodder is used today for enhanced milk production due to higher protein content, as attested in current ethno-archaeological studies regarding present day nomadic pastoralists [16,64].

It is possible that the river basin could have presented an attractive resource spot for past pastoral communities (represented in Figure 9 by Anarta and Harappan related communities). Some of the hunter-gatherer sites located along the Khari River show signs of repeated occupation over several millennia. For example, the excavations of the fossilized dune of Loteshwar suggests a seasonal occupation by hunter-gatherers c. 9–7.5 ka cal BP and by agro-pastoral groups c. 5.7–4.2 ka cal BP [65]. Therefore, the seasonal water availability in N. Gujarat may suggest two different strategies for seasonal campsites, taking advantage of monsoonal flooding in interdune areas but also having rich spots of soil moisture and denser vegetation along the watercourses.

Fossilized dunes are most visible in local seasonal MA change maps (Figure 10a,b) whereas values in green represent areas that remain stable between seasons, in clearly contrast with the surrounding flood-prone areas (*i.e.*, black-cotton soils and riverbanks). The higher archaeological dunes (*i.e.*, Loteshwar and Kalrio Timbo in Figure 10a and Vaharvo Timbo in Figure 10b) have the most stable amplitude as they are elevated ~5 m from the floodable interdune black-cotton soils. In contrast, less prominent dunes are prone to seasonal changes. For example, as suggested by the seasonal MA change map in Figure 10b, dune surfaces coded d1 and d7 show constant high multispectral reflectance (*i.e.*, bright tones) in both the monsoon and post-monsoon season. Conversely, the amplitude post-monsoonal flooding map shows that these dunes become flood-prone areas during the post-monsoonal period. Seasonal MA change map also suggests a high rate of variability. This pattern could be explained by the low elevation of these dunes, which facilitates cultivation and often destroys archaeological evidence. The consequent impact on archaeological visibility could explain the absence of surface materials in dune d1 and the low presence of artifacts and ecofacts in dune d7.

6. Conclusions

This work demonstrates how Synthetic Aperture Radar (SAR) C-band amplitude response in monsoonal semi-arid environments represents a step forward towards the archaeological use of satellite radar data in the context of the Greater Indus Valley (Northern India and Pakistan). ENVISAT ASAR allows the multi-temporal investigation of this area, overcoming the limitations of optical Earth Observation data related principally to heavy cloud coverage during the monsoonal period.

The amplitude seasonal flooding maps, elaborated for this work through the processing of radar images, allowed the identification of active morphogenic processes affecting pedological conditions and water distribution in the semi-arid region of North Gujarat. The alluvial plains located between the coastal marshes areas of the Little Rann of Katchchh and the Western Cambay Basin Margin Fault boundary (along the 40 m a.s.l. contour line) are characterized by well-preserved sand dunes that remain dry throughout the year, and seasonally flooded interdune areas. The main watercourses of the

study area discharge into the Little Rann and show well-defined palaeochannels and frequent avulsion episodes. Although the main discharge of these rivers happens during the onset of the Indian Summer Monsoon (June to September), amplitude response in the post-monsoonal months (October to January) suggests abundant water retention in the near-river water table. These seasonal dynamics of water discharge have most probably influenced the prehistoric and historical patterns of landscape exploitation by human groups with diverse economic strategies (hunter-gatherers, agro-pastoralists and farmers). Indeed, the integration of archaeological evidence with SAR amplitude images shows that human occupation was recurrent on raised dunes located close to areas with higher water retention, which represent potential resources hotspots through the post-monsoonal months (e.g., interdunes, lakes, and river banks).

Our observations have strong repercussions for the understanding of human occupation dynamics in the region, where a positive feedback cycle seems to have been in place for several centuries and possibly millennia. Prominent dunes, where most archaeological scatters are documented, can be identified in mean amplitude change maps as the most stable landscape feature during the entire year. This suggests a preference for recurrent seasonal camps. In addition, most of the prominent dunes are still occupied by present-day villages, or have been converted in fortified temples (e.g., Loteshwar temple, one of the earliest attested in the region). This long-term recurrence of occupation that stretches to present-day strengthens the hypothesis of the importance of prominent dunes as places of settlement in this area. In addition, the use of mean amplitude change maps allows the identification of land-cover changes (e.g., irrigation activities such as tube well irrigation and construction of canals) on fossilized dune surfaces that jeopardize archaeological preservation and visibility.

Further research is needed to understand the hydrological dynamics during the dry season and to confirm the observed patterns on the ground. In light of this, a geoarchaeological survey was carried out across the study area and a set of surface sediment samples were collected from several geomorphological features (mostly dunes, interdune soils and riverbeds) during the post-monsoonal months. The on-going physical characterization of these soils will provide more data to direct further SAR approaches. In addition, we have acquired new high-resolution SAR imagery (TerraSAR-X Single-Look StripMap and SpotLight imagery). These new acquisitions will improve the quality of our data and expand our temporal window to include the impact on archaeological preservation of more recent irrigation works.

Acknowledgements

This research arises from an ESA Earth Observation project proposal for Principal Investigators (ESA EOPI-ID12931) between the NoGAP Project (CaSEs-Spanish National Research Council) and the Geomatics Division of the Catalan Telecommunications Technology Centre (CTTC). Access to ENVISAT data was granted by ESA EOPI (<https://earth.esa.int>). Access to ASTER images was granted by Land Processes Distributed Active Archive Center (LPDAAC)-United States Geological Survey (USGS)-Earth Resources Observation and Science Center (EROS) (lpdaac.usgs.gov). Access to GoogleEarthPro was granted via the GoogleEarth Outreach Program (earth.google.com/outreach). The research is part of the N. Gujarat Archaeological Project and the SimulPast Project (CSD2010-00034). FCC acknowledges funding from a JAE-PreDoc program (Spanish National Research Council and

European Social Found). ALB has worked on this paper on contracts from the Juan de la Cierva Programme (MINECO JCI-2011-10734) and a visiting fellowship at CLISEC Klima Campus University of Hamburg.

The authors wish to thank the NoGAP colleagues at the MS University of Baroda for their contribution to ongoing work. FCC specially thanks Steve Markofsky, Carla Lancelotti and the anonymous reviewers for the comments and improvements made on the original manuscript.

Author Contributions

Francesc C. Conesa and Núria Devanthéry conceived and designed the research and performed the analyses; Francesc C. Conesa, Núria Devanthéry, Andrea L. Balbo, Marco Madella and Oriol Monserrat analyzed the data; Francesc C. Conesa, Núria Devanthéry, Andrea L. Balbo and Marco Madella wrote the paper.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

1. Agrawal, D.P.; Pande, B.M. *Ecology and Archaeology of Western India*; Naurang Rai: Anand Nagar, India, 1977.
2. Allchin, R.; Allchin, B. Pathways to settled life: The Mesolithic and early Neolithic. In *The Rise of Civilization in India and Pakistan*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 1982.
3. Fuller, D.Q.; Madella, M. Issues in Harappan archaeology: Retrospect and prospect. In *Protohistory: Archaeology of the Harappa Civilization*; Settar, R., Korisettar, R., Eds.; Manohar: Delhi, India, 2002; pp. 317–390.
4. Madella, M.; Fuller, D.Q. Palaeoecology and the Harappan civilisation of South Asia: A reconsideration. *Quat. Sci. Rev.* **2006**, *25*, 1283–1301.
5. Farooqui, A.; Gaur, A.S.; Prasad, V. Climate, vegetation and ecology during Harappan period: Excavations at Kanjetar and Kaj, mid-Saurashtra coast, Gujarat. *J. Archaeol. Sci.* **2013**, *40*, 2631–2647.
6. Thomas, K.D. Minimizing risk? Approaches to pre-Harappan human ecology on the north-west margin of the Greater Indus system. In *Indus Ethnobiology: New Perspectives from the Field*; Weber, S.A., Belcher, W.R., Eds.; Lexington Books: Lanham, MD, USA, 2003; pp. 397–430.
7. Meadow, R. The origins and spread of agriculture and pastoralism in northwestern South Asia. In *The Origins and Spread of Agriculture and Pastoralism in Eurasia*; Harris, D.R., Ed.; UCL Press: London, UK, 1996; pp. 390–412.
8. Khadkikar, A.S.; Mathew, G.; Malik, J.N.; Gundu Rao, T.K.; Chowgaonkar, M.P.; Merh, S.S. The influence of the south-west Indian monsoon on continental deposition over the past 130 kyr, Gujarat, western India. *Terra Nova* **1999**, *11*, 273–277.
9. Chamyal, L.S.; Maurya, D.M.; Raj, R. Fluvial systems of the drylands of western India: A synthesis of Late Quaternary environmental and tectonic changes. *Quat. Int.* **2003**, *104*, 69–86.

10. Sharma, C.S.; Behera, M.D.; Mishra, A.; Panda, S.N. Assessing flood induced land-cover changes using remote sensing and fuzzy approach in Eastern Gujarat (India). *Water Resour. Manag.* **2011**, *25*, 3219–3246.
11. Ajithprasad, P. Holocene adaptations of the Mesolithic and Chalcolithic settlements in north Gujarat. In *Monsoon and Civilizations*; Yasuda, Y., Shinde, V., Eds.; Roli Books: New Delhi, India, 2004; pp. 115–132.
12. Ajithprasad, P. Chalcolithic cultural patterns and the early Harappan interaction in Gujarat. In *Cultural Relations between the Indus and the Iranian Plateau During the Third Millenium BCE*; Osada, T., Witzel, M., Eds.; Harvard Oriental Series: Cambridge, UK, 2011; pp. 11–42.
13. Rajesh, S.V.; Krishnan, K. Chalcolithic cultures of Gujarat (c. 3950–900 BCE): An appraisal. In *Pracyabodha. Indian Archaeology and Tradition*; Mani, B.R., Singhvi, A.K., Kumar, R., Eds.; B.R. Publishing Corporation: New Delhi, India, 2014; pp. 194–205.
14. Balbo, A.L.; Rondelli, B.; Cecília Conesa, F.; Lancelotti, C.; Madella, M.; Ajithprasad, P.; Conesa, F.C. Contributions of geoarchaeology and remote sensing to the study of Holocene hunter–gatherer and agro-pastoral groups in arid margins: The case of North Gujarat (Northwest India). *Quat. Int.* **2013**, *308–309*, 53–65.
15. Rajesh, S.V.; Krishnan, K.; Ajithprasad, P.; Sonawane, V.H. Evaluating the Anarta tradition in the light of Material culture from Loteshwar and other sites in Gujarat. *Man Environ.* **2013**, *38*, 10–45.
16. Bhan, K.K. Pastoralism in Late Harappan Gujarat, western India: An ethnoarchaeological approach. In *Linguistics, Archaeology and the Human Past*; Osada, T., Uesugi, A., Eds.; Research Institute for Humanity and Nature: Kyoto, Japan, 2011; pp. 1–27.
17. Ajithprasad, P.; Sonawane, V.H. The Harappa culture in North Gujarat: A regional paradigm. In *Linguistics, Archaeology and the Human Past*; Osada, T., Uesugi, A., Eds.; Research Institute for Humanity and Nature: Kyoto, Japan, 2011; pp. 223–269.
18. Sonawane, V.H. Early farming communities of Gujarat, India. *Indo-Pac. Prehist. Assoc. Bull.* **2000**, *19*, 137–146.
19. Madella, M.; Ajithprasad, P.; Lancelotti, C.; Rondelli, B.; Balbo, A.L.; French, C.A.I.; Rodríguez, D.; García-Granero, J.J.; Yannito, V.; Rajesh, S.V.; *et al.* Social and environmental transitions in arid zones: The North Gujarat Archaeological Project—NoGAP. *Antiq. Proj. Gallery* **2010**, *84*, 1–4.
20. Lancelotti, C.; Caracuta, V.; Fiorentino, G.; Madella, M.; Ajithprasad, P. Holocene monsoon dynamics and human occupation in Gujarat: Stable isotopes analyses on plant remains. *J. Multidiscip. Stud. Archaeol.* **2013**, *1*, 288–300.
21. Madella, M.; Rondelli, B.; Lancelotti, C.; Balbo, A.; Zurro, D.; Campillo, X.R.; Stride, S. Introduction to simulating the past. *J. Archaeol. Method Theory* **2014**, doi:10.1007/s10816-014-9209-8.
22. Conesa, F.C.; Madella, M.; Galiatsatos, N.; Balbo, A.L.; Rajesh S.V.; Ajithprasad, P. CORONA photographs in monsoonal semi-arid environments: Addressing archaeological surveys and historic landscape dynamics over north Gujarat, India. *Archaeol. Prospect.* **2014**, doi:10.1002/arp.1498.
23. Balbo, A.L.; Rubio-Campillo, X.; Rondelli, B.; Ramírez, M.; Lancelotti, C.; Torrano, A.; Salpeteur, M.; Lipovetzky, N.; Reyes-García, V.; Montañola, C.; *et al.* Agent-based simulation of Holocene Monsoon precipitation patterns and hunter-gatherer population dynamics in semi-arid environments. *J. Archaeol. Method Theory* **2014**, *21*, 426–446.

24. Maurya, D.M.; Thakkar, M.G.; Khonde, N.; Chamyal, L.S. Geomorphology of the Little Rann of Kachchh, W. India: Implication for basin architecture and Holocene palaeo-oceanographic conditions. *Z. Für Geomorphol.* **2009**, *53*, 69–80.
25. Juyal, N.; Chamyal, L.S.; Bhandari, S.; Bhushan, R.; Singhvi, A.K. Continental record of the southwest monsoon during the last 130 ka: Evidence from the southern margin of the Thar Desert, India. *Quat. Sci. Rev.* **2006**, *25*, 2632–2650.
26. Srivastava, P.; Juyal, N.; Singhvi, A.K.; Wasson, R.J.; Bateman, M.D. Luminescence chronology of river adjustment and incision of Quaternary sediments in the alluvial plain of the Sabarmati River, north Gujarat, India. *Geomorphology* **2001**, *36*, 217–229.
27. Juyal, N.; Kar, A.; Rajaguru, S.N.N.; Singhvi, A.K. Luminescence chronology of aeolian deposition during the Late Quaternary on the southern margin of Thar Desert, India. *Quat. Int.* **2003**, *104*, 87–98.
28. Attri, S.D.; Tyagi, A. *Climate profile of India*; India Meteorological Department: New Delhi, India, 2010.
29. Singhvi, A.K.; Williams, M.J.; Rajaguru, S.N.; Misra, V.N.; Chawla, S.; Stokes, S.; Chauhan, N.; Francis, T.; Ganjoo, R.K.; Humphreys, G.S. A 200 ka record of climatic change and dune activity in the Thar Desert, India. *Quat. Sci. Rev.* **2010**, *29*, 3095–3105.
30. Sareen, B.K.; Tandon, S.K.; Bhola, A.M. Slope-deviatory alignment, stream network and lineament orientation of the Sabarmati River system-Neotect. *Curr. Sci.* **1993**, *64*, 827–836.
31. Liu, Z.; Otto-Bliesner, B.; Kutzbach, J.; Li, L.; Shields, S. Coupled climate simulation of the evolution of global monsoons in the Holocene. *J. Clim.* **2003**, *16*, 2472–2490.
32. McIntosh, J.R. *The Ancient Indus Valley: New Perspectives*; ABC-CLIO: Santa Barbara, CA, USA, 2008.
33. Dixit, A.K. Agriculture in a high growth state: Case of Gujarat (1960 to 2006). *Econ. Polit. Wkly.* **2009**, *69*, 64–71.
34. Fishman, R.; Jain, M.; Kishore, A. *Patterns of Migration, Water Scarcity and Caste in Rural Northern Gujarat*; International Growth Centre: London, UK, 2013.
35. Ranade, R.; Kumar, M.D.; Management, C.; Projects, L.I. Narmada water for groundwater recharge in north Gujarat. *Econ. Political Wkly.* **2004**, *39*, 3510–3513.
36. Kumar, M.D.; Singhal, L.; Rath, P. Value of groundwater: Case studies in Banaskantha. *Econ. Political Wkly.* **2004**, *39*, 3498–3503.
37. Shah, T.; Bhatt, S.; Shah, R.K.; Talati, J. Groundwater governance through electricity supply management: Assessing an innovative intervention in Gujarat, western India. *Agric. Water Manag.* **2008**, *95*, 1233–1242.
38. Narula, K.; Fishman, R.; Modi, V.; Polycarpou, L. *Addressing the Water Crisis in Gujarat, India*; Columbia Water Center: New York, NY, USA, 2011.
39. Holcomb, D.W.; Shingiray, I. Imaging radar in archaeological investigations: An image processing perspective. In *Remote Sensing in Archaeology*; Wiseman, J., El-Baz, F., Eds.; Springer: New York, NY, USA, 2007; pp. 11–46.
40. Hall, O. Remote sensing in social science research. *Open Remote Sens. J.* **2010**, *3*, 1–16.
41. Lasaponara, R.; Masini, N.; Observation, E. Satellite remote sensing in archaeology: Past, present and future perspectives. *J. Archaeol. Sci.* **2011**, *38*, 1995–2002.

42. Comer, D.C.; Harrower, M.J. *Mapping Archaeological Landscapes from Space*; Springer: New York, NY, USA, 2013; pp. 291–313.
43. Lasaponara, R.; Masini, N. Satellite synthetic aperture radar in archaeology and cultural landscape: An overview. *Archaeol. Prospect.* **2013**, *20*, 71–78.
44. Oberstadler, R.; Hönsch, H.; Huth, D. Assessment of the mapping capabilities of ERS-1 SAR data for flood mapping: A case study in Germany. *Hydrol. Process.* **1997**, *11*, 1415–1425.
45. Martinez, J.M.; Le Toan, T. Mapping of flood dynamics and spatial distribution of vegetation in the Amazon floodplain using multitemporal SAR data. *Remote Sens. Environ.* **2007**, *108*, 209–223.
46. Khan, S.; Hong, Y.; Gourley, J.; Khattak, M.; De Groeve, T. Multi-sensor imaging and space-ground cross-validation for 2010 flood along Indus River, Pakistan. *Remote Sens.* **2014**, *6*, 2393–2407.
47. Grady, D.O.; Leblanc, M.; Gillieson, D.; O’Grady, D. Use of ENVISAT ASAR Global Monitoring Mode to complement optical data in the mapping of rapid broad-scale flooding in Pakistan. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2011**, *15*, 3475–3494.
48. Park, N.; Patel, P.; Srivastava, H.S.; Navalgund, R.R. Use of synthetic aperture radar polarimetry to characterize wetland targets of Keoladeo National Park, Bharatpur, India. *Curr. Sci.* **2009**, *97*, 529–537.
49. Rajawat, A.S., Verma, P.K., Nayak, S.; Rajawat, A.S.; Verma, P.K.; Nayak, S. Reconstruction of paleodrainage network in northwest India: Retrospect and prospects of remote sensing based studies. *Proc. Indian Natn. Sci. Acad.* **2003**, *69*, 217–236.
50. Pirasteh, S.; Rizvi, S.M.A.; Ayazi, M.H.; Safari, H.; Ramli, F.M.; Pradhan, B.; Shattri, M.; Mahmoodzadeh, A.; Pirasteh, S.; Rizvi, S.M.A.; *et al.* Using ERS-1 synthetic aperture radar for flood delineation, Bhuj Taluk, Kuchch District-Gujarat, India. *Int. Geoinform. Res. Dev. J.* **2010**, *1*, 13–22.
51. Rajawat, A.S.; Kumar, R.; Murthy, T.V.R.; Haldar, D.; Chakraborty, A.; Kumar, T.; Sneha, R.; Kumar, H.; Mahapatra, M.; Kundu, S. Initial results using RISAT-1 C-band SAR data. *Curr. Sci.* **2013**, *104*, 490–501.
52. Thakker, P.S.; Bhatnagar, G.C.; Rao, M.K.; Raval, M.H. Mapping of palaeo- channels along the river Sabarmati and Banas in Gujarat using Landsat data. In *Remote Sensing and Archaeology*; Tripathy, A., Ed.; Sundeep Prakashan: New Delhi, India, 2005; pp. 169–175.
53. Rajani, M.B.; Rajawat, A.S. Potential of satellite based sensors for studying distribution of archaeological sites along palaeo channels: Harappan sites a case study. *J. Archaeol. Sci.* **2011**, *38*, 2010–2016.
54. Wright, R.; Hritz, C. Satellite remote sensing imagery: New evidence for site distributions in the upper Indus. In *South Asian Archaeology 2007. Prehistoric Periods*; Frenez, D., Tosi, M., Eds.; Archaeopress: Oxford, UK, 2013; pp. 315–321.
55. Sinha, R.; Yadav, G.S.; Gupta, S.; Singh, A.; Lahiri, S.K. Geo-electric resistivity evidence for subsurface palaeochannel systems adjacent to Harappan sites in northwest India. *Quat. Int.* **2013**, *308–309*, 66–75.
56. Tapete, D.; Cigna, F.; Masini, N.; Lasaponara, R. Prospection and monitoring of the archaeological heritage of Nasca, Peru, with ENVISAT ASAR. *Archaeol. Prospect.* **2013**, *20*, 133–147.

57. Cigna, F.; Tapete, D.; Lasaponara, R.; Masini, N. Amplitude change detection with ENVISAT ASAR to image the cultural landscape of the Nasca region, Peru. *Archaeol. Prospect.* **2013**, *20*, 117–131.
58. Bartsch, A.; Doubkova, M.; Pathe, C.; Sabel, D.; Wagner, W.; Wolski, P. River flow & wetland monitoring with ENVISAT ASAR Global Mode in the Okavango basin and delta. In Proceedings of the Second IASTED Africa Conference Water Resource Management, Gabarone, Botswana, 8–10 September 2008; pp. 152–156.
59. Khan, K.A.; Akhter, G.; Ahmad, Z. Integrated geoscience databanks for interactive analysis and visualization. *Int. J. Digit. Earth* **2011**, *6*, 41–49.
60. Prasad, S.N.; Goyal, S.P.; Rov, P.S.; Singh, S. Changes in wild ass (*Equus hemionus khur*) habitat conditions in Little Rann of Kutch, Gujarat from a remote sensing perspective. *Int. J. Remote Sens.* **1994**, *15*, 3155–3164.
61. Sethi, A. *Gujarat: National Disaster Risk Reduction Portal*; National Institute of Disaster Management: New Delhi, India, 2014.
62. Agarwal, A.; Narain, S. Making water management everybody's business: Water harvesting and rural development in India. *Gatekeep. Ser.* **1999**, *87*, 3–20.
63. Babu, P.V. Geomorphology of the cambay basin. *J. Indian Soc. Photo-Interpret.* **1977**, *5*, 9–17.
64. Bhan, K.K. Cultural development of the prehistoric period in north Gujarat with reference to western India. *South Asian Stud.* **1994**, *10*, 71–90.
65. Patel, A.K. Occupational histories, settlements, and subsistence in western India: What bones and genes can tell us about the origins and spread of Pastoralism. *Anthropozoologica* **2009**, *44*, 173–188.

© 2014 by the authors; licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

6.3. CORONA photographs in monsoonal semi-arid environments: addressing archaeological surveys and historic landscape dynamics over North Gujarat, India

Francesc C. CONESA, Nikolaos GALIATSATOS, Marco MADELLA, Andrea L. BALBO, RAJESH S. V. i P.
AJITHPRASAD

2015, *Archaeological Prospection*, 22, 2:70-90, [DOI: 10.1002/arp.1498](https://doi.org/10.1002/arp.1498)

Archaeological Prospection

Archaeol. Prospect. 22, 75–90 (2015)

Published online 31 October 2014 in Wiley Online Library
(wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/arp.1498

CORONA Photographs in Monsoonal Semi-arid Environments: Addressing Archaeological Surveys and Historic Landscape Dynamics over North Gujarat, India

FRANCESC C. CONESA^{1,2*}, MARCO MADELLA^{1,3,4},
NIKOLAOS GALIATSATOS⁵, ANDREA L. BALBO^{1,2,7}, S. V. RAJESH⁶
AND P. AJITHPRASAD⁷

¹ CaSEs - Complexity and Socio-Ecological Dynamics Research Group

² IMF-CSIC, Spanish National Research Council, C/ Esgipcíaques, 15, 08001, Barcelona, Spain

³ Department of Humanities, Universitat Pompeu Fabra, C/ Ramón Fargas Trias, 25-27, 08005, Barcelona, Spain

⁴ Institució Catalana de Recerca i Estudis Avançats (ICREA)

⁵ Department of Geography, University of Durham, Lower Mountjoy, South Road, Durham DH1 3LE, UK

⁶ Department of Archaeology, University of Kerala, Kariavattom Campus, Kariavattom, 695 581, Thiruvananthapuram, India

⁷ Department of Archaeology and Ancient History, The Maharaja Sayajirao University of Baroda, 390 002, Vadodara, India

ABSTRACT Here we illustrate a ground map approach that uses orthorectified CORONA KH4B images and declassified topographical maps to study historical land-use dynamics and to help planning archaeological survey in the monsoonal semi-arid alluvial plains of North Gujarat, India. In spite of its generalized use in archaeological applications, CORONA photographs have rarely been used in Indian archaeological contexts. The methods discuss a cost-effective and integrated protocol for: (i) obtaining ground control points (GCPs) and orthorectify CORONA photographs when very high-resolution imagery or detailed topographic maps are not available; and (ii) evaluating the integration of declassified datasets into Google Earth Pro for addressing archaeological surveys in remote areas. The merging of CORONA imagery with declassified USA and the former USSR historical military maps provided a picture of the human–environment interaction in North Gujarat of the past 40 years, prior to the intense development of mechanical agriculture and regional irrigation channels. We conclude by identifying the human and climate-induced taphonomical processes that are obliterating a fragile landscape characterized by archaeological scatters located in fossilized sand dunes. Copyright © 2014 John Wiley & Sons, Ltd.

Key words: Remote sensing; CORONA photographs; Indian archaeology; semi-arid landscapes; irrigation; archaeological survey

Introduction

This research aims at exploring a cost-effective protocol that integrates CORONA photographs and declassified maps for a better understanding of landscape modifications in modern times (past 40 years) in highly sensitive semi-arid monsoonal environments with an important archaeological heritage.

North Gujarat offers ideal settings for the study of social and environmental transitions using a remote-sensing-based approach. Being one of the driest regions in northwestern India, Gujarat is highly sensitive to changes in Indian Summer Monsoon precipitation patterns (Khadkikar *et al.*, 1999; Chamyal *et al.*, 2003; Sharma *et al.*, 2011). Present-day landscape, although greatly anthropological, has preserved geomorphological features closely related to past human settlements, such as relict sand dunes and interdune floodable areas (Ajithprasad, 2004; Bhan, 2011). Population expansion, economic growth and

* Correspondence to: F. C. Conesa, Complexity and Socio-Ecological Dynamics (CaSEs), IMF, Spanish National Research Council (IMF-CSIC), C/ Esgipcíaques, 15, 08001 Barcelona, Spain. E-mail: francesc.cecilia@imf.csic.es

development in Gujarat has increased over the past 60 years (Dholakia, 2007), resulting in a large and expanding industrial sector, urban settlements, highly mechanized agricultural practices and the construction of a dense infrastructure (e.g. irrigation canals, roads and power lines). In this environment, characterized by generally poor archaeological preservation, these landscape modifications have produced changes in soil management strategies that are accelerating taphonomical processes, further reducing archaeological visibility and hampering preservation.

In order to assess the impact of development and modernization for archaeological heritage, several studies have highlighted the potential offered by CORONA photographs, one of the earliest declassified satellite programmes with original high-resolution images dating back as early as the 1960s (see Galiatsatos, 2004; Beck and Philip, 2013; Casana and Cothren, 2013; Fowler, 2013). During the past 20 years CORONA imagery became a valuable tool for detecting different types of obliterated archaeological features (such as Syrian hollow ways or abandoned Iranian pastoral campsites; e.g. Ur, 2003; Alizadeh and Ur, 2007); addressing navigation and mapping in remote areas (such as the alluvial landscape of the Balikh valley in Syria; e.g. Hritz, 2013); and improving photointerpretation and time-change analysis in eroded or damaged landscapes (e.g. Challis *et al.*, 2004; Casana *et al.*, 2012). In spite of this and the claims by Indian scientists about the potential of remote-sensing approaches (Dashora *et al.*, 2006; Rao, 2009; Pappu *et al.*, 2010; Rajani and Rajawat, 2011; Banerjee and Srivastava, 2013), only a few examples exist to date for the use of CORONA photographs in South Asian archaeology (Beck *et al.*, 2007b; Wright and Hritz, 2013).

To overcome this research gap, we discuss an explorative approach that uses orthorectified CORONA KH4B images and declassified USA and former USSR maps to study modern land-use dynamics. The approach is developed with the view of helping the planning of archaeological surveys in the monsoonal semi-arid alluvial plains of northwestern India.

CORONA reconnaissance photographs

CORONA is the programme code for a series of strategic reconnaissance satellites produced and operated by the USA intelligence services. Between 1959 and 1972 several missions were launched, each improving the on-board photogrammetric cameras. In total, the programme acquired over 860 000 frames with a total coverage of between 600 and 750 million square

nautical miles of the Earth's surface (Day *et al.*, 1998; Galiatsatos *et al.*, 2005; Bitelli and Girelli, 2009). In some regions, these photographs represent a bridge between the first aerial photographs taken until the onset of the Cold War in the early 1950s and the development of the first civilian satellites in the 1970s (Deuel, 1969; Collier, 1994; Goossens *et al.*, 2001; Bewley, 2002; Kennedy, 2002; Wilkinson, 2003; Stichelbaut, 2006; Parcak, 2009; recently overviewed by Hanson and Oltean, 2013). In the areas where photogrammetric flights were not carried out until recent times, CORONA photographs represent the earliest information providing the possibility to evaluate landscape-change trajectories and archaeological heritage. The last satellite, named KH4B, is considered to be the most successful design due to the improvements in the geometry and attitude of the camera, the high ground resolution (up to 2 m), and the stereo capabilities for extracting digital elevation models (Galiatsatos *et al.*, 2005).

Since the declassification of the archived files in 1995, CORONA photographs have been used in a variety of research contexts in different regions of the world (Fowler, 2004). Non-archaeological applications mostly deal with geomorphological research (Smith and Pain, 2009), such as the analysis of changes in the Antarctic ice-sheet (Bindschadler and Vornberger, 1998), the detection of coastline variation in Istanbul (Bayram *et al.*, 2004), the mapping of periglacial features in Siberia (Grosse *et al.*, 2005), or the monitoring of erosion slopes in China (Schneider *et al.*, 2001). Applications in semi-arid environments include monitoring tree populations of wadis in Egypt (Andersen, 2006) and the evaluation of monsoon/rainfall impacts for planning new agricultural strategies in Senegal and the Sahel (Tappan *et al.*, 2000; Ruelland *et al.*, 2011). CORONA images also have been used to investigate the dynamics of aeolian sand dunes in arid contexts (Hugenholtz *et al.*, 2012). In South Asia, research has been restricted to applications in tectonic and coastal geomorphology for mapping purposes (Dashora *et al.*, 2006; Rao, 2006).

The main improvements for processing CORONA images have come from studies aimed at developing a rigorous geometric approach for georeferencing the photographs and to extract digital elevation models (DEM) from the stereo capabilities of the images (Altmaier and Kany, 2002; Jacobsen, 2003; Sohn *et al.*, 2004; Hamandawana *et al.*, 2007; Galiatsatos, 2009; Mészáros *et al.*, 2009). These advances were mostly developed within the framework of archaeological research, predominantly in the semi-arid regions of the Near East (Philip *et al.*, 2002; Galiatsatos *et al.*, 2005; Alizadeh and Ur, 2007; Casana and Cothren,

2008; Bitelli and Girelli, 2009; Hall, 2010; Beck and Philip, 2013; Ur, 2013; see also references from the CORONA Atlas Project in Casana and Cothren, 2013) and temperate areas of North/Central Asia (Gheyle *et al.*, 2003; Goossens *et al.*, 2006; Rondelli *et al.*, 2013). Most of these studies aimed at the detection of archaeological features at landscape level, such as tells or ancient hollow roads and pathways, especially in landscapes where features have been damaged or no longer survive (Kennedy, 2002; Ur, 2003, 2013; Wilkinson, 2003; Comfort *et al.*, 2008; Wilkinson *et al.*, 2010; Hritz, 2013; Palmer, 2013). Furthermore, CORONA images have been compared with multispectral signatures from very high-resolution Ikonos imagery for detecting non-tell archaeological sites (Wilkinson *et al.*, 2006; Beck *et al.*, 2007a) and crop marks (Fowler and Fowler, 2005).

From a landscape perspective, historical satellite data have been used for unravelling archaeological landscapes through the detection of relict geomorphological features such as palaeochannels (Challis *et al.*, 2004; Mantellini *et al.*, 2008). In Egypt, CORONA has helped to understand the archaeological landscape of the Middle Nile Valley before the construction of the Aswan Dam (Subias *et al.*, 2013). In Asia, CORONA images have been used recently in Cambodia (Evans and Moylan, 2013) and China (Min, 2013), with a new perspective in heritage focused on evaluating the relationships between archaeological landscape, contemporary populations and current education programmes. For the Greater Indus Valley in particular, CORONA imagery has been used to detect dried-up channels, Harappan settlement mounds, and to define past flow regimes and alluvial terraces in the Upper Indus (Wright, 2010; Wright and Hritz, 2013).

The case study: monsoonal plains of semi-arid North Gujarat

Regional context

North Gujarat is a natural corridor that connects the Kachchh/Indus delta with the Indian subcontinent (see Figure 1). The alluvial plains of North Gujarat extend NE–SW from the foot of the Aravalli Hills to the coast of the Little Rann of Kachchh, which is a marsh area between the lowlands of North Gujarat and the Kachchh peninsula. To the west, the alluvial plains reach the boundary of the Thar Desert. To the east, the limits are the Sabarmati river catchment and the Nal Sarovar depression (Kar, 1993; Tandon *et al.*, 1997). This narrow strip of land has a landscape

characterized by fossilized sand dunes and interdune areas that can become seasonal lakes during the monsoon and post-monsoon seasons. As in other parts of South Asia, many of these interdune depressions were converted into village ponds or irrigation water tanks (Gilliland *et al.*, 2013). The fossilized dune fields are the remains of the Pleistocene maximum extension of the Thar Desert. A significant change in the regional slope has been identified along the 40 m a.s.l. countour line, corresponding to the location of the West Cambay Basin Margin Fault (Figure 2a), which affects the water table and soil formation (Juyal *et al.*, 2003; Balbo *et al.*, 2013). Rivers in North Gujarat flow from the Aravalli Hills (northeast) towards the Rann of Kachchh (southwest). They are seasonal in nature, carrying water only during three to four months of the year, while they are almost dry during low-rainfall episodes (Ranade and Kumar, 2004). Throughout the Holocene diverse human groups occupied this territory characterized by desert retreat, stabilization of dunes and seasonal water resources. In this marginal environment at least three communities were present, with varying degrees of resilience and adaptability: hunter–gatherers, agropastoralists and Harappan urban/village groups (Ajithprasad, 2004, 2011).

Addressing local-scale surveys: a landscape taphonomy perspective

In recent years the region has been the object of an intensive survey programme conducted by several research teams coordinated by the MS University of Baroda (Indus Project, see e.g. Seth *et al.*, 2007; and NoGAP Project, see e.g. Madella *et al.*, 2010). These explorations revealed more than 170 archaeological sites and surface scatters (Figure 2a). Many of these scatters are identified on the basis of the presence/absence of archaeological materials such as microliths, grinding stones, animal bones and pottery. The scatters are generally found on the top and/or higher slopes of the fossilized sand dunes (Figure 2c), in close relation to the seasonal rivers or interdune depressions that are flooded during the Indian Summer Monsoon (Ajithprasad, 2004; Sonawane, 2004). Whereas the alluvial plains of North Gujarat have rich aquifers and groundwater reservoirs, the fossilized dunes have been severely eroded due to 50 years of intensive agriculture (Figure 2d). The rapid demographic and industrial growth after India's independence resulted in a sharp increase in groundwater demand. Well and tube-well groundwater exploitation was promoted by the Green Revolution in the 1970s (Kumar and Singh, 2001; Fayolle and Jaubert, 2007). As a result,

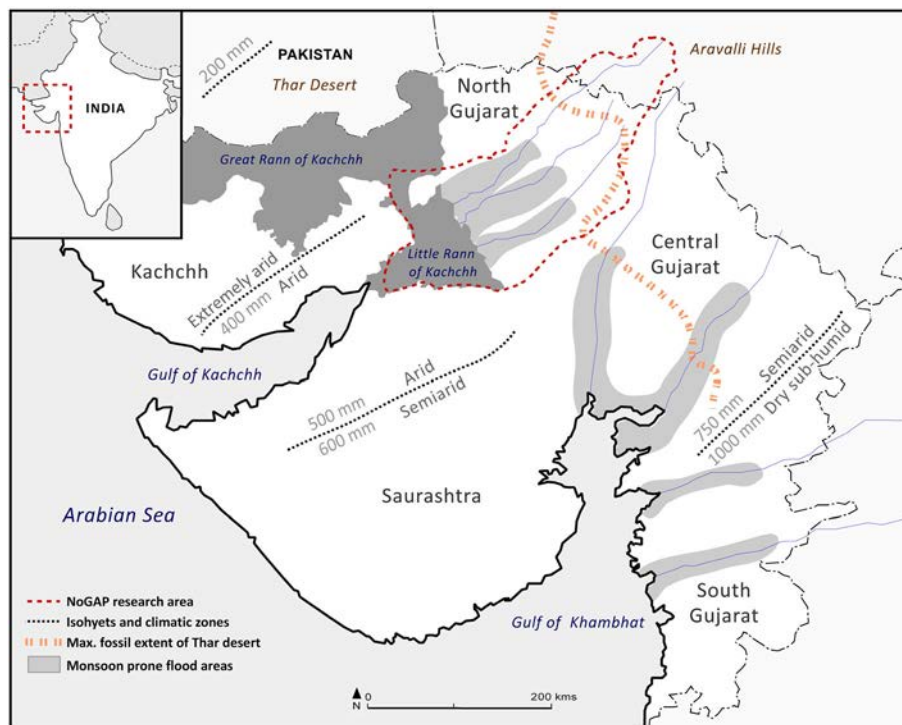


Figure 1. Location map of the North Gujarat Archaeological Project (NoGAP) study area (thick dotted line; inset: Gujarat within India). Flood-prone areas are indicated as medium grey shading along main regional rivers (after Attri and Tyagi, 2010, p. 104). Isohyets and climatic zones are indicated after Juyal *et al.* (2006, p. 2633), whereas the maximum fossil extent of Thar Desert is displayed after Singhvi *et al.* (2010, p. 3096). This figure is available in colour online at wileyonlinelibrary.com/journal/arp

the water table dropped alarmingly and, at present, around 50% of Gujarat's groundwater falls in the overexploited category with an increasing salinity of soils (Prakash, 2008).

Very high-resolution (VHR) satellite imagery (e.g. Ikonos) and medium resolution (MR) imagery (e.g. Landsat and Aster) have been used previously to understand regional geomorphological patterns (see Balbo *et al.*, 2013). However, VHR imagery is often of limited availability due to on-demand cover or excessive cost, whereas MR imagery (although free or inexpensive) has a resolution that is too coarse to address local-scale research questions. In contrast, CORONA photographs offer a low-priced temporal coverage and a reasonably high spatial resolution to understand the significance of irrigation-induced taphonomical processes that shaped the current archaeological evidence beneath the irrigated soils.

In many areas of the world it is not possible to carry out systematic archaeological surveys due to lack of funding or particularly impervious (or difficult) topography or settings (e.g. vegetation cover or climate). In such cases, the integration of CORONA imagery, historical maps and modern satellite imagery provides a base from which to plan the archaeological survey before touching land.

Hence, the method discussed here has two fundamental, interconnected archaeological aims focused on enhancing the forthcoming archaeological surveys: (i) to make available better topographical and taphonomical information in real time (during the survey); and (ii) to facilitate a target survey of the study area.

Methods

Acquisition of CORONA photographs

A series of 14 CORONA KH4B scenes (seven for the aft mode and seven for the forward mode) were the only available images covering our area of interest in the Earth Explorer archives (US Geological Survey (USGS) online platform, www.earthexplorer.usgs.gov). The frames were captured during the last and very successful KH programme mission in May 1972 (mission coded 1117, see Altmaier and Kany, 2002). Since September 2004, negative copies of the original CORONA films are no longer available and the USGS provides only on-demand scanned films, thus reducing processing time and instrumental requirements (Galiatsatos, 2009). The maximum scan resolution available for

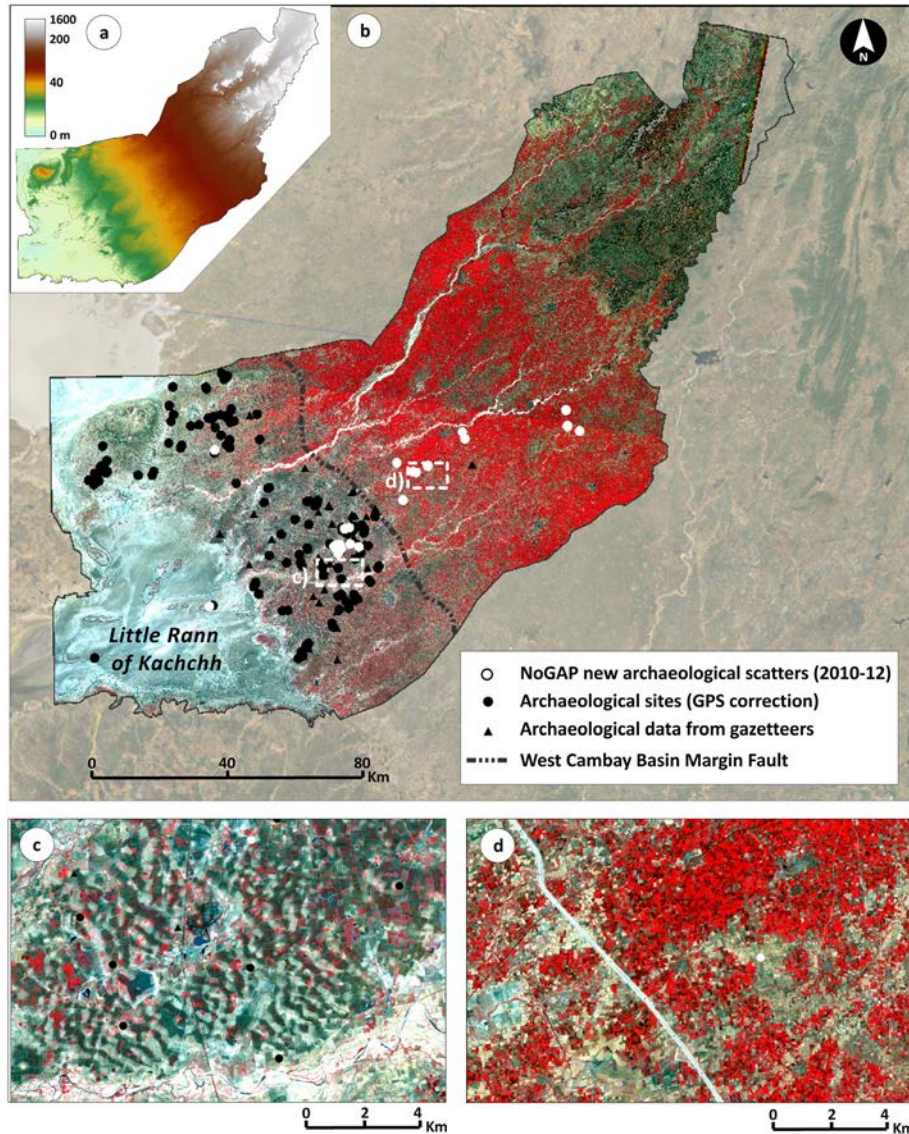


Figure 2. (a) Regional slope gradient (SRTM v4); (b) NoGAP study area (Landsat TM5 false colour composite, 4-3-2, 23 January 2000) with the NoGAP archaeological sites (base map: ESRI World Imagery). Note the boundary marked by the West Cambay Basin Margin Fault; Detailed ASTER false colour composite (3N-2-1, 11 February 2004) showing (c) well-preserved transverse fossilized dunes (bright tones) and (d) healthy irrigated, silty soils (red tones) with presence of eroded dunes near the Narmada main irrigation canal. This figure is available in colour online at wileyonlinelibrary.com/journal/arp

KH4B images is $7 \mu\text{m}$ (3600 dpi), which has proven to be an optimal scan resolution for medium-scale archaeological interpretation (Fowler, 2006; Gheyle *et al.*, 2011). Due to the size of the film (70 cm long) and the modern photogrammetric scanners maximum scanning area ($23 \times 23 \text{ cm}^2$), it is not possible to scan the film in one go; as a result, it is scanned in four overlapping parts. Therefore, the user receives four non-georeferenced subimages (a–b–c–d) for each ordered frame (see Figure 3).

Collection of GCP using a differential global positioning system

Recent trends for the orthorectification of CORONA large scenes tend to avoid collecting high-resolution points on the ground (Galiatsatos *et al.*, 2008), relying solely on available data sources such as Google Earth and Shuttle Radar Topography Mission (SRTM; Casana and Cothren, 2008, 2013; Casana *et al.*, 2012). In this study, however, we provide a set of high-resolution GCPs (centimetric) that

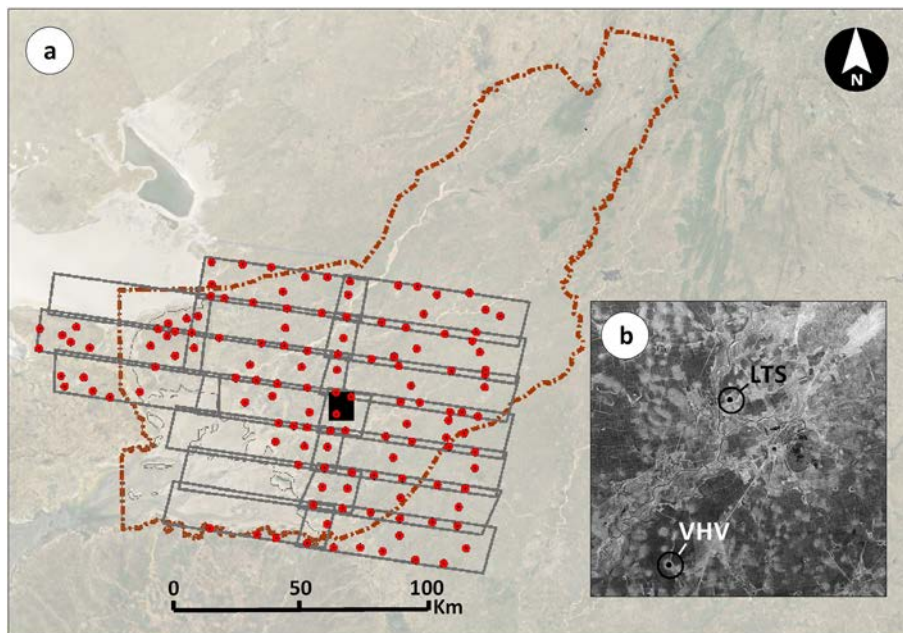


Figure 3. (a) The GCP data collected during the field survey (red points). The image displays the seven CORONA aft frames and the subimages that cover our study area. (b) A non-orthorectified CORONA subset of the selected pilot area: the local landscape along the Khari River with Loteshwar (LTS) and Vaharvo Timbo (VHV) archaeological sites. This figure is available in colour online at wileyonlinelibrary.com/journal/arp

were combined with GCPs (metric) derived from high-resolution imagery available in Google Earth and SRTM data. A subimage small-scale area was selected to address taphonomical questions and long-term landscape dynamics at a local-scale with high geocorrection accuracy. This filmstrip (Figure 3) comprises an important archaeological area that has preserved dome dunes with evidence of seasonal occupations through the Holocene by both hunter-gatherers and agropastoral communities (e.g. the archaeological sites of Loteshwar (LTS) and Vaharvo Timbo (VHV), to which the reader should refer to Madella *et al.*, 2010; Ajithprasad, 2011; Lancelotti *et al.*, 2013). In March and April 2012, a two-week survey was conducted to collect GCPs using a differential global positioning system (DGPS) rover station (see Dashora *et al.*, 2006). We collected 10–15 GCPs per each subimage scene within our study area, primarily in overlapping areas between successive images (Figure 4). This approach was initially designed to derive a robust macroregional dataset of reliable horizontal and elevation coordinates at specific locations, to compensate for the absence of large-scale (i.e. high precision) orthoimages and high-resolution commercial DEMs in our study area.

Orthorectification of CORONA photographs

The selected pilot scene comprises an area of $10 \times 10 \text{ km}^2$ located in the centre of both the aft (154c) and forward

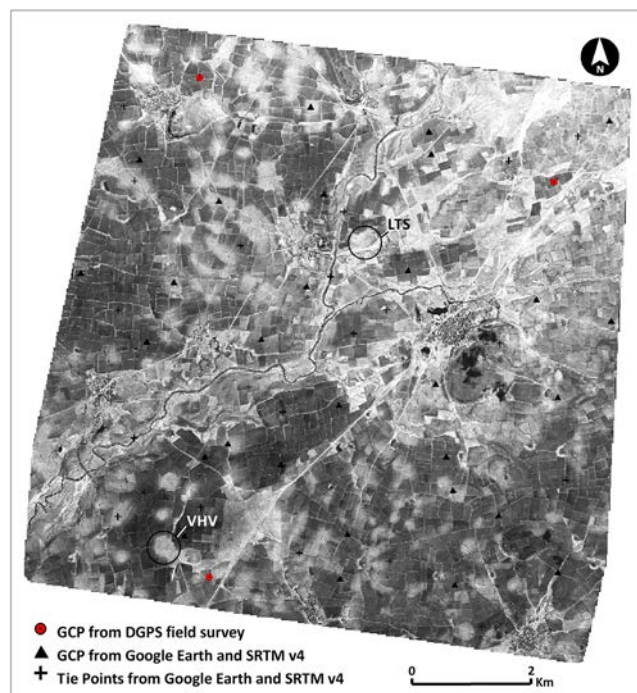


Figure 4. (a) Image shows the aft orthorectified LTS area with the GCP (DGPS, Google Earth GCP and tie points) that enriched the ERDAS LPS orthorectification block. This figure is available in colour online at wileyonlinelibrary.com/journal/arp

(149b) CORONA frames, thus avoiding the film's edge distortion of the CORONA Kh4B panoramic camera (Altmaier and Kany, 2002; Galiatsatos, 2004; Beck *et al.*, 2007b).

The final LTS orthorectified subimage was processed using the Leica Photogrammetry Suite (LPS 2011) software from ERDAS. The LPS orthorectification process needs both aft and forward CORONA scenes for GCP block triangulation adjustment. In order to provide a more robust point dataset, a set of 30 check points for each scene was selected using a combination of Google Earth Pro (for the x , y values) and SRTM for z values (SRTM v4.1, reported to be less than 16 m in Jarvis *et al.*, 2008). So as to improve the triangulation error, 20 tie points for each area were added (see Figure 4). The final orthophotograph resulted in a less than 0.6 unit-weight RMSE, which was improved to 0.020 RMSE after computing automatic tie points. Compared with methods fully relying on remote identification of GCPs (Casana *et al.*, 2012), our method has the potential to improve tenfold the accuracy for the orthorectification of small areas in the central portion of corona scenes.

The USA and former USSR military maps

In the context of the Cold War, contemporary with the development of the CORONA spy program, the army map services from the USA and former USSR produced high-precision topographic maps for reconnaissance purposes. All the maps were based upon field survey and were revised by photo-planimetric methods. These maps (up to 200 000) are publicly available at the University of Texas Library (www.lib.utexas.edu/maps) and in a private distribution website (www.poe.hali.org/maps) and have been used to support CORONA observations and guide archaeological surveys. When used with caution, such resources constitute an excellent aid for planning archaeological surveys and understanding landscape transformations (Galiatsatos, 2004; Menze *et al.*, 2006; Balbo *et al.*, 2013).

Data integration: improving surveys in real-time

Orthorectified datasets can be easily integrated into Google Earth Pro to improve archaeological surveys in areas where maps or aerial photographs are difficult to access or that have problems of logistical or political access, such as in present-day Syria (Hritz, 2013), Afghanistan (Thomas *et al.*, 2008) and many parts of South Asia (Beck *et al.*, 2007b). Although Google Earth has become a tool commonly used to obtain a first glance into archaeological landscapes and planning field surveys (Beck, 2006; Ur, 2006; Myers, 2010; Kaimaris *et al.*, 2011), its application in developing countries such as India has only recently been utilized (Balbo *et al.*, 2013; Thakuria *et al.*, 2013).

The use of declassified maps has provided a valuable source of topographical information contemporary to the CORONA imagery (i.e. identification of villages and local topography, roads and train lines, height points, contour lines and land-use information), more coherent than that appearing in modern maps of the region (Figure 5). We used a two-step approach to improve the real-time topographical information. First we enriched the topographical information of the CORONA imagery by using topographical maps contemporaneous to the imagery. Second, we integrate the orthorectified CORONA imagery and the topographical maps into a version of Google Earth Pro enhanced with a real-time off-line memory cache using the free tool Google Earth Voyager (GEV 6.0) software. Google Earth Pro licence was granted through the Google Earth Outreach educational licenses (<http://goo.gl/pSCIHe>). This integrated approach provides a cost-effective, easy to use, real-time mobile application to assess significant land-use changes and to address archaeological fieldwork in remote areas.

Landscape dynamics

Land-cover changes

The North Gujarat landscape has remained almost unchanged for the past 50 years in terms of field boundaries, minor roads and tracks. These unaltered rural features allowed us to record an almost perfect matching between selected GCPs from the field, Google Earth Pro and the CORONA images, a requirement for image orthorectification (Galiatsatos, 2004; Lillesand *et al.*, 2008; Casana *et al.*, 2012). On the other hand, CORONA scenes allowed us to detect major changes due to the rapid development of infrastructures, in particular the building of new highways, irrigation channels (see below) and the growth of residential and industrial areas. These works have led to a change in the local land-use strategies, with the appearance of selling topsoil and other activities, such as brick manufacture or industrial exploitation of clay and sand, as stated earlier by Mudrakartha and Madhusoodhanan (2005). The loss of topsoil has resulted in an alarming concern for the preservation of fossilized dunes containing evidence of archaeological materials (Figure 6).

Implications of modern irrigation systems

The land-use patterns that were earlier determined by the availability of surface water (stored in seasonal flooded interdunes or village ponds, in close relation

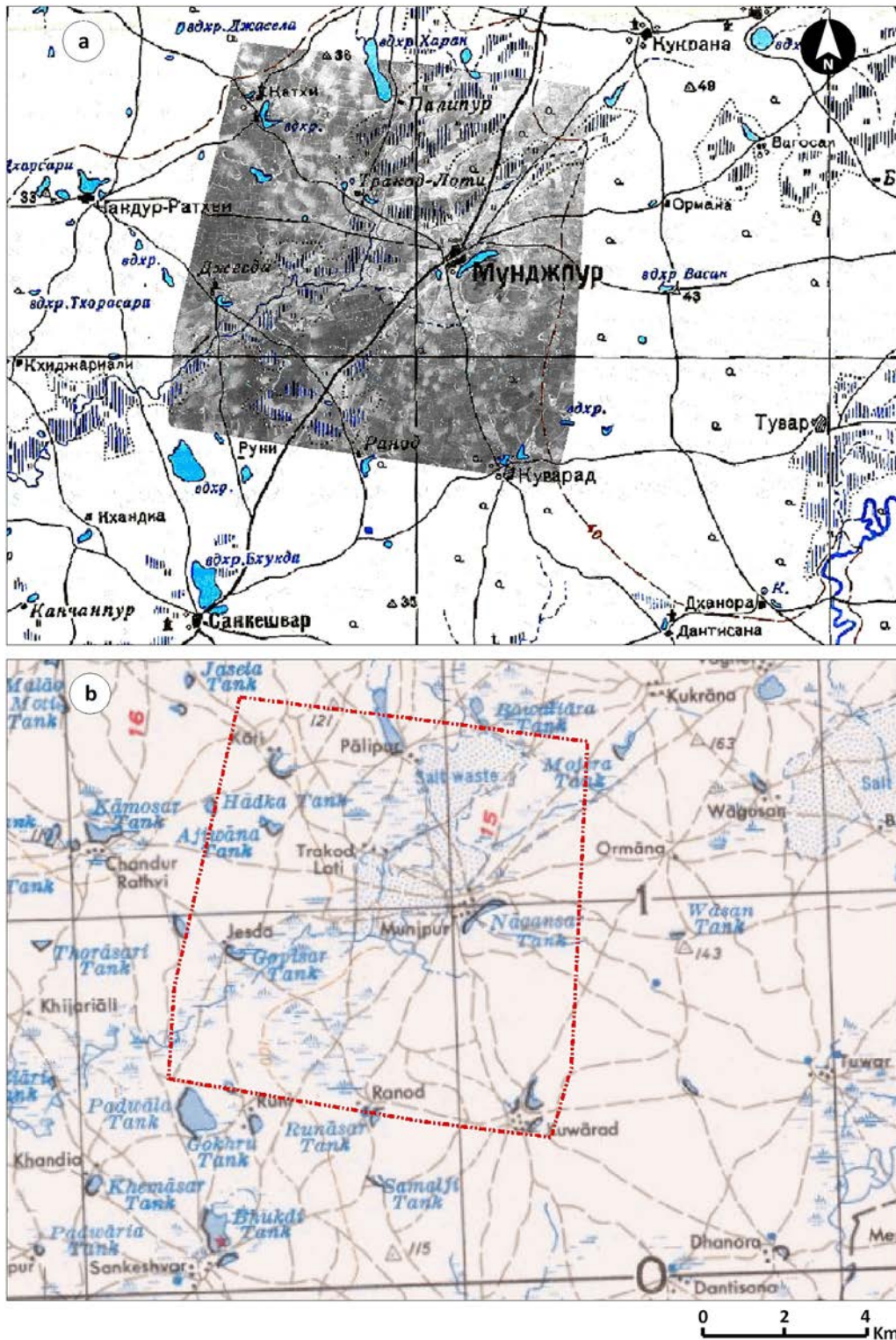


Figure 5. An example of the integration of CORONA photographs and 1950s declassified 200 000 military maps. Both former USSR (image a, overlapped with CORONA) and USA (b) maps enriched the available topographical information. Note the detail of village tanks and seasonal flooded areas, which can be useful where no other geographical information is available in remote areas. This figure is available in colour online at wileyonlinelibrary.com/journal/arp



Figure 6. (a) The foreground shows the non-cultivated surface of Vaharvo Timbo archaeological site. The lowest plain in the background is characterized by interdune fertile soils, locally known as black cotton soils. (b) The top of a fossilized dune affected by sand exploitation activities. This figure is available in colour online at wileyonlinelibrary.com/journal/arp

to archaeological scatters) maintained a fossilized landscape that supported a rural economy based on the local irrigation of farming of food crops and pastoral activities. Due to political disorders in Gujarat through the British Colonial period, the traditional water-management systems were largely abandoned following the introduction of groundwater exploitation (Agarwal and Narain, 1999). In the early 1960s the technology of energized pumps started to enter into the village economy, and during the Green Revolution phase the region slowly moved towards a cash-crop economy based on well irrigation rather than surface irrigation through traditional tanks (Kumar and Singh, 2001; Fayolle and Jaubert, 2007). Within a policy environment of subsidized electricity, the total underground irrigated area has tripled since 1970, mainly as a result of private investments from individual wells (Prakash, 2008). Although North Gujarat is naturally endowed with one of the richest alluvial aquifers of India (Ranade and

Kumar, 2004), its uncontrolled exploitation for irrigation and industry has led to the lowering of the water table and the drying up of traditional wells. The critical state of the aquifer exacerbates to the poorness of surface-water resources characterizing this region, for example rivers and shallow lakes are mostly seasonal. To deal with the problems of water scarcity and salinity in the groundwater table, in the past decade the Government has invested in the creation of large irrigation canals that have altered the monsoonal water dependency in the region. In 2000 the Gujarat authorities approved the construction of the Narmada Main Canal, an ambitious project aimed at constructing the largest irrigation lined canal in the world (www.nri.gujarat.gov.in). The main canal is about 458 km long, originating at the Narmada Dam and running northwest to the Gujarat–Rajasthan border. From the main canal, several secondary canals branch out to the southwest to bring water to the dune

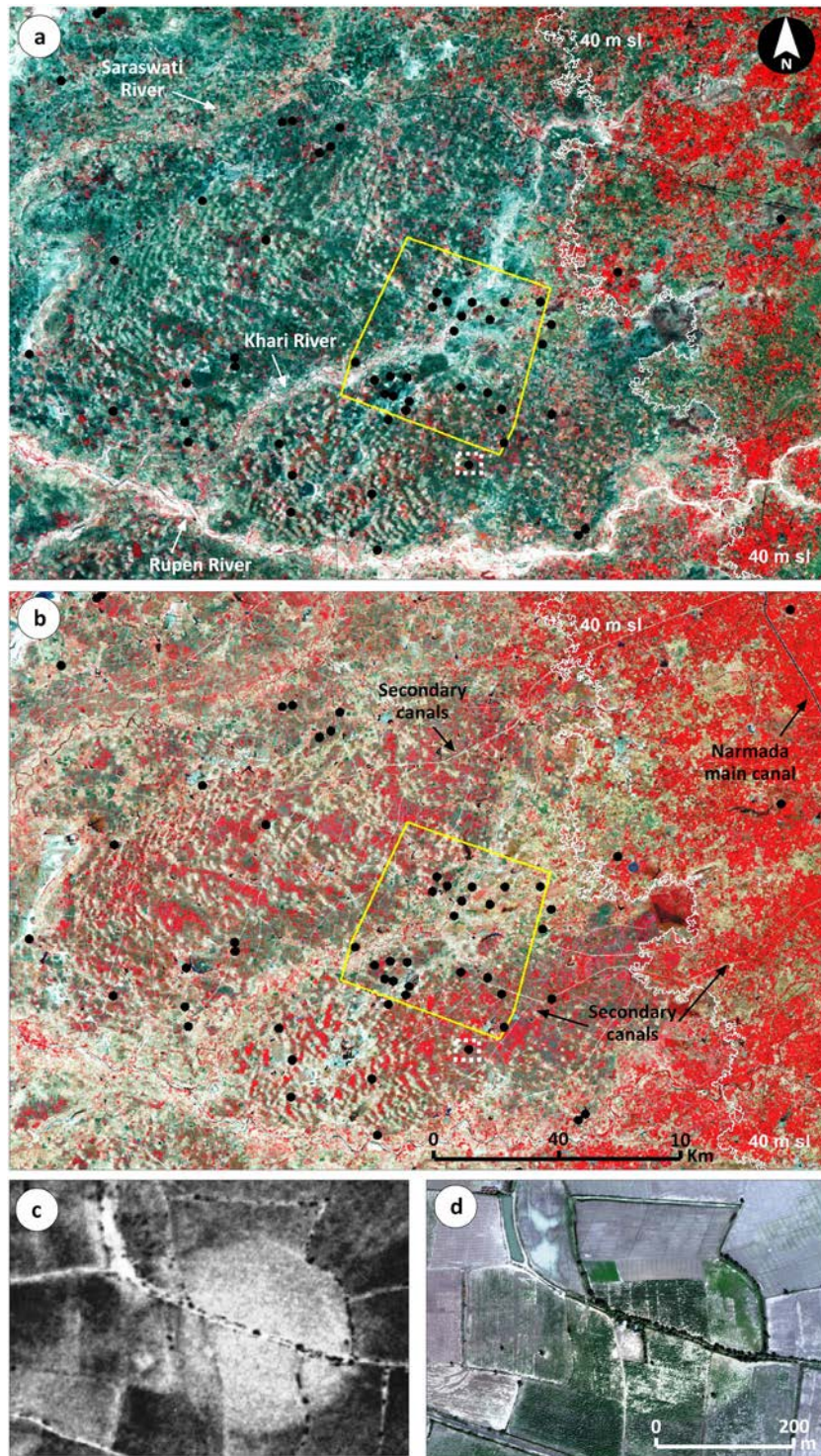


Figure 7. (a) Landsat TM5 false-colour composite (4-3-2, 23 January 2000) showing the alluvial plains between the Saraswati and Rupen rivers before the introduction of the Narmada main canal and secondary canals. Note the healthy vegetation located north of the 40 m asl contour line, in close relation to the West Cambay basin margin fault. (b) Landsat 8 OLI false-colour composite (5-4-3, 29 January 2014) after completion of irrigation channels scheme. Note the spread of vegetation near subcommand areas and the changes in interdune soil properties. (c and d) Example of dune erosion as displayed in CORONA KH4B (1972) and Google Earth Pro (2014). This figure is available in colour online at wileyonlinelibrary.com/journal/arp

and interdune areas. Water flow in the canal began between 2008 and 2010, and progressively altered the water drainage of the area and the natural deposition of sediments. This high water availability and sedimentological change (together with a mechanized approach to cultivation) is changing the traditional economical activities and promoting intensive agriculture as interdune black cotton soils have been enriched in silt and clay (Figure 7a and b). The CORONA photographs can be used to trace these irrigation-induced changes in the command areas within the reach of the canal, where decades of tube-well irrigation and these new developments are becoming of concern for the preservation of fossilized dunes that were well-preserved in the early 1970s (Figure 7c and d).

Detection of relict landscape features with relevance for archaeology

The identification of geomorphological relict features (i.e. fossilized dunes, interdune areas and palaeochannels) using CORONA KH4B photographs provides a means for a better understanding of the archaeological preservation and visibility in the study area. In the 1970s, CORONA offered a spatial resolution of ca. 2 m, much higher than that of contemporary multispectral sensors (e.g. the 80 m resolution provided by the first Multi-Spectral Scanner (MSS) Landsat images). The same resolution was achieved only in the 2000s using electro-optics (EO) technologies. The use of CORONA scenes is therefore needed to detect in detail, for example, changes in agricultural and land-cover conditions,

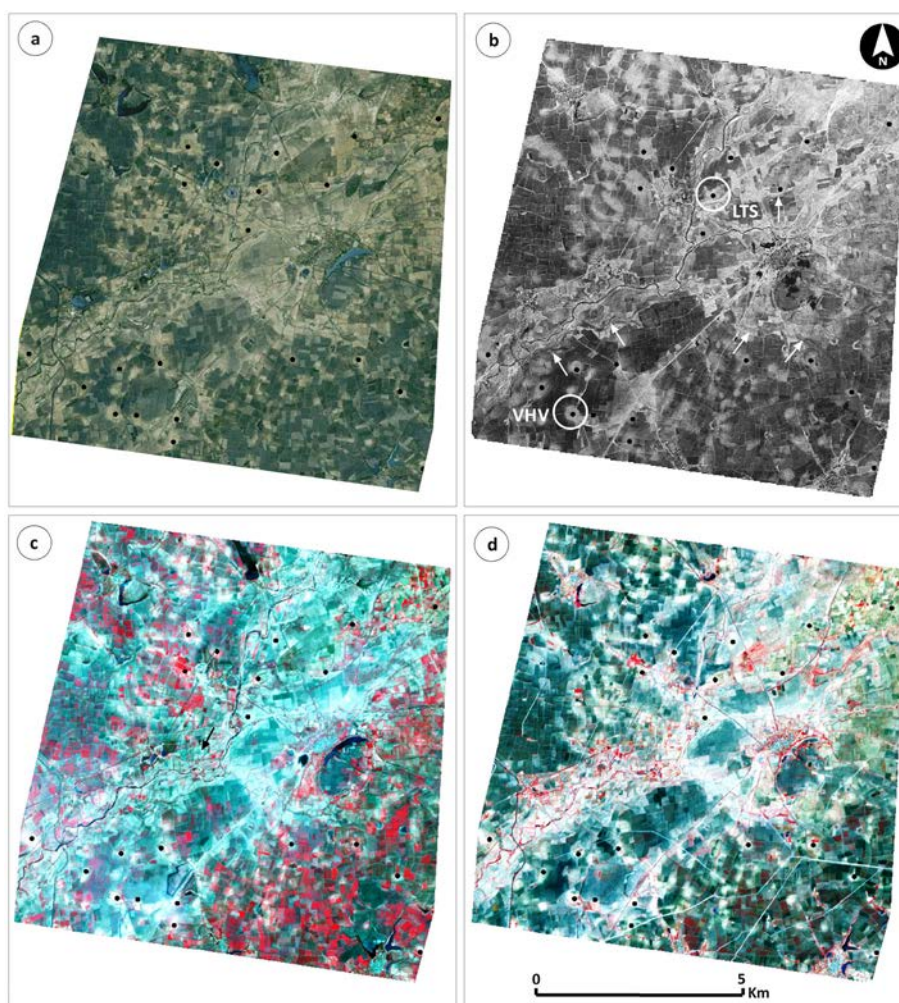


Figure 8. A comparison of four different satellite images showing the local area of Vaharvo Timbo (VHV) and Loteswhar (LTS), where black spots indicate presence of archaeological scatters found on the top of targeted dunes. Arrows indicate river migration areas and dried-up paleochannels in close relation to archaeological scatters. The CORONA orthorectified photographs (b) can enhance high-resolution data and can be used as a complementary coverage for multitemporal and multispectral imagery as seen in (a) the natural colour composite provided by ESRI World Imagery. (c) Aster 3N-2-1, 23 January 2009; and (d) Aster 3N-2-1, 23 March 2013. This figure is available in colour online at wileyonlinelibrary.com/journal/arp

especially in developing regions and semi-arid monsoonal contexts where sharp differences are noted between seasons because of high rainfall variability, and between years due to rapid economic growth (Beck *et al.*, 2007b; Balbo *et al.*, 2013). These two factors are intertwined. For example, although traditionally the main agricultural season in North Gujarat starts after the monsoonal rains (*khariif* or summer season), in recent years there has been an increase in the cultivation of winter crops (*rabi*) supported by modern irrigation techniques (Kumar *et al.*, 2004; Prakash, 2008). Figure 8 shows the study area as seen in different multitemporal satellite datasets. In CORONA KH4B photographs acquired in May 1972 (the very dry period just before the arrival of the monsoon), dark tones represent areas with high soil moisture retention (i.e. interdune areas or dry water tanks), whereas very bright spots represent dunes or relict water courses with related dry shrub vegetation. An example of this colour identification is the VHV and LTS dune–interdune landscape (Figure 8a), in which the alternation of dark and bright tones represents the undulating dunal structure of this landscape. The study area was surveyed by targeting selected locations identified as stabilized dome dunes on satellite images, in which the presence of archaeological evidence was verified through field transects in order to check the reliability of this approach. In contrast, many of the areas ‘devoid’ of archaeology represent dune fields or river migration zones where the archaeological remains have most probably been obliterated by frequent river migration episodes. The resulting wide network of palaeochannels and braided-river sections are easily detected in panchromatic CORONA photographs, whereas in other medium-resolution imagery (e.g. ASTER false colour composites in Figure 8c and d) their traces are difficult to see due to the presence of similar multispectral reflectance in different sand-dominated sediments (i.e. sand dunes and river deposits) or water-retention areas (interdune fields and river banks) with the presence of seasonal crops.

Conclusions

The combined study of CORONA KH4B orthoimages with available historical maps provides assistance for targeted archaeological surveys. The KH4B is the most recent CORONA mission and the most often used in archaeological research, because of its improved resolution. The methods discussed here aimed at testing a standard protocol for obtaining precise orthorectified products from CORONA scenes. The

best results were obtained for small areas of interest located at the centre line of CORONA scenes (i.e. those with the least distortion). The established and less labour intensive semi-automatic approach, relying on GCPs obtained directly from free available datasets or high-resolution modern imagery, should be used when working with full scenes over large areas, with lower precision requirements. The standard orthorectification of CORONA imagery is relatively low in cost and can be done remotely using modern satellite imagery, attaining metric rectification precision. However, a more costly approach implying the recovery on the ground of GCPs becomes critical to reach centimetric rectification precision, a prerequisite for the detection and detailed description of anthropological and related geomorphological features. In fact, CORONA image strips have a high degree of geometric distortion at the edges, which can greatly affect archaeological interpretation.

This contribution aimed at setting the basis for the development of CORONA applications in semi-arid monsoon-dominated regions. Although focused on landscape taphonomy in a small area of North Gujarat characterized by ephemeral and seasonal occupation of fossilized sand dunes or other non-floodable areas, the methodology developed in this work can be applied potentially to the broader region of the Greater Indus Valley, comprising urban archaeological features at sites such as Dholavira, Lothal, Kanmer or Shikarpur, to name but a few.

Acknowledgements

This research was possible thanks to the collaboration between the MS University of Baroda, the IMF-CSIC (Spanish National Research Council) and the Institute of Seismological Research (Government of Gujarat) within the framework of the North Gujarat Archaeological Project (NoGAP) and the SimulPast Project (CSD2010-00034). FC acknowledges funding from a JAE-PreDoc program (Spanish National Research Council and European Social Fund). Access to Landsat, ASTER images and DEMs was granted by NASA–USGS servers (Land Processes Distributed Active Archive Center, United States Geological Survey, www.lpdac.usgs.gov, and Earth Resources Observation and Science Center). Access to Google Earth Pro was granted via the Google Earth Outreach Program. F. C. Conesa wishes to thank P. Ajithprasad from the MS University of Baroda, India, and Girish Kothiyari, Prabhin Sukumaran, R. K. Dumka, Sandip Prajapati and Mohar Singh from the Institute of Seismological Research in Gandhinagar for making possible the GCP survey in North Gujarat. He is also particularly thankful to Marijn Hendrickx from the Department of Geography, Ghent University, for his

useful comments regarding CORONA image processing. Special thanks are due to research staff from the Department of Geography and the Department of Archaeology of Durham University for their encouragement and critical comments during a visitor student period in January–February 2013. We thank Bernardo Rondelli and Steve Markofsky for their comments on the research design. We are also particularly appreciative of the two anonymous reviewers who have significantly improved the manuscript.

References

- Agarwal A, Narain S. 1999. *Making Water Management Everybody's Business: Water Harvesting and Rural Development in India*. International Institute for Environment and Delevopment: London.
- Ajithprasad P. 2004. Holocene adaptations of the mesolithic and chalcolithic settlements in North Gujarat. In *Monsoon and Civilizations*, Yasuda Y, Shinde V (eds). Roli Books: New Delhi; 115–132.
- Ajithprasad P. 2011. Chalcolithic cultural patterns and the early Harappan interaction in Gujarat. In *Cultural Relations between the Indus and the Iranian Plateau during the Third Millenium BCE*, Osada T, Witzel M (eds). Harvard Oriental Series: Cambridge, MS; 11–42.
- Alizadeh K, Ur JA. 2007. Formation and destruction of pastoral and irrigation landscapes on the Mughan Steppe, north-western Iran. *Antiquity* **81**: 148–160.
- Altmaier A, Kany C. 2002. Digital surface model generation from CORONA satellite images. *Photogrammetry and Remote Sensing* **56**: 221–235.
- Andersen GL. 2006. How to detect desert trees using corona images: Discovering historical ecological data. *Journal of Arid Environments* **65**: 491–511.
- Attri SD, Tyagi A. 2010. *Climate profile of India*. India Meteorological Department, Ministry of Earth Sciences: New Delhi.
- Balbo AL, Rondelli B, Cecilia Conesa F, et al. 2013. Contributions of geoarchaeology and remote sensing to the study of Holocene hunter-gatherer and agro-pastoral groups in arid margins: The case of North Gujarat (Northwest India). *Quaternary International* **308–309**: 53–65.
- Banerjee R, Srivastava PK. 2013. Reconstruction of contested landscape: Detecting land cover transformation hosting cultural heritage sites from Central India using remote sensing. *Land Use Policy* **34**: 193–203.
- Bayram B, Bayraktar H, Helvacı C, Acar U, Faculty CE, Istanbul U. 2004. Coast line change detection using CORONA, SPOT, and IRS 1d Images. *XXth Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, Istanbul, 12–23 July 2004, Commission VII, WG VII/3; 437–441.
- Beck A. 2006. Google Earth and World Wind: remote sensing for the masses? *Antiquity Gallery* **080**(308).
- Beck AR, Philip G. 2013. The archaeological exploitation of declassified satellite photography in semi-arid environments. In *Archaeology from Historical Aerial and Satellite Archives*, Hanson WS, Oltean IA (eds). Springer-Verlag: Berlin; 261–278.
- Beck A, Philip G, Abdulkarim M, Donoghue D. 2007a. Evaluation of Corona and Ikonos high resolution satellite imagery for archaeological prospection in western Syria. *Antiquity* **81**: 161–175.
- Beck A, Shaw J, Stott D. 2007b. Best practice approaches for applying satellite imagery for landscape archaeological applications: a case study from the World Heritage Site of Sanchi, India. *Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology VII*, Florence, 17–20 September. SPIE Proceedings Vol. 6749: 674905/1-674905/12.
- Bewley R. 2002. Aerial survey: learning from a hundred years of experience? In *Aerial Archaeology*, Bewley R, Raczkowski W (eds). Nato Series, Springer: New York; 11–18.
- Bhan KK. 2011. Pastoralism in Late Harappan Gujarat, western India: an ethnoarchaeological approach. In *Linguistics, Archaeology and the Human Past*, Osada T, Uesugi A (eds). Research Institute For Humanity And Nature: Kyoto; 1–27.
- Bindschadler R, Vornberger P. 1998. Changes in the West Antarctic ice sheet since 1963 from declassified satellite photography. *Science* **279**: 689–692.
- Bitelli G, Girelli VA. 2009. Metrical use of declassified satellite imagery for an area of archaeological interest in Turkey. *Journal of Cultural Heritage* **10**: 35–40.
- Casana J, Cothren J. 2008. Stereo analysis, DEM extraction and orthorectification of CORONA satellite imagery: archaeological applications from the Near East. *Antiquity* **82**(317): 1–18.
- Casana J, Cothren J. 2013. The CORONA Atlas Project: Orthorectification of CORONA satellite imagery and regional-scale archaeological exploration in the Near East. In *Mapping Archaeological Landscapes from Space*, Comer DC, Harrower MJ (eds). Springer: New York; 31–41.
- Casana J, Cothren J, Kalayci T. 2012. Swords into ploughshares: archaeological applications of CORONA satellite imagery in the Near East. *Internet Archaeology* **32**(2). http://intarch.ac.uk/journal/issue32/casana_index.html (accessed 10 October 2014).
- Challis K, Priestnall G, Gardner A, Henderson J, Hara S. 2004. Corona remotely-sensed imagery in dryland archaeology: the Islamic city of al-Raqqā, Syria. *Journal of Field Archaeology* **29**: 139–153.
- Chamyal LS, Maurya DM, Raj R. 2003. Fluvial systems of the drylands of western India: a synthesis of Late Quaternary environmental and tectonic changes. *Quaternary International* **104**: 69–86.
- Collier P. 1994. Innovative military mapping using aerial photography in the First World War: Sinai, Palestine and Mesopotamia 1914–1919. *The Cartographic Journal* **31**: 100–104.
- Comfort A, Abadie-reynal C, Ergeç R, Ergeç R. 2008. Crossing the Euphrates in antiquity: Zeugma seen from space. *Anatolian Studies* **50**: 99–126.
- Dashora A, Sreenivas B, Lohani B, Malik JN, Shah AA. 2006. GCP collection for corona satellite photographs: Issues and methodology. *Indian Society of Remote Sensing* **34**: 153–160.
- Day DA, Logsdon JM, Latell B (eds). 1998. *Eye in the SKy: The Story of the Corona Spy Satellites*. Smithsonian Institution Press: Washington, DC.

- Deuel L. 1969. *Flights into Yesterday: The Story of Aerial Archaeology*. St. Martin's Press: New York.
- Dholakia RH. 2007. Sources of economic growth and acceleration in Gujarat. *Economic and Political Weekly* **42**: 770–778.
- Evans D, Moylan E. 2013. Pixels, ponds and people: mapping archaeological landscapes in Cambodia using historical aerial and satellite imagery. In *Archaeology from Historical Aerial and Satellite Archives*, Hanson WS, Oltean IA (eds). Springer: New York; 291–313.
- Fayolle Y, Jaubert R. 2007. *Water management in the semi-arid margins of Gujarat: NGOs, user groups and water rights*. Workshop on "Legal Aspects of Water Sector Reforms", Geneva, 20–12 April. International Environmental Law Research Centre.
- Fowler MJF. 2004. Archaeology through the keyhole: the serendipity effect of aerial reconnaissance revisited. *Interdisciplinary Science Reviews* **29**: 118–134.
- Fowler JF. 2006. Modelling the acquisition times of CORONA KH-4B satellite photographs. *AARGnews* **33**: 34–40.
- Fowler JF. 2013. Declassified intelligence satellite photographs. In *Archaeology from Historical Aerial and Satellite Archives*, Hanson WS, Oltean IA (eds). Springer: New York; 47–66.
- Fowler MJF, Fowler YM. 2005. Detection of archaeological crop marks on declassified CORONA KH-4B intelligence satellite photography of southern England. *Archaeological Prospection* **12**: 257–264.
- Galiatsatos N. 2004. *Assessment of the CORONA series of satellite imagery for landscape archaeology*. Unpublished PhD dissertation, University of Durham.
- Galiatsatos N. 2009. The shift from film to digital product: focus on CORONA imagery. *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation* **3**: 247–258.
- Galiatsatos N, Donoghue DNM, Philip G. 2005. An evaluation of the stereoscopic capabilities of CORONA declassified spy satellite image data. *25th EARSeL Symposium, Workshop on 3D Remote Sensing*, Porto, 6–9 June.
- Galiatsatos N, Donoghue DNM, Philip G. 2008. High resolution elevation data derived from stereoscopic CORONA imagery with minimal ground control: an approach using IKONOS and SRTM data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **74**: 1093–1106.
- Gheyle W, Trommelmans R, Bourgeois J, et al. 2003. Evaluating CORONA: A case study in the Altai Republic (South Siberia). *Antiquity* **78**: 391–403.
- Gheyle W, Bourgeois J, Goossens R, Jacobsen K. 2011. Scan problems in digital CORONA satellite images from USGS Archives. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **77**: 1257–1264.
- Gilliland K, Simpson I a. A, Adderley WPP, et al. 2013. The dry tank: development and disuse of water management infrastructure in the Anuradhapura hinterland, Sri Lanka. *Journal of Archaeological Science* **40**: 1012–1028.
- Goossens R, De Man J, De Dapper M. 2001. Research to possibilities of Corona-satellite-data to replace conventional aerial photographs in geoarchaeological studies, practised on Sai, Sudan. In *A Decade of Trans-European Remote Sensing Cooperation*, Buchroithner MF (ed). A A Balkema: Leiden, The Netherlands; 257–262.
- Goossens R, De Wulf A, Bourgeois J, Gheyle W, Willems T. 2006. Satellite imagery and archaeology: the example of CORONA in the Altai Mountains. *Journal of Archaeological Science* **33**: 745–755.
- Grosse G, Schirrmester L, Kunitsky VV, Hubberten HW. 2005. The use of Corona images in remote sensing of periglacial geomorphology: an illustration from the NE Siberian coast. *Permafrost and Periglacial Processes* **16**: 163–172.
- Hall O. 2010. Remote Sensing in Social Science Research. *The Open Remote Sensing Journal* **3**: 1–16.
- Hamandawana H, Eckardt F, Ringrose S. 2007. Proposed methodology for georeferencing and mosaicking Corona photographs. *International Journal of Remote Sensing* **28**: 5–22.
- Hanson WS, Oltean IA (eds). 2013. *Archaeology from Historical Aerial and Satellite Archives*. Spie: New York.
- Hritz C. 2013. A malarial-ridden swamp: using Google Earth Pro and Corona to access the southern Balikh valley, Syria. *Journal of Archaeological Science* **40**: 1975–1987.
- Hugenholtz CH, Levin N, Barchyn TE, Baddock MC. 2012. Remote sensing and spatial analysis of aeolian sand dunes: A review and outlook. *Earth-Science Reviews* **111**: 319–334.
- Jacobsen K. 2003. DEM generation from satellite data. In *23rd EARSeL Symposium*, Ghent, 2–5 June.
- Jarvis A, Nelson A, Guevara E. 2008. Hole-filled SRTM for the Globe, Version 4. Available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database (<http://srtm.csi.cgiar.org>).
- Juyal N, Kar A, Rajaguru SNN, K Singhvi. 2003. Luminescence chronology of aeolian deposition during the Late Quaternary on the southern margin of Thar Desert, India. *Quaternary International* **104**: 87–98.
- Juyal N, Chamyal LS, Bhandari S, Bhushan R, Singhvi AK. 2006. Continental record of the southwest monsoon during the last 130ka: evidence from the southern margin of the Thar Desert, India. *Quaternary Science Reviews* **25**: 2632–2650.
- Kaimaris D, Georgoula O, Patias P, Stylianidis E. 2011. Comparative analysis on the archaeological content of imagery from Google Earth. *Journal of Cultural Heritage* **12**: 263–269.
- Kar A. 1993. Neotectonic influences on morphological variations along the coastline of Kachchh, India. *Geomorphology* **8**: 199–219.
- Kennedy D. 2002. Aerial archaeology in the Middle East: the role of the military – past, present and... future? In *Aerial Archaeology*, Bewley R, Raczkowski W (eds). Nato Series, Springer: New York; 33–48.
- Khadkikar AS, Mathew G, Malik JN, Gundu Rao TK, Chowgaonkar MP, Merh SS. 1999. The influence of the South-west Indian monsoon on continental deposition over the past 130 kyr, Gujarat, western India. *Terra Nova* **11**: 273–277.
- Kumar MD, Singh OP. 2001. Market instruments for demand management in the face of scarcity and overuse of water in Gujarat, Western India. *Water Policy* **3**: 387–403.
- Kumar MD, Singhal L, Rath P. 2004. Value of groundwater: case studies in Banaskantha. *Economic and Political Weekly* **39**(31): 3498–3503.

- Lancelotti C, Caracuta V, Fiorentino G, Madella M, Ajithprasad P. 2013. Holocene monsoon dynamics and human occupation in Gujarat: stable isotopes analyses on plant remains. *Journal of Multidisciplinary Studies in Archaeology* **1**: 288–300.
- Lillesand TM, Kiefer RW, Chipman JW. 2008. *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ.
- Madella M, Ajithprasad P, Lancelotti C, et al. 2010. Social and environmental transitions in arid zones: the North Gujarat Archaeological Project – NoGAP. *Antiquity Gallery* **84**(385). <http://antiquity.ac.uk/projgall/madella325> (accessed 10 October 2014).
- Mantellini S, Rondelli B, Stride S. 2008. Analytical approach for representing the water landscape evolution in Samarkand Oasis (Uzbekistan). In *On the Road to Reconstructing the Past: Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA2008)*, 2–6 April, Budapest.
- Menze BH, Ur JA, Sherratt AG. 2006. Detection of ancient settlement mounds: archaeological survey based on the SRTM terrain model. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **72**: 321–327.
- Mészáros M, Szatmári J, Tobak S, Mucsi L. 2009. Extraction of digital surface models from CORONA satellite stereo images. *Journal of Environmental Geography* **1**: 5–10.
- Min L. 2013. Archaeological landscapes of China and the application of Corona images. In *Mapping Archaeological Landscapes from Space*, Comer DC, Harrower MJ (eds). Springer: New York; 45–54.
- Mudrakartha S, Madhusoodhanan MP. 2005. Declining water levels and deteriorating livelihoods. In *Community Management of Groundwater Resources in Rural India: Research Report*, Calow R, Macdonald D (eds). British Geological Survey: Keyworth; 14–27.
- Myers A. 2010. Field Work in the age of digital reproduction: a review of the potentials and limitations of Google Earth for archaeologists. *The SAA Archaeological Record* **42**: 7–11.
- Palmer R. 2013. Uses of declassified Corona photographs for archaeological survey in Armenia. In *Archaeology from Historical Aerial and Satellite Archives*, Hanson WS, Oltean IA (eds). Springer: New York; 279–290.
- Pappu S, Akhilesh K, Ravindranath S, Raj U. 2010. Applications of satellite remote sensing for research and heritage management in Indian prehistory. *Journal of Archaeological Science* **37**: 2316–2331.
- Parcak SH. 2009. *Satellite Remote Sensing for Archaeology*. Routledge: New York.
- Philip G, Donoghue DNM, Beck A, Galiatsatos N. 2002. CORONA satellite photography: an archaeological application from the Middle East. *Antiquity* **76**: 109–118.
- Prakash A. 2008. Political economy of groundwater governance in Gujarat: a micro-level analysis. In *Governance of Water: Institutional Alternatives and Political Economy*, Ballabh V (ed). Sage: New Delhi; 215–236.
- Rajani MB, Rajawat S. 2011. Potential of satellite based sensors for studying distribution of archaeological sites along palaeo channels: Harappan sites a case study. *Journal of Archaeological Science* **38**: 2010–2016.
- Ranade R, Kumar MD. 2004. Narmada water for ground-water recharge in North Gujarat. *Economic and Political Weekly* **July 31**: 3510–3513.
- Rao KN. 2006. Coastal morphodynamics and asymmetric development of the Godavari delta: implications to facies architecture and reservoir heterogeneity. *Journal of the Geological Society of India* **67**: 609–617.
- Rao KN. 2009. CORONA satellite photographs – a new (old) tool. *Journal Geological Society of India* **73**: 425–429.
- Rondelli B, Stride S, García-granero JJ. 2013. Soviet military maps and archaeological survey in the Samarkand region. *Journal of Cultural Heritage* **14**: 270–276.
- Ruelland D, Tribotte A, Puech C, Dieulin C. 2011. Comparison of methods for LUCC monitoring over 50 years from aerial photographs and satellite images in a Sahelian catchment. *International Journal of Remote Sensing* **32**: 1747–1777.
- Schneider T, Jacobsen K, Seitz R, Förster B. 2001. Remote sensing based parameter extraction for erosion control purposes in the Loess Plateau of China. *ISPRS Workshop 'High Resolution Mapping from Space 2001'*, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Universität Hannover; CD.
- Seth H, Patel LC, Varhat B. 2007. Harappan sites in Gujarat. In *Linguistics, Archaeology and the Human Past*, Osada T (ed). Research Institute for Humanity and Nature: Kyoto; 77–110.
- Sharma CS, Behera MD, Mishra A, Panda SN. 2011. Assessing flood induced land-cover changes using remote sensing and fuzzy approach in eastern Gujarat (India). *Water Resources Management* **25**: 3219–3246.
- Singhvi AK, Williams MJ, Rajaguru SN, et al. 2010. A ~200 ka record of climatic change and dune activity in the Thar Desert, India. *Quaternary Science Reviews* **29**: 3095–3105.
- Smith MJ, Pain CF. 2009. Applications of remote sensing in geomorphology. *Progress in Physical Geography* **33**: 568–582.
- Sohn H, Kim H, Yom J. 2004. Mathematical modelling of historical reconnaissance CORONA KH-4B imagery. *The Photogrammetric Record* **19**: 51–66.
- Sonawane VH. 2004. Harappan civilization in Western India with special reference to Gujarat. *Journal of Interdisciplinary Studies in History and Archaeology* **1**: 63–78.
- Stichelbaut B. 2006. The application of First World War aerial photography to archaeology: The Belgian images. *Antiquity* **80**(307): 161–172.
- Subias E, Fiz I, Cuesta R. 2013. The Middle Nile Valley: Elements in an approach to the structuring of the landscape from the Greco-Roman era to the nineteenth century. *Quaternary International* **312**: 27–44.
- Tandon SK, Sareen BK, Someshwar Rao M, Singhvi AK. 1997. Aggradation history and luminescence chronology of Late Quaternary semi-arid sequences of the Sabarmati basin, Gujarat, Western India. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **128**: 339–357.
- Tappan GG, Hadj A, Wood EC, Lietzow RW. 2000. Use of Argon, Corona, and Landsat imagery to assess 30 years of land resource changes in West-Central Senegal. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **66**: 727–735.

- Thakuria T, Padhan T, Mohanty RK, Smith ML. 2013. Google Earth as an archaeological tool in the developing world. An example from India. *The SAA Archaeological Record* **13**(1): 20–24.
- Thomas DC, Kidd FJ, Nikolovski S, Zipfel C. 2008. The archaeological sites of Afghanistan in Google Earth. *AARGnews* **37**: 22–30.
- Ur J. 2003. CORONA satellite photography and ancient road networks: A northern Mesopotamian case study. *Antiquity* **77**(295): 102–115.
- Ur JA. 2006. Google Earth and archaeology. *The SAA Archaeological Record* **6**: 35–38.
- Ur JA. 2013. Spying on the past: declassified intelligence satellite photographs and Near Eastern landscapes. *Near Eastern Archaeology* **76**: 28–36.
- Wilkinson TJ. 2003. *Archaeological Landscapes of the Near East*. University of Arizona Press: Tucson.
- Wilkinson KN, Beck AR, Philip G. 2006. Satellite Imagery as a Resource in the Prospection for Archaeological Sites in Central Syria. *Geoarchaeology* **21**: 735–750.
- Wilkinson TJ, French C, Ur J, Semple M. 2010. The geoarchaeology of route systems in northern Syria. *Geoarchaeology* **25**: 745–771.
- Wright R. 2010. *The Ancient Indus. Urbanism, Economy, and Society*. Cambridge University Press: New York.
- Wright R, Hritz C. 2013. Satellite remote sensing imagery: new evidence for site distributions in the Upper Indus. In *South Asian Archaeology 2007. Prehistoric Periods*, Frenez D, Tosi M (eds). International Series, British Archaeological Reports: Oxford; 315–321.

6.4. Multi-proxy survey of surface archaeological scatters in drylands: the case of North Gujarat, India

Francesc C. CONESA^{1*}, Agustin LOBO², Jonàs ALCAINA³, Andrea BALBO⁴, Marco MADELLA^{1,3,5}, RAJESH S.V.⁶ i P. AJITHPRASAD⁷

2016, enviat a *Quaternary International*, acceptat pendent de revisió.

Està previst que aquest article formi part de l'*Special Issue "Socio-ecology at the small-scale: local manifestations of late Pleistocene/Holocene human and environmental dynamics"*, editat per Steve MAKOFSKY, Marco MADELLA i Francesc C. CONESA

¹CaSEs research group, Department of Humanities, Universitat Pompeu Fabra. C/Ramon Trias Fargas 25-27, 08005 Barcelona, Spain. *Corresponding author; e-mail: fc.conesa@upf.edu

²Institut de Ciències de la Terra Jaume Almera. C/Lluis Solé Sabaris s/n, 08028 Barcelona, Spain. E-mail: Agustin.Lobo@ictja.csic.es

³CaSEs research group, Institució Milà i Fontanals, Spanish National Research Council. C/Egipcíaques, 15. 08001 Barcelona, Spain. E-mail: j.alcaina.m@imf.csic.es

⁴Climate Change i Security Centre for Earth System Research i Sustainability, University of Hamburg, Grindelberg 7, 20144 Hamburg, Germany. E-mail: balbo@cantab.net.

⁵ICREA-Institució Catalana de Recerca i Estudis Avançats. E-mail: marco.madella@icrea.cat

⁶Department of Archaeology, University of Kerala, Kariavattom Campus, Kariavattom, 695 581, Thiruvananthapuram, India. E-mail: rajeshkeraliyan@yahoo.co.in

⁷Department of Archaeology i Ancient History, The Maharaja Sayajirao University of Baroda, 390 002, Vadodara, India. E-mail: ajitkarolil@rediffmail.com

6.4.1. Abstract

Here we present an exploratory methodological approach aimed at refining survey methods for the classification of surface scatters in drylands by 1) the systematic integration of archaeological and physico-chemical proxies from surface scatters and 2) the use of statistical methods (hierarchical clustering and linear discriminant analysis) to reliably classify surface scatters based on such proxies. This approach was applied as a pilot study to mid and late-Holocene surface scatters in North Gujarat, a semi-arid region located at the south-west margin of the Thar Desert in India. Systematic transect surveys were carried out in four relict sand dunes showing different archaeological significance: 1) Vaharvo, a hunter-gatherer occupation area, 2) Gokhijadio, an agro-pastoral scatter, and 3) Loteshwar and Kalrio, representing scatters with and occupations. The classification of the archaeological significance of physico-chemical proxies led to the identification of distinct physico-chemical signatures in the upper portions of the sand dunes, possibly related to different land-use and occupation strategies by different groups. We discuss the potential use of surface physico-chemical proxies to identify distinct cultural soilscares based on anthropic and geogenic signatures in fossilised sand dunes, taking also into account the long-term geomorphological and pedogenic processes that has contributed to the definition of the Quaternary sedimentary history of the area.

6.4.2. Keywords

Holocene, Semi-arid, Dunes, Soilscares, Settlement, Anthropic signatures

6.4.3. Introduction

The most ubiquitous evidence of prehistoric human occupations in arid and semi-arid lands with poor vegetation cover are surface archaeological scatters, which can be easily recognized during field-walking (Gallant 1986; Wandsnider and Camilli 1992; Fanning *et al.* 2001). In desert and near-desert environments surface scatters are often closely related to relict landscape features (e.g. dunes, water bodies and rock outcrops, see Tainter 1979; Fanning *et al.* 2007; Blau *et al.* 2008). These areas, however, are prone to severe erosion and deflation processes from multiple agents (aeolian, alluvial and anthropic) that rework surface sediments (Goudie 2002). In such cases, two major factors limit our capability to identify and interpret past occupations: 1) the limitations in our ability to identify relict physiographic features (e.g. as a consequence of flattening erosive processes), and 2) the formation of mixed palimpsests of exposed archaeological materials, especially in contexts characterised by little sediment accumulation (Read 1986; Brantingham *et al.* 2007).

Archaeological survey has traditionally aimed at the collection of artefacts and ecofacts to create preliminary typo-chronological seriations (Roberts *et al.* 2012). While this approach is useful in some contexts (Vermeulen and Verhoeven, 2006; Kantner, 2008), a shared set of criteria for the systematic classification of surface evidence is lacking for many parts of the world (Bevan *et al.* 2013). Moreover, the classification of surface scatters is hampered by the heterogeneous preservation of different archaeological materials. For instance, lithic and pottery are often the most abundant evidence even though the original assemblages included organic materials and other more perishable remains (Fernández-López de Pablo and Barton 2015). To overcome such limitations, new approaches based on the identification of alternative proxies have been used to improve the significance of archaeological surveys in drylands (Burger *et al.* 2002; Allen *et al.* 2008; Salisbury *et al.* 2013). Geological proxies for instance highlight the importance of physico-chemical descriptors as a proxy of human activity and occupation (Wilson 2011; Salisbury *et al.* 2013; French *et al.* 2014).

Here we present a methodological framework aimed at refining survey methods for the classification of surface scatters in drylands by 1) the systematic integration of archaeological and physico-chemical proxies from surface scatters and 2) the use of statistical methods to reliably classify surface scatters

based on such proxies. This approach was applied as a pilot study to mid and late-Holocene surface scatters in North Gujarat, a semi-arid region located at the SE margin of the Thar Desert in India.

6.4.4. Archaeological survey in North Gujarat

Regional settings

North Gujarat is a semi-arid ecotone between the Thar Desert on the NW and the Sabarmati River on the SE. This is one of the driest ecoregions in India and it is highly sensitive to the shifts of the Indian Summer Monsoon. The ephemeral West Banas, Saraswati, Rupen and Khari rivers cross the three main physiographic units in the area, flowing NE-SW (Figure 1). These units are 1) the Aravalli Hills, 2) the Quaternary fluvio-aeolian plains and 3) the *Little Rann* of Kachchh, a broad saline and marshy intertidal estuary. Fossilised sand dunes are widespread along the fluvio-aeolian plains. They are Late Pleistocene (ca. 100 to 14 kyr ago) relict features of the maximum SW extension of the Thar Desert, which acquired its present dimensions between ca. 13 kyr to 5 kyr following the Holocene configuration of monsoonal circulation (Goudie *et al.* 1973; Balbo *et al.* 2013; Raj *et al.* 2015).

Archaeological background

In recent years North Gujarat has been intensively surveyed (Madella *et al.* 2010; Ajithprasad 2011; Rajesh and Krishnan 2014), reporting more than 200 archaeological surface scatters, mostly found on the top of fossilised dunes (Sonawane 2000; Bhan 2011). The archaeological evidence attests the presence of:

- (1) Hunter-gatherers (ca. 8 to 5 kyr BP)
- (2) Agropastoral groups, classified based on their material culture in (2a) the Anarta, based on a regional chalcolithic pottery tradition (ca. 5 to 3 kyr BP), and (2b) the Harappan, reflecting the expansion and decline of the Indus Valley civilisation (ca. 4 to 3 kyr BP).
- (3) Groups with regional manifestations of the Indus Valley traditions (Bhan 1994; Sonawane 2002; Ajithprasad 2004; Sonawane 2004; Ajithprasad 2011; Rajesh *et al.* 2013a, 2013b).

6.4. MULTI-PROXY SURVEY OF SURFACE ARCHAEOLOGICAL SCATTERS

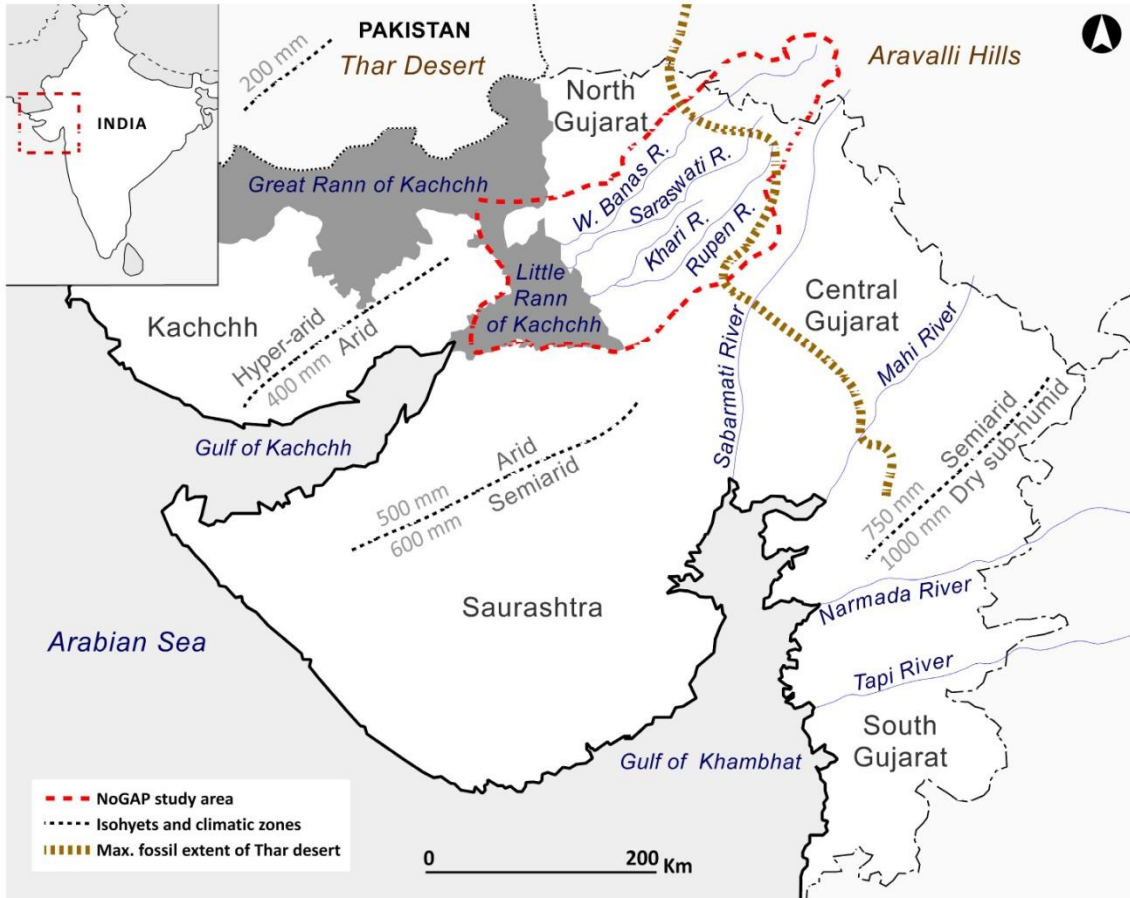


Figure 1. Location map of the study area. Isohyet lines and climatic zones are from Juyale *et al.* (2006), and the maximum fossil extent of Thar Desert is after (Singhvi and Kar 2004).

Until recently, the classification of surface materials has been based on the characterisation of lithic and pottery types. While an extensive stylistic corpus could be drawn for Harappan typo-chronological sherds (Chase *et al.* 2014a; Rajesh and Krishnan 2014), little variation in lithic production over millennia has hampered a straightforward typo-chronological characterisation (Gadekar *et al.* 2014). In addition, Patel (2009) has demonstrated that the absence of pottery cannot be univocally associated with hunter-gatherers. Furthermore, there is a lack of consistency in the description of archaeological materials, and the situation is being aggravated by the accelerated spread of mechanised agricultural activities, irrigation infrastructures and soil salinization (Shah 2014), all contributing to the masking and mixing of archaeological evidence.

6.4.5. Materials and methods

Surface archaeological scatters

The present work extends previous regionally-based research carried out within the North Gujarat Archaeological Project (Madella *et al.* 2010; Balbo *et al.* 2013; Conesa *et al.* 2014; Conesa *et al.* 2015) by narrowing the focus to the local scale (the dune), and by using physico-chemical data and statistics to identify surface sediment signatures of specific anthropic occupations. As a pilot experiment, we selected four dunes located within the Khari River basin, representing hunter-gatherer (HG) occupation (one scatter), agropastoral (AP) occupation (one scatter), and mixed HG/AP occupations (two scatters).

HG scatter: Vaharvo

Vaharvo is a dome dune situated near a seasonally inundated depression and surrounded by fertile alluvium plains (Figure 2a). The site was first reported in the early 1980s (Bhan 1994) and was excavated by the NoGAP team in 2011. Two 4x4 m trenches were excavated in 2011, showing an aceramic HG occupation, including the remains of three pits. The HG levels were AMS dated to c. 5600-5000 cal BC (García-Granero *et al.* 2015).

AP scatter: Gokhijadio

Gokhijadio was reported in the early 1990s (Bhan 1994) and was revisited several times due to its abundance of regional Anarta artefacts (Ajithprasad 2011), although the dune was never excavated (Figure 2b).

Mixed HG/AP scatters: Loteshwar and Kalrio

Loteshwar is a prominent dune on the right bank of the Khari River that was first excavated in the early 1990s and then by the NoGAP team in 2009 (Figure 2c). The dune presents an aceramic HG occupation with superimposed Anarta deposits. Loteshwar is one of the earliest Holocene HG occupations attested in north-western India (7168 to 4703 cal BC), while animal bones indicate the local domestication of *Bos indicus* (zebu) by Anarta groups (3861 to 2243 cal BC) prior to the

establishment of urban Harappan communities in the region (Patel 2009; Ajithprasad and Sonawane 2011).

Kalrio lies 600 m southwest of Loteshwar. The dune is located at the confluence of the Khari River and its right-bank affluent, the Orumana River (Figure 2d). The surrounding interdune fields are mostly filled with fluvial deposits from the Orumana migrations. The dune was reported as an aceramic microlithic site in the early 1990s (Bhan 1994) and it has never been excavated.

Dune transects and sampling strategy

Linear transects were set up in each of the four sites along the dune slope following a catena classification of the dune (Figure 2e). Each transect was centred on the topographical high point of the dune and the orientation was chosen to include the majority of surface clusters identified in previous surveys. Sampling spots of one square meter were placed along the sampling transect at regular intervals; every 5 m for the first 50 m from the dune top and every 10 m for the rest of the transect until reaching the nearest depression (i.e. interdune or water body). This approach was chosen to optimise fieldwork while accounting for areas with the highest archaeological concentrations. For each sampling square, surface materials were systematically collected, described, counted and weighed. In addition, *in situ* semi-qualitative surface sediment observations were made (i.e. Munsell colour, texture and grain size) as well as land cover classification (i.e. vegetation/land use type and cover). In addition, a surface sediment samples (ca. 10g) was taken from the centre of each sampling square for physico-chemical analyses.

6.4. MULTI-PROXY SURVEY OF SURFACE ARCHAEOLOGICAL SCATTERS

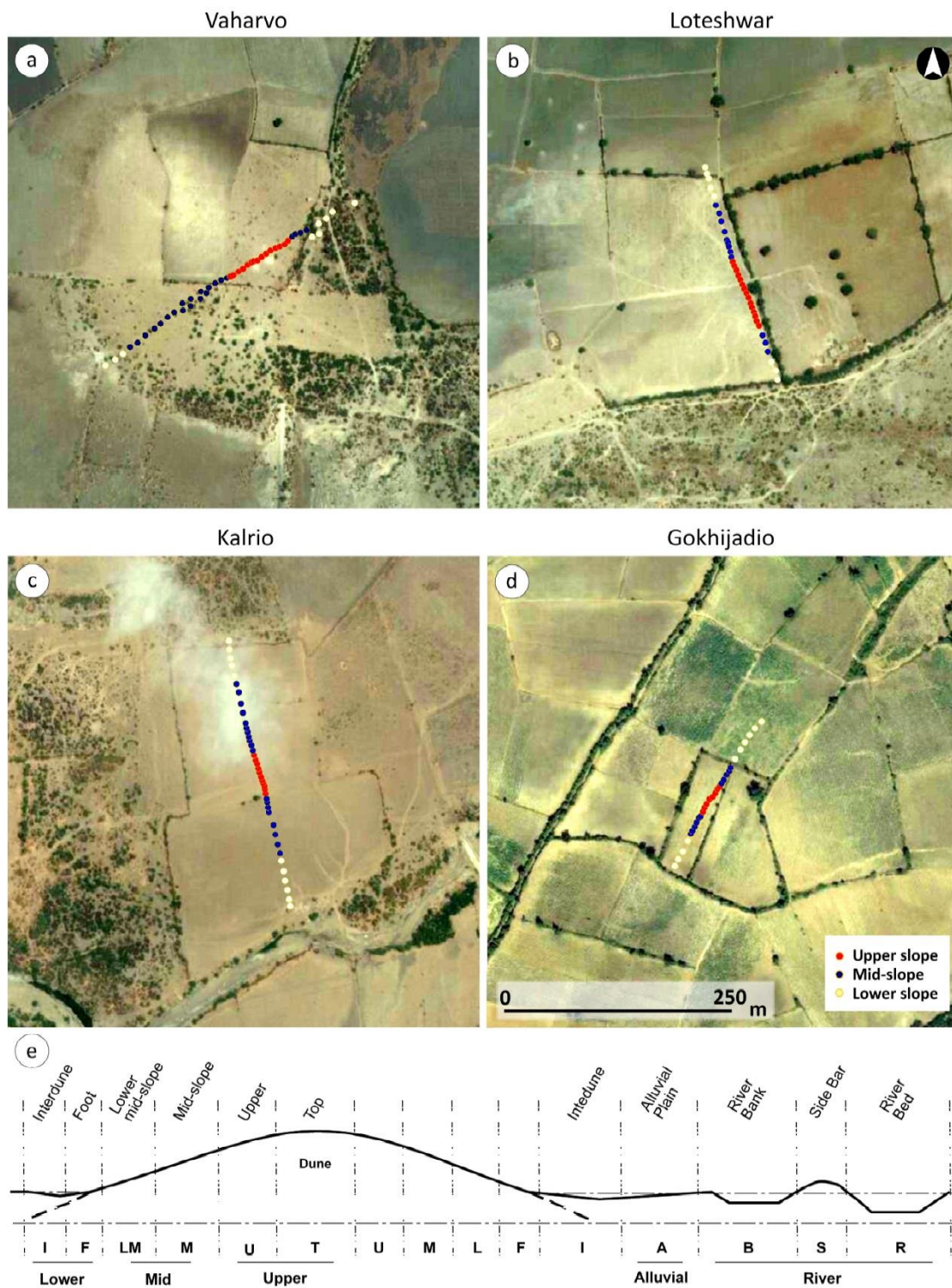


Figure 2. Location of sampling transects within the four studied dunes: (a) Vaharvo, (b) Loteshwar, (c) Kalrio and (d) Gokhijadio (base map: ESRI World Image). (e) Schematic representation of a dune slope with catena units used for the archaeological and physico-chemical characterisation of fossilised sand dunes.

Physico-chemical analyses

Physico-chemical analyses were performed to characterise surface sediment properties. Particle size distribution (PSD) of fine earth sediments (<2mm) was estimated using a CoulterLS© laser-particle-analyser. Samples of ca. 0.5g were taken and suspended in 10% sodium polyphosphate deflocculant solution (Puy and Balbo 2013). Samples with high organic content were pre-treated with hydrogen peroxide to remove organic material (Goldberg and Macphail 2006). Values in microns (μm) were converted into phi units following established standards (Krumbein 1938; Puyet *et al.* 2014). Loss-on-ignition (LOI) was used as a proxy for soil moisture, soil organic matter (SOM), charcoal, calcium carbonate and mineral residue (MR), following 4h cycles of drying at 105°C, and combustion at 400°C, 550°C and 925°C (Heiri *et al.* 2001). Geochemical multi-element signatures were measured by Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy (ICP-AES). Samples were pre-treated with aqua-regia and analysed at ALS Laboratory Group in Seville (Spain) to measure the concentration of 35 major elements (Wilson *et al.*, 2008).

Statistical analyses: identifying physico-chemical signatures from surface scatters

Statistical analyses were used to highlight possible relational patterns between surface scatters, physico-chemical geogenic and anthropic signatures of sediments, and the potential type of past human occupation. The approach used supervised classification of the archaeological significance (i.e. types of archaeological surface assemblages regarding HG, AP or mixed HG/AP occupations) for each sample, together with linear discriminant analysis (LDA) models. LDA is a supervised parametric machine learning method that calculates the best linear transforms of the original descriptor variables, defining a new feature space in which new data can be clustered at best into classes that have been previously characterized by the user through an input training dataset (Fukunaga 1990). This approach was needed to test the suitability and consistency of physico-chemical proxies for the identification of physico-chemical signatures potentially representing different types of human occupation. This workflow included three main steps (Figure 3):

- Step 1 - Principal component analyses (PCA) and hierarchical clustering of the samples were performed according to physico-chemical proxies. These analyses explored the variability of

6.4. MULTI-PROXY SURVEY OF SURFACE ARCHAEOLOGICAL SCATTERS

physico-chemical proxies and were aimed to assess their spatial physiographic patterns within the dune catena.

- Step 2 - A supervised classification was implemented in the archaeological assemblages using training samples that were selected according to the weight significance of the archaeological record. This was used in a first LDA model as an exploration of the visible archaeological remains for each site, accordingly to four hypothesised archaeological classes: HG, AP, mixed HG/AP and samples without surface evidence.
- Step 3 - A second LDA model was implemented to test the robustness of using exclusively physico-chemical proxies for the reliable classification of the type and intensity of past occupations of fossilised sand dunes.

Our dataset consisted of 151 samples from the sampling transects of Vaharvo (47 samples), Gokhijadio (30 samples), Loteshwar (35 samples) and Kalrio (41 samples). For the ordination and hierarchical clustering of physico-chemical proxies within the transect data, we also included 13 samples from other regional physiographic features showing no archaeological evidence (one from a dune, seven from interdunal soils and water tanks and five from riverbeds and bars) to improve the discrimination between regional and local patterns and to account for all the variability within the data. The supervised classification of archaeological descriptors was based upon data recovered in the four local transects.

A total of 35 variables were considered, comprising one group of categorical variables (dune catena) and three groups of continuous variables (archaeological weight, physical analyses and geochemistry). Qualitative archaeological and *in situ* sediment characterizations were excluded from the statistical analyses, and were used only to cross-validate the laboratory and statistical results with field observations. All the analyses were performed in R software environment (RStudio version 0.98.1049, [R-Core-Team 2014](#)). Original raw data and complementary figures to support statistical results are included as online resources (see [Supplementary Electronic Material](#)).

6.4. MULTI-PROXY SURVEY OF SURFACE ARCHAEOLOGICAL SCATTERS

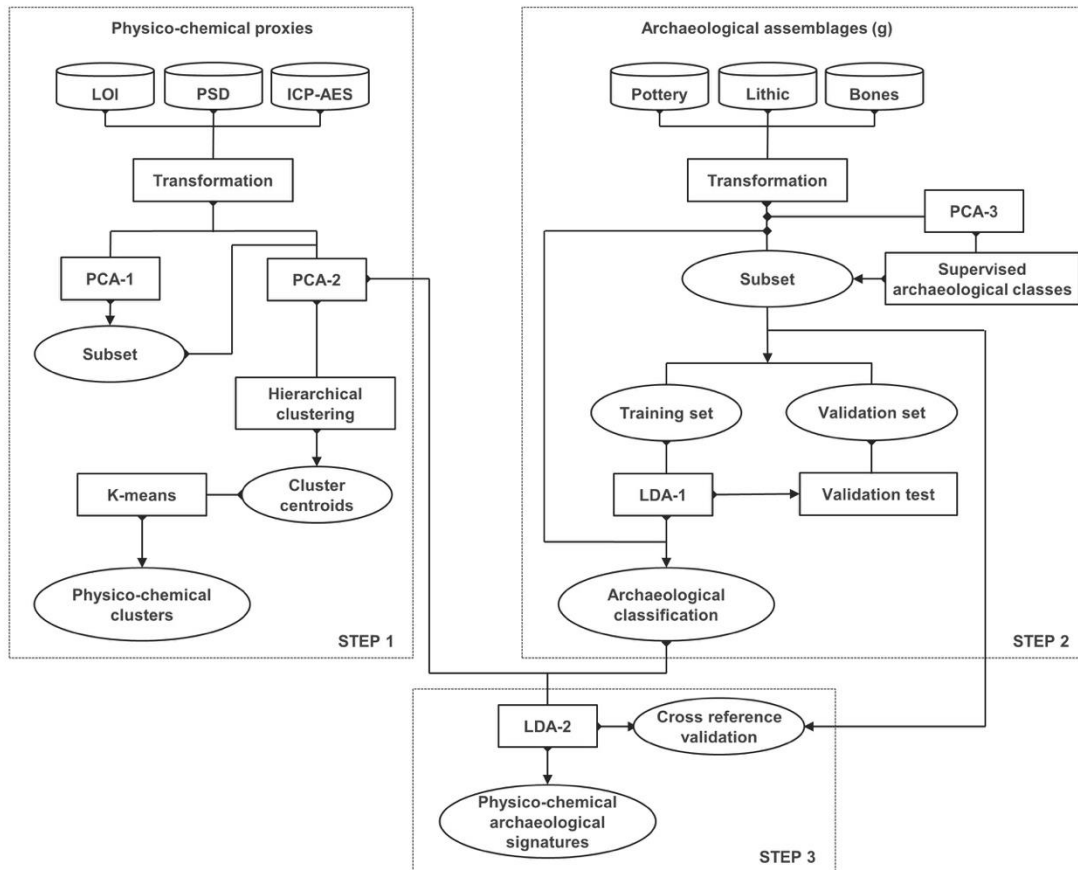


Figure 3. Statistical workflow of the main statistical analysis for identifying physico-chemical signatures from surface scatters: (Step1) ordination and hierarchical clustering of physico-chemical proxies; (Step 2) definition and classification of archaeological assemblages; (Step 3) classification of archaeological significance from physico-chemical proxies (physico-chemical signatures).

Ordination and hierarchical clustering of physico-chemical proxies

The first step of statistical analysis grouped physico-chemical properties to either non-anthropogenic or anthropogenic signatures along the dune catena. Data cleaning and transformation was applied after performing an explorative Shapiro-Wilk test to check for normality in the physico-chemical data. In preparation for PCA and further statistical analysis, non-normally distributed data were transformed: (1) an additive log-ratio was applied to LOI and PSD data for removing closure effects (i.e. between variables that sum a constant, see [Shennan 2004](#)), and (2) a log₁₀ scale was applied to ICP-AES data; see ([Wilson et al. 2008](#); [Rondelli et al. 2014](#)). Transformed physico-chemical data and archaeological weights were then transformed to Z-scores values to make them comparable.

A first PCA (PCA-1) was performed to identify major regional physiographic features and local dune variability. In order to focus on the local scale within the dune catena, a second PCA (PCA-2) was performed after discarding samples outliers (mostly from regional interdunes and river samples). The principal components (PCs) obtained from PCA-2 were used to carry out a hierarchical cluster analysis using Euclidean distance as the similarity measure, and Ward's method as the clustering technique to ensure low variance clusters (Dirix *et al.* 2013a; Dirix *et al.* 2013b; Calegari *et al.* 2013). The resulting dendrogram was cut using a dissimilarity threshold defined by the stopping threshold rule method proposed by (Mojena 1977), which selects the “best” number of clusters based on the distribution of a clustering criterion associated with each hierarchical level. Following Milligan and Cooper (1985) we scaled the standard deviation values by a factor of 1.25 to improve the performance of the stopping rule, which resulted on a classification of 9 physico-chemical clusters. Being a bottom up classification method, hierarchical clustering does not warrant that all the samples fall in their best suited cluster, thus we refined the classification by running a K-means clustering, initialised with the centroids of the 9 clusters previously identified by the stopping threshold.

Classification of archaeological assemblages

The second classification method was done on the basis of presence/absence of archaeological artefacts. Following well-established archaeological classifications for the area (Ajithprasad and Sonawane 2011; Chase *et al.* 2014a), we established three simplified major types of dune occupation (HG, AP and mixed assemblages) according to the archaeological evidence (as weight and frequency) of pottery, lithic, and bones. Other recovered materials, such as palette stones, grinding stones and characteristic Harappan clay lumps were excluded from our classification as they were detected in less than 20% of the samples. An additional PCA (PCA-3) showed no significant correlations between pottery, lithic and bones. However, PCA-3 highlighted a remarkable cluster of samples having absence or very low archaeological evidence. Therefore, we decided to include the following four classes:

- Class 1(HG evidence): Characterised by mid to high density of lithics, variable amount of fauna and very low or inexistent ceramic assemblages.

6.4. MULTI-PROXY SURVEY OF SURFACE ARCHAEOLOGICAL SCATTERS

- Class 2 (AP evidence): represented by a high density of pottery and clay artefacts, with variable amounts of fauna and mid to low evidence of lithics.
- Class 3 (Mixed evidence): characterised by mid to high densities of all types of evidence.
- Class 4 (Low evidence): samples with lack of or very low archaeological evidence.

To test that the observed scatters can be adequately classified in the above predefined classes, we built a first LDA model. To prepare the LDA-1, the physical weights of the three major archaeological materials were standardised. For each predefined type, we blindly selected a total of 32 samples, to be used as a supervised classification representing each archaeological simplified class (i.e. 8 samples for each type of archaeological evidence: HG, AP, mixed and low) according to the weight of archaeological evidence, regardless of the dune of origin. These 32 samples were then randomly divided into 1) a training dataset of 20 samples (5 for each type) and 2) a validation dataset of 12 samples (3 for each type). Thence we applied the cross-validated LDA-1 model (fitted with the supervised dataset) to predict the archaeological classification over the entire dataset. The predicted result was tested and validated using the validation dataset, and the robustness in terms of variability between hypothesised and predicted classes was confirmed by Wilks-Lambda p-value tests.

Classification of physico-chemical signatures

The third and main step of statistical analyses was aimed at validating the use of physico-chemical proxies as indicators of different geogenic and anthropic signatures in surface archaeological scatters. To do that, we used the principal components of physico-chemical proxies obtained in step-1 (PCA-2) and the subset of 32 supervised samples described in step 2 to build a new LDA model. In other words, we modelled the “ideal” physico-chemical signatures for those supervised samples representing HG, AP, mixed HG/AP as well as absence of surface scatters. LDA-2 model was then used to predict the physico-chemical signature of each sample; self-reliantly from any archaeological evidence or quantification bias (as no physico-chemical information was used in the previous step 2, to ensure that results are independent). Finally, the results from the hierarchical clustering analysis and from the LDA classifications were visualised by means of correspondence analysis to discuss agreements and disparities between each classification method.

6.4.6. Results

Geoarchaeological characterization of dune catena

A graphical overview of the distribution of the main archaeological and physico-chemical proxies along each dune catena (showing the top, upper, mid-slope, lower mid-slope, foot and interdune sub-catena units) is provided in [Figure 4](#) (Vaharvo), [Figure 5](#) (Loteswar), [Figure 6](#) (Kalrio), and [Figure 7](#) (Gokhijadio).

Distribution of archaeological evidence

As a general pattern, archaeological remains are well clustered in the upper part of the dunes (top and upper slopes) and decrease towards the lower portions of the catena (foot dune and interdune areas, see also [Table 1](#)).

The archaeological surface assemblage of Vaharvo (HG) is mostly represented by bone fragments (87%) and lithics (10%). Although highly fragmented, microliths are uniformly dispersed along the upper slope and are more abundant in Vaharvo than in the other three scatters. A minor representation of grinding stones was also collected at the mid and upper catena. Occasional Early Harappan sherds and unidentified protohistoric pottery suggest sporadic later occupations. The visibility of surface assemblages is biased at the south-west upper and mid-slope, which corresponds to currently highly disturbed areas (i. e. field margin path). The surface archaeological assemblage was later correlated with the excavation of the dune deposit, which reported an aceramic HG level dated to the second half of the sixth millennium cal. BC, disturbed only by an isolated burial ([Madella et al. 2012a](#); [Mushrif-Tripathy et al. 2014](#); [García-Granero et al. 2016](#)).

6.4. MULTI-PROXY SURVEY OF SURFACE ARCHAEOLOGICAL SCATTERS

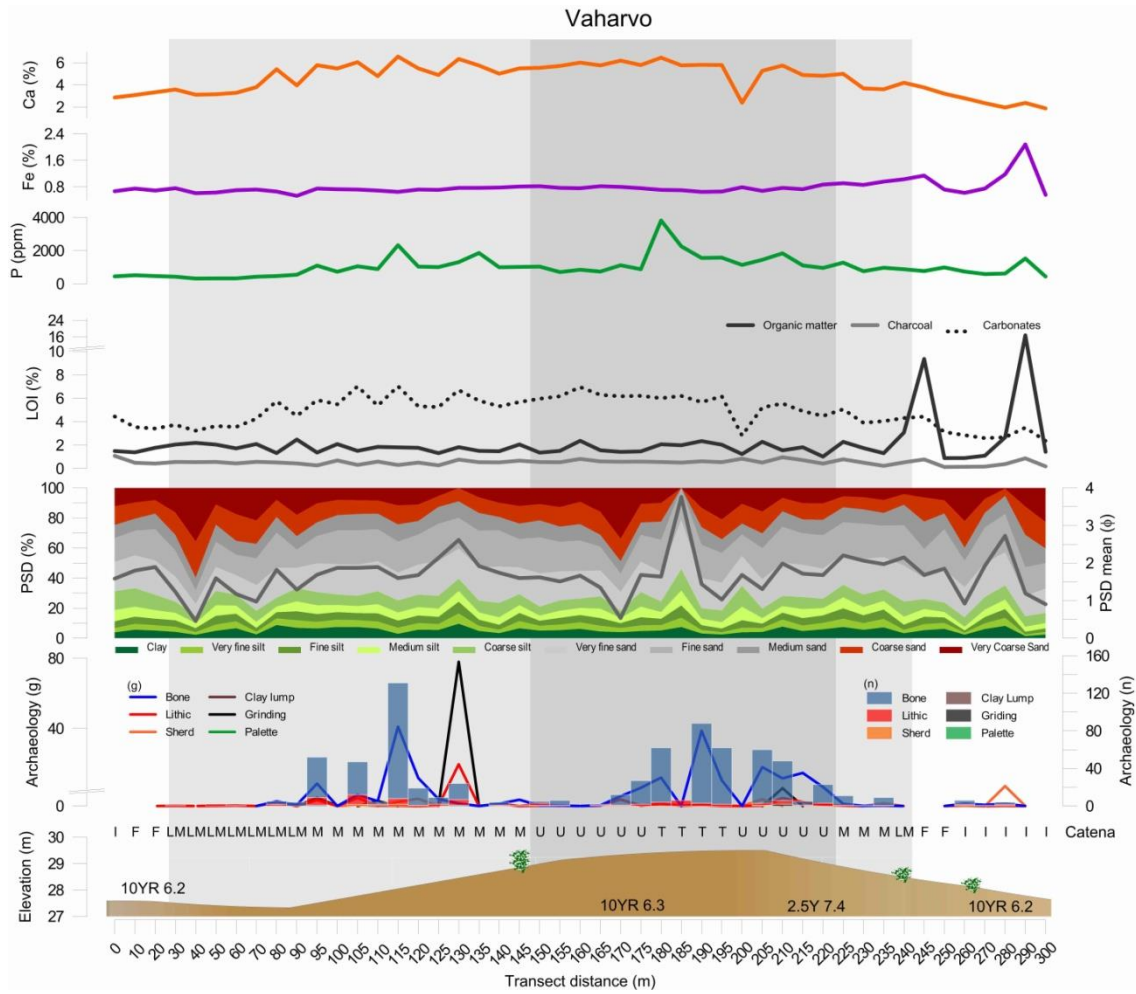


Figure 4. Distribution of archaeological and physico-chemical proxies along the sampling transect of Vaharvo.

At Loteshwar (mixed HG/AP), archaeological materials decrease at the very top of the dune and are more abundant at slightly lower elevations in the vicinity of the dune summit. Faunal remains (59%) and sherds (35%) are well spread along the upper and mid catena, while most of the lithic assemblage (3.7%) is concentrated at the very top of the dune. Less-abundant materials such as grinding stones, characteristic Harappan-Anarta clay lumps and palette stones are well spread along the upper and mid catena. Archaeological evidence from the surface correlates well with the two levels of occupation (HG and AP) reported in the dune deposit (Ajithprasad 2011; Rajesh *et al.* 2013b; Rajesh and Krishnan 2014; Gadekar *et al.* 2014).

6.4. MULTI-PROXY SURVEY OF SURFACE ARCHAEOLOGICAL SCATTERS

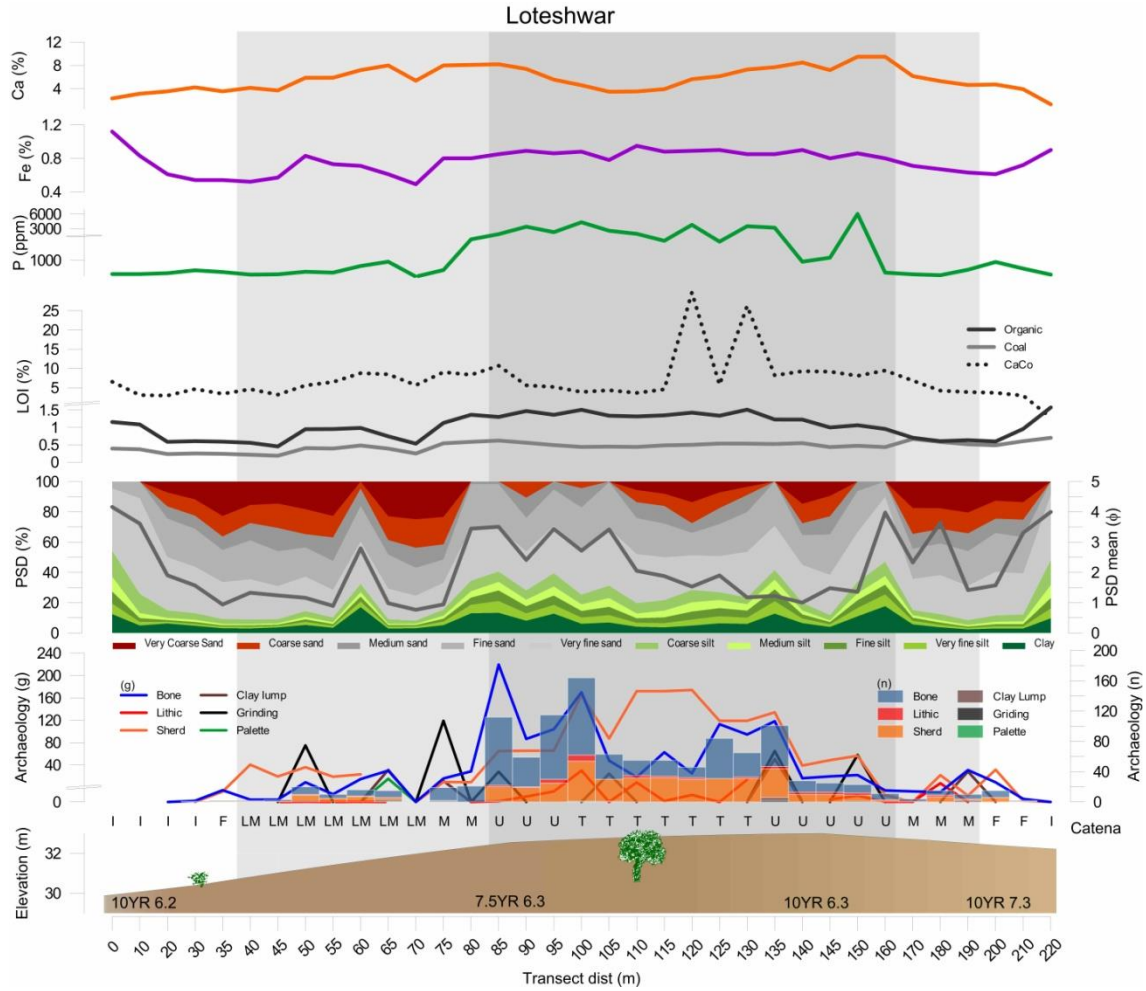


Figure 5. Distribution of archaeological and physico-chemical proxies along the sampling transect of Loteshwar.

The surface assemblage of Kalrio (mixed HG/AP) is more heterogeneous, showing all typologies well-distributed along the upper and mid catena. Bone fragments are the most abundant material (53%) with fewer sherds (21%) and significantly more microliths (17%) than nearby mixed HG/AP site of Loteshwar. Palette stones and clay lumps are also represented, as well as the larger collection of grinding stones (6%).

6.4. MULTI-PROXY SURVEY OF SURFACE ARCHAEOLOGICAL SCATTERS

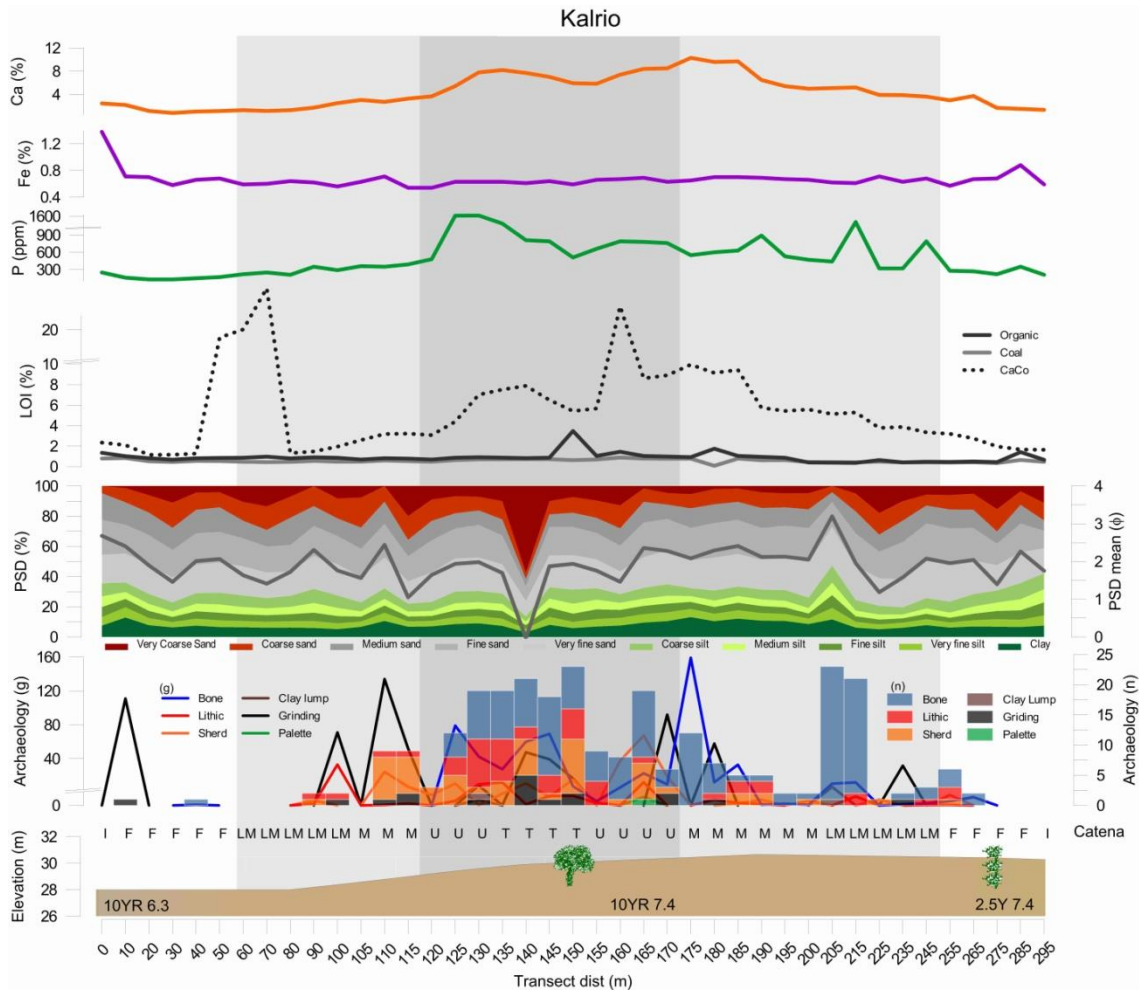


Figure 6. Distribution of archaeological and physico-chemical proxies along the sampling transect of Kalrio.

Gokhijadio (AP) shows several differences compared to the other sites, with an assemblage mainly composed by large fragments of sherds (84%) and small fragments of charred bones (7%). Neither lithics nor palette stones were recovered, but there is a significant presence of Harappan-Anarta clay lumps (Rajesh and Krishnan 2014).

6.4. MULTI-PROXY SURVEY OF SURFACE ARCHAEOLOGICAL SCATTERS

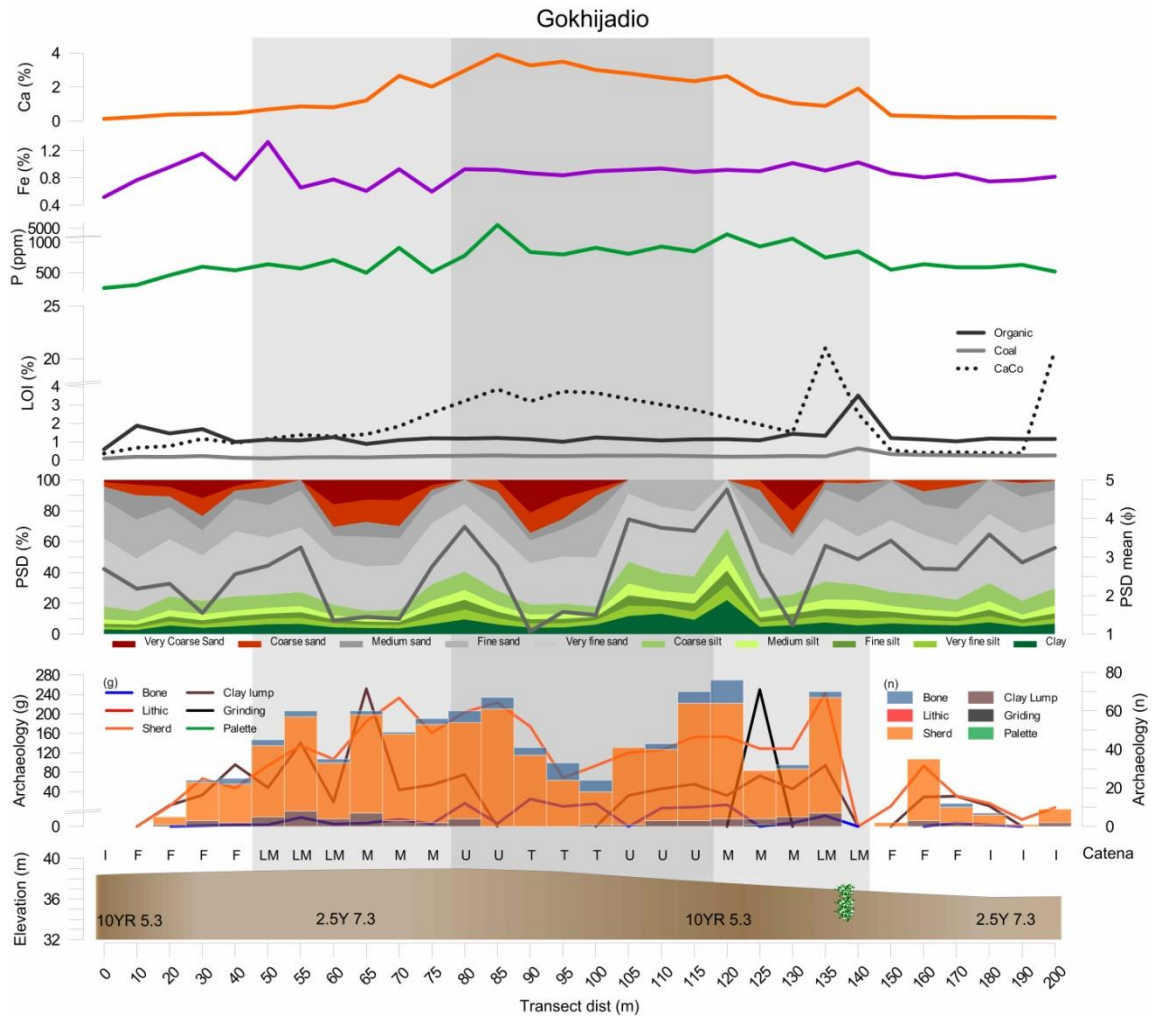


Figure 7. Distribution of archaeological and physico-chemical proxies along the sampling transect of Gokhijadio.

6.4. MULTI-PROXY SURVEY OF SURFACE ARCHAEOLOGICAL SCATTERS

Table 1. Archaeological quantification (n) for each sampling transect along major dune catena units.

	<u>Vaharvo.</u>	<u>Loteshwar</u>	<u>Kalrio</u>	<u>Gokhijadio</u>
Fauna				
Upper	370	589	74	40
Mid	275	88	66	31
Lower	7	12	6	7
%	87.87	59.35	53.68	7.72
Lithics				
Upper	32	38	33	0
Mid	41	5	12	0
Lower	2	0	2	0
%	10.11	3.70	17.28	0
Sherds				
Upper	2	369	37	327
Mid	6	34	20	432
Lower	2	8	1	99
%	1.35	35.40	21.32	84.87
Clay lumps				
Upper	0	5	1	12
Mid	0	5	1	48
Lower	0	0	0	14
%	0	0.86	0.74	7.32
Grinding s.				
Upper	2	4	11	0
Mid	3	2	6	1
Lower	0	0	1	0
%	0.67	0.52	6.62	0.10
Palettes				
Upper	0	1	1	1
Mid	0	1	0	0
Lower	0	0	0	0
%	0	0.17	0.37	0

Particle size distribution

Overall, very fine to fine sand fractions are found at the interdune and lower slopes (between 3-2 mean ϕ , see [Table 2](#)). A general increase towards the medium sand fraction is observed in the mid-slope (2-2.36 mean ϕ), whereas the top and upper slope of the dune tends to be characterised by the medium to coarse sand fractions (1.37-1.90 mean ϕ). An exception to this trend is found at Loteshwar and Gokhijadio, where fine sand grains increase in the upper portions of the catena, with values similar or higher than those found at the interdune edges (between 2.10-3.50 mean ϕ).

6.4. MULTI-PROXY SURVEY OF SURFACE ARCHAEOLOGICAL SCATTERS

Table 2. Mean values of physico-chemical proxies for each sampling transect along detailed catena units.

	Vaharvo	Loteshwar	Kalrio	Gohkijadio
Grain size (PSD ϕ units)				
Top	1.97	2.10	1.37	1.38
Upper	1.52	2.30	1.92	3.59
Mid-slope	1.92	2.35	2.02	2.36
Lower mid-slope	1.34	1.31	1.88	2.72
Foot	1.81	1.94	1.94	2.49
Interdune	1.54	3.05	2.22	3.09
Organic matter (LOI %)				
Top	2.12	1.40	1.51	1.12
Upper	1.60	1.20	1.00	1.15
Mid-slope	1.71	0.89	0.91	1.13
Lower ms	2.13	0.74	0.67	1.65
Foot	3.36	0.71	0.78	1.33
Interdune	4.06	1.00	1.01	1.01
Charcoal (LOI &)				
Top	0.56	0.48	0.70	0.23
Upper	0.66	0.51	0.71	0.24
Mid-slope	0.50	0.58	0.55	0.20
Lower ms	0.53	0.33	0.46	0.25
Foot	0.46	0.44	0.53	0.23
Interdune	0.48	0.39	0.63	0.21
Carbonates (LOI %)				
Top	6.02	11.16	6.83	3.52
Upper	5.53	8.20	9.43	3.22
Mid-slope	5.56	6.45	6.03	1.92
Lower ms	4.12	6.10	8.10	5.47
Foot	3.63	3.33	3.62	0.70
Interdune	3.07	3.69	1.99	5.47
Calcium (ICP-AES %)				
Top	5.96	4.94	7.21	3.25
Upper	5.28	7.95	6.72	2.91
Mid-slope	5.28	6.44	6.17	1.85
Lower ms	3.81	5.74	2.96	1.03
Foot	3.34	4.07	1.80	0.33
Interdune	2.37	2.91	1.88	0.20
Iron (ICP-AES %)				
Top	0.68	0.88	0.62	0.87
Upper	0.78	0.85	0.64	0.92
Mid-slope	0.77	0.72	0.66	0.83
Lower ms	0.70	0.64	0.63	0.94
Foot	0.82	0.62	0.68	0.89
Interdune	0.98	0.80	0.98	0.72
Posphorus (ICP-AES ppm)				
Top	2305	2782	820	850
Upper	1076	2427	962	1802
Mid-slope	1168	810	530	1296
Lower ms	467	622	445	704
Foot	687	746	206	525
Interdune	728	548	230	497

Loss on Ignition

Proxies for sediment content of organic matter, charcoal and calcium carbonates show clear differences between the lower interdune area and the dune slopes (Table 2). A general increase of carbonates is observed along the dune catena towards the top of the dune (reaching a mean of 11% in Loteshwar). Some outliers of carbonates concentrations are identified in Kalrio, GDJ and Loteshwar. Charcoal content also follows a slightly increasing pattern towards the dune top, with the higher values recorded at Kalrio dune top (mean 0.70%). Highest contents in organic matter are mostly found in Vaharvo, and they increase downslope towards the interdunal areas (mean 4%). Organic matter is also slightly higher in interdune samples outside the main transects, with exceptional peaks in the upper catena of Loteshwar and Kalrio (mean 1.40%) possibly related to plant remains from trees presently found in proximity of dune tops, in correspondence with predominant resting areas used by local herders.

Multi-element geochemistry data

A correlation matrix for all ICP-AES elements is shown in Online resource 1. Ca is strongly correlated with alkaline earth metals such as Sr and Ba. Transition and post-transition metals (Al, Cr, Ni, Zn) are also highly correlated, as well as silicate related elements (Al, Fe, K). In contrast to the general correlation patterns, P is the only element showing negative dependence with other elements.

Ca and its dependence elements increase towards the top of the catena in all dunes (Table 2). Vaharvo, Loteshwar and Kalrio top samples have an average of 5-7% Ca content, whereas interdunal samples have less Ca content (2-3%). The same pattern occurs in Gokhijadio, although the overall Ca content is lower (0.20% at the interdune and 3.25% at the top). At Loteshwar and in some samples from Kalrio, however, the high content of Ca at the upper catena slightly diminishes in correspondence with the dune summit.

Metallic and silicate related elements (e.g. Fe) are mostly concentrated in interdunal samples (0.80-0.90%) with a decreasing general pattern towards the upper slopes. An exception is found at the top samples of Loteshwar and Gokhijadio, which presents higher Fe and metallic concentrations strongly related with the presence of finer grain size sediment.

Finally, all the upper slopes present a high content of P, reaching values between 900-2700 ppm, whereas interdunal concentrations of P are low (in the order of 300-500 ppm). The increasing pattern of P occurs from mid-slope samples in all dunes and, interestingly, some top and upper dune samples from Loteshwar and Gokhijadio have maximum P of >5000 ppm.

Statistical analyses

Ordination and hierarchical clustering of physico-chemical proxies

Most of the regional samples included in our dataset are ordinated along the first axis (PC1) of PCA-1 ([Online resource 2](#)), conveniently identifying background signatures and dune outliers. Nine outliers from dunes, interdunes, water tanks and river bars are ordinated on the left side of the PC1 axis showing high amounts of metallic elements, and three samples (riverbeds and interdune) are ordinated on the right side of PC1 axis. PC1 is weakly negatively correlated with most of the transition (Fe, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Vm, Zn) and post-transition metals (Al, Pb) as well as alkaline (Mg) and alkali (K) metals. While metals increase in PC1, the content of coarse particle size (sand) decrease. The cluster of samples ordinated at the centre of PC1 axis represents the physico-chemical variability within the dune catena. On the other hand, the second axis (PC2) of PCA-1 ordinales dune samples accordingly to an increasing pattern of carbonates, Ca and P towards the upper portion of the dune catena.

PCA-2 was performed after eliminating regional variability caused by interdune-like outliers and riverbed samples ([Online resource 3](#)). The PCs obtained from PCA-2 were used to perform a hierarchical cluster analysis. The threshold suggested by the stooping rule identified 9 physico-chemical clusters ([Online resource 4](#)). The resulting clusters are displayed in the PCA-2 axis to better interpret dissimilarity and variability within clusters ([Figure 8](#)).

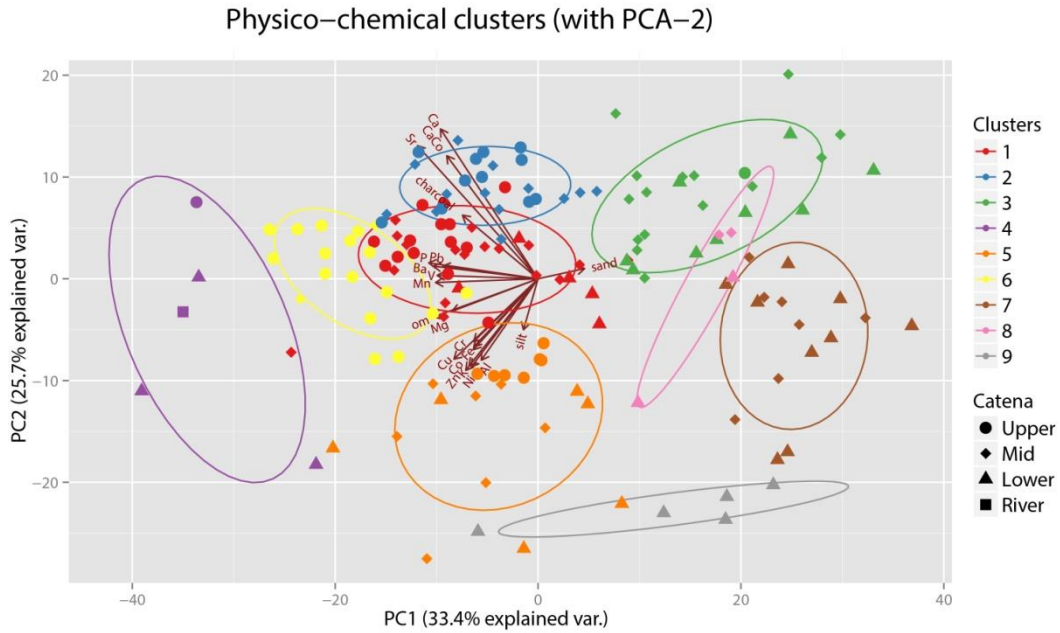


Figure 8. PCA-2 biplot showing relationships of physico-chemical proxies after deleting regional noise identified in PCA-1, with the samples labeled as the resulting physico-chemical clusters from the hierarchical clustering approach.

The spatial distribution of the 9 physico-chemical clusters in each transect is shown in Figure 9. A clear cluster distribution pattern distinguishes the upper, mid and lower catena at the dunes of Loteshwar, Kalrio and Gokhijadio. In contrast, Vaharvo is mainly characterised by a unique cluster. Proxy values for each cluster are represented in boxplots (Online resource 5) and are summarised as follows, accordingly to their relevance from the top dune towards the interdune and the total number of samples for each group:

- Cluster 1 (37 samples) groups most of the samples from Vaharvo. This cluster is characterised by a slightly high content of fine grain particles and organic debris. Concentration of Ca is relatively high, and the cluster shows a high variability of P.
- Cluster 3 (25 samples) groups lower mid-slope and foot samples from Loteshwar and Kalrio, with some presence at the foot of Vaharvo. This cluster is similar to clusters 1 and 2, except for an increase of sandy sediment, carbonates and Ca concentration and a decrease of P concentrations.
- Cluster 2 (24 samples) groups most of the Kalrio top dune samples and the mid-slope to foot dune samples of Loteshwar, with some presence in Vaharvo lower catena. This cluster is mostly

6.4. MULTI-PROXY SURVEY OF SURFACE ARCHAEOLOGICAL SCATTERS

characterised by a very high concentration of carbonates and Ca concentration. Sediment is sandy with lower content of fine grain size. Fe and metallic elements have slightly lower concentrations than in cluster 1, whereas P concentration is higher but still presents some variability within the cluster.

- Cluster 5 (20 samples) groups mid and upper samples from Gokhijadio. In contrast, it also groups interdunal samples in all transects. This cluster is characterised by a very low content of Ca and a high variability of P, though overall lower than in cluster 6, whereas Fe, K, Mg and fine grain particles are higher than in the previous clusters.
- Cluster 6 (18 samples) groups the upper catena of Loteshwar, and it is heavily associated with the higher concentration of P and a slightly elevated concentration of Ca along with a predominance of fine grain particles.
- Clusters 7 (16 samples) and 4 (5 samples) groups foot and interdunal samples from Vaharvo and Kalrio. They also group lower mid-slope samples from Gokhijadio. High values of silty sediment, organic matter and charcoal are prevalent in cluster 4, whereas cluster 7 has less charcoal content. Both clusters show low concentrations of Ca and P, whereas metallic and silicate elements increase.
- Cluster 9 (5 samples) groups the north-east interdunal samples of Gokhijadio, showing a very low concentration of carbonates and Ca along with well-defined organic matter in silty sediments.
- Cluster 8 represents an outlier characterised by high carbonates at the lower slope of Kalrio.

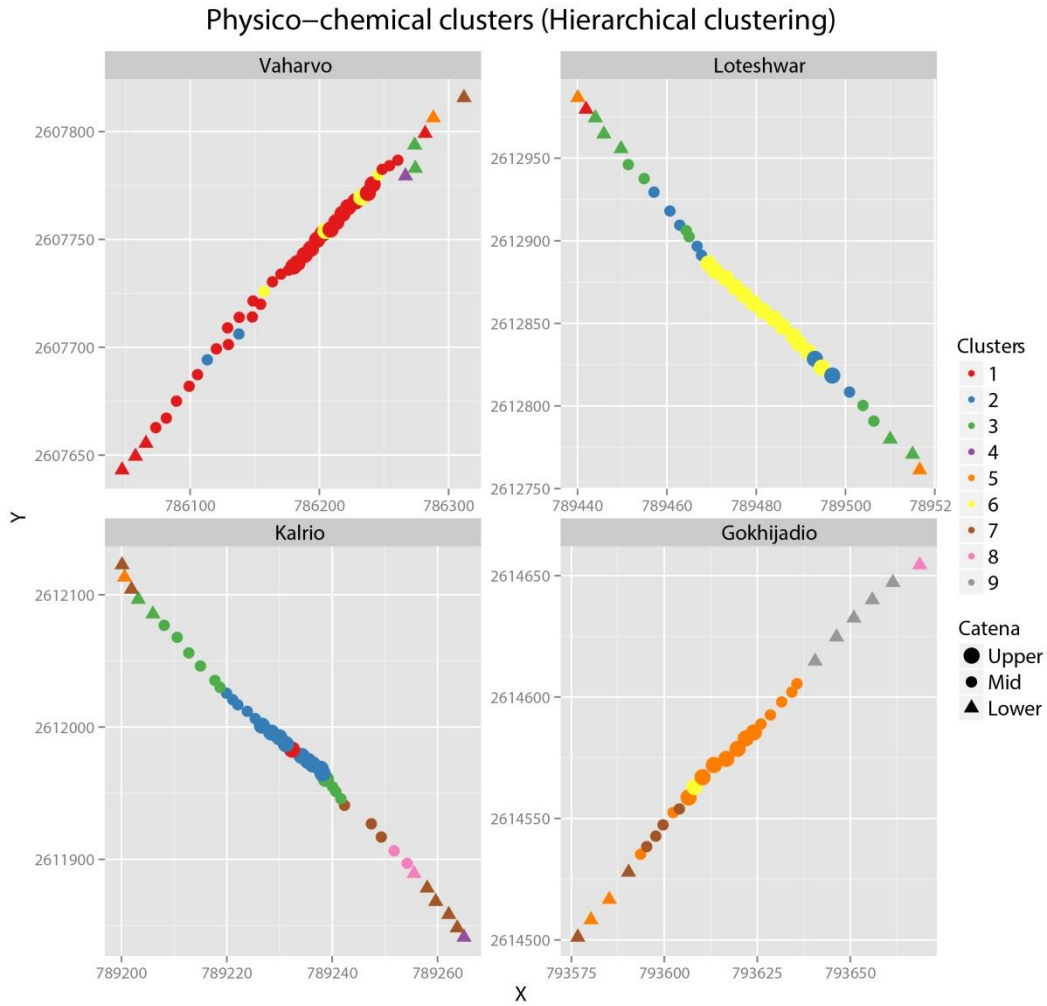


Figure 9. Results from step 1 (hierarchical clustering approach). Schematic representations of each sampling transect showing the spatial distribution of physico-chemical clusters.

Classification of archaeological assemblages

The second classification method aligned each sample with the characterisation of their archaeological occupation by means of the significance of archaeological surface remains. The robustness of the four archaeological classes (HG, AP, mixed HG/AP and low evidence) emerging from PCA-3 ([Online resource 6](#)) was validated by applying a Wilks-Lambda test to our supervised subset of samples to be used to fit and validate the LDA-1 model. A Wilks-Lambda p-value of 8.66e-07 rejected the null-hypothesis, thus suggesting robust differences in terms of variability for each predefined archaeological class. A confidence p-value of 0.011 was obtained when we compared class 1 (HG assemblages) with class 4 (low evidence), those being the closest classes in terms of

6.4. MULTI-PROXY SURVEY OF SURFACE ARCHAEOLOGICAL SCATTERS

archaeological evidence, excluding all potential confusion in the LDA model. Therefore, our supervised classification correlates well with the hypothesised classification of archaeological assemblages. As a result, the validation of the LDA-1 model using the evaluation dataset showed an accuracy proportion of the 90% (total number of predictions that were correctly identified), thus validating the confidence of LDA-1 model. [Figure 10](#) shows the spatial distribution of the archaeological classification after applying the LDA-1 model over the entire archaeological dataset. Complementary boxplots ([Online resource 7](#)) shows insignificant variations in the distribution of archaeological assemblages for the four given archaeological classes used in the supervised training dataset and as a result of the LDA classification.

Overall, class 4 (low evidence) is conveniently distributed along the lower catena of all transects, with some presence at the mid slopes of Loteshwar, Kalrio and Gokhijadio. In contrast, class 4 is very significant at the upper catena of Vaharvo, in conjunction with potential hunter-gatherer evidence (class 1). The upper catena of Loteshwar is mostly characterised by mixed evidence (class 3) with an agropastoral cluster of samples at the top of the dune, along with isolated agropastoral samples in the mid-levels of the catena. The archaeological assemblages of Kalrio are mostly distributed along the upper catena, and represent small clusters of HG, and mixed classes with an isolated AP sample. Far more different is the classification of Gokhijadio upper and mid catena samples, presenting a uniform cluster of AP class.

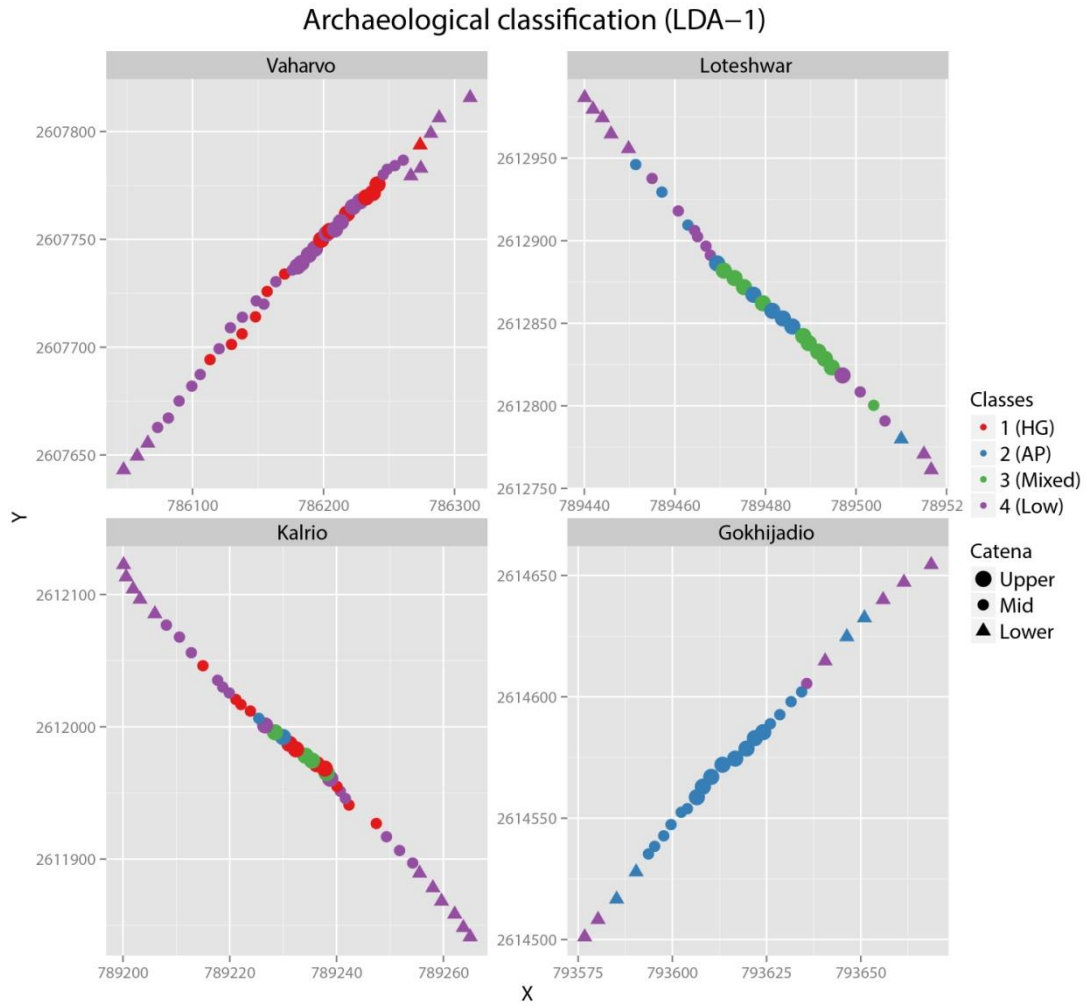


Figure 10. Results from step 2 (LDA for archaeological classification). Schematic representations of each sampling transect showing the spatial distribution of archaeological classes.

Classification of physico-chemical proxies

The first two steps described above used physico-chemical proxies and archaeological descriptors, respectively, and provided significant insights into the spatial distribution of those indicators along the dune surface. The third classification step was designed to go beyond archaeological evidence, and evaluate the potential of using physico-chemical proxies alone to test whether different scatters (with different types of human occupation) have specific surface sediment signatures.

6.4. MULTI-PROXY SURVEY OF SURFACE ARCHAEOLOGICAL SCATTERS

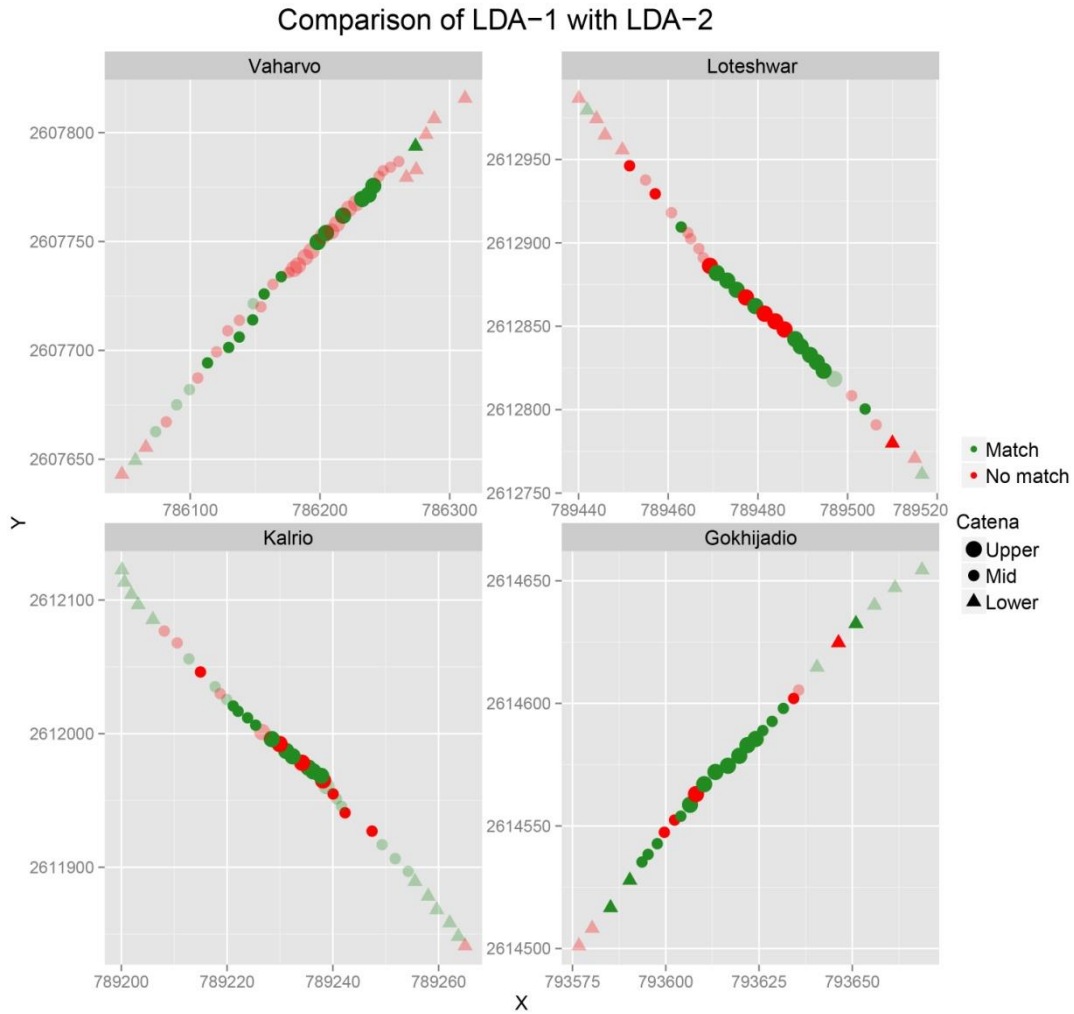


Figure 11. Comparison of step 2 and step 3 (LDA for physico-chemical classification). Schematic representations of each sampling transect showing the spatial distribution of a contingency table between the archaeological classification results (LDA-1) and the final archaeological significance of physico-chemical signatures (LDA-2). Relationships between class and signature 4 are labelled as semi-transparent to highlight the accuracy of the LDA-2 prediction model at upper catena samples.

The use of physico-chemical principal components (from PCA-2) as data input for fitting the LDA-2 model into our supervised samples resulted in an accuracy proportion for the supervised validation prediction of the 46%. This low value mostly corresponds to the classification of biased soil samples with low archaeological evidence (class 4), which is expected due to the variability of soil characteristics corresponding to interdunal and lower samples. When removing class 4 from the prediction cross-validation, the accuracy proportion was improved to 59% of “corrected” identified signatures in the supervised dataset. This result was greatly improved with the application of the LDA-

6.4. MULTI-PROXY SURVEY OF SURFACE ARCHAEOLOGICAL SCATTERS

2 model over the entire dataset, which resulted in an accuracy proportion of the 54% (including class 4), and a largely improved prediction result of the 78% when excluding class 4 (see Figure 11).

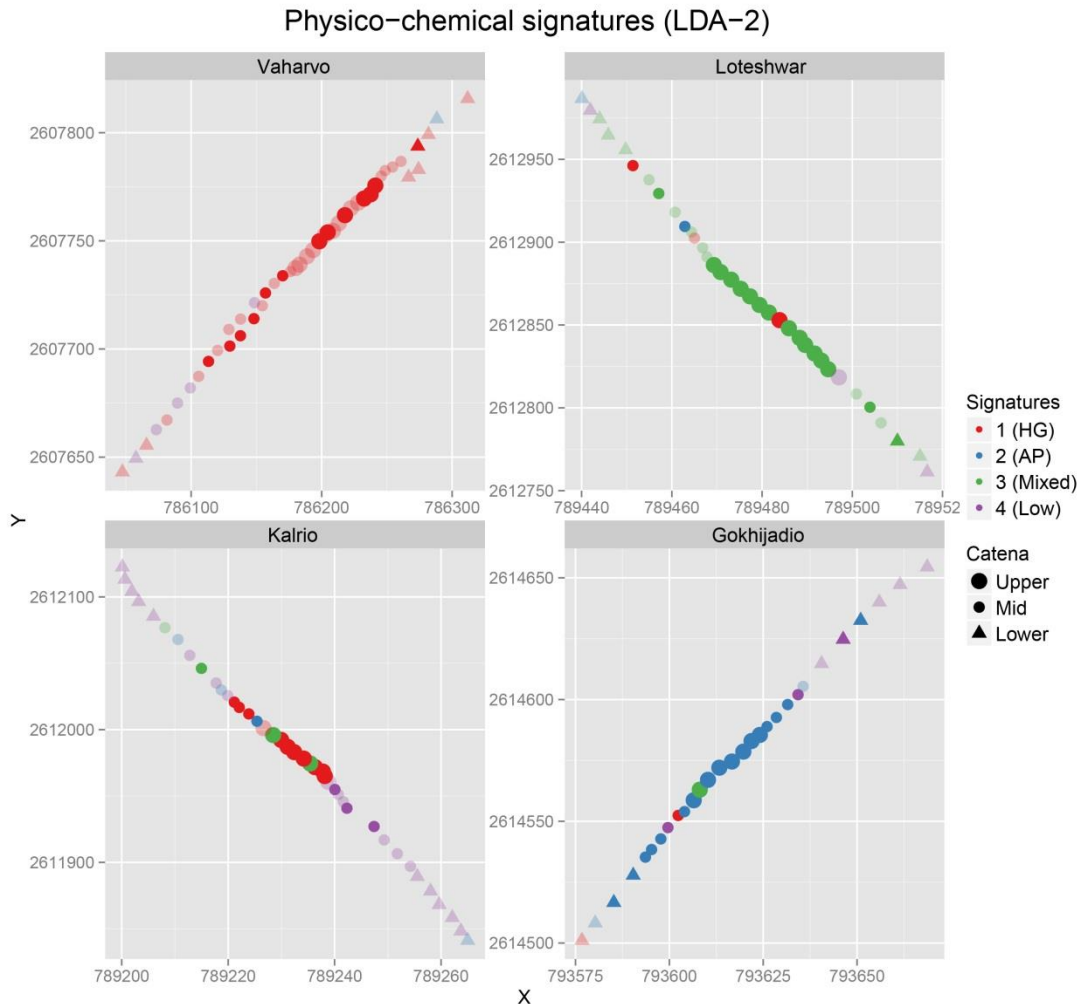


Figure 12. Results of step 3. Schematic spatial representation of sampling transects for each site showing the distribution and archaeological significance of physico-chemical signatures.

Figure 12 shows the spatial distribution of physico-chemical signatures without considering class 4, which mainly classifies interdunal and lower mid-slope samples from Kalrio, Loteshwar and Gokhijadio, while most of the inaccurate predictions of signature 4 fall within the mid to upper catena samples of Vaharvo. Physico-chemical proxies associated to HG occupation are classified in signature 1, which is mostly clustered in the south-west mid-slope and upper catena of Vaharvo and the upper catena of Gokhijadio. Signature 2 groups physico-chemical proxies associated to AP occupation, clustering in Gokhijadio, with some occurrences in samples from the mid and lower catena in

6.4. MULTI-PROXY SURVEY OF SURFACE ARCHAEOLOGICAL SCATTERS

Loteshwar and Kalrio. Signature 3 groups physico-chemical proxies characterising mixed HG/AP archaeological scatters and it is mainly clustered in samples from the upper catena of Loteshwar and some isolated samples from Kalrio and Gokhijadio.

Correspondence analysis

The results of the three statistical steps were integrated into contingency tables (Table 3) and were visualized using correspondence analysis to look for ordination and to better understand the relationships between physico-chemical clusters, archaeological classification and physico-chemical signatures.

Table 3. Contingency tables between the results of the tree main statistical steps: hierarchical clustering, archaeological classification and classification of archaeological significance accordingly to physico-chemical signatures.

	Archaeological classification (LDA-1)				Physico-chemical signatures (LDA-2)			
	1 (HG)	2 (AP)	3 (Mixed)	4 (Low)	1 (HG)	2 (AP)	3 (Mixed)	4 (Low)
Clusters								
1	8	0	0	29	31	0	0	36
2	8	5	4	7	12	8	2	2
3	3	1	2	19	4	11	2	8
4	0	0	0	2	1	0	1	0
5	0	0	14	16	1	0	16	3
6	3	8	6	1	5	13	0	0
7	2	0	5	9	2	0	4	10
8	0	0	0	4	0	0	0	4
9	0	0	2	3	0	0	1	4

6.4. MULTI-PROXY SURVEY OF SURFACE ARCHAEOLOGICAL SCATTERS

The correspondence analysis in Figure 13 (CA-1) shows the proximity distances between physico-chemical clusters (step1) and archaeological classes (step 2) by means of 3 dimensions (the first dimension explaining 57.8% of total inertia). Class 1 (HG) is closely associated to cluster 2 (found in Kalrio and Loteshwar), class 2 (AP) is associated to cluster 5 (found in Gokhijadio) and class 3 (mixed) is associated to cluster 6 (mostly found in Loteshwar). The class 4 region in the correspondence analysis is associated to mid-slope and interdunal physico-chemical clusters (3, 4, and 8) as well as cluster 1, which mainly characterises the physico-chemical proxies of Vaharvo samples.

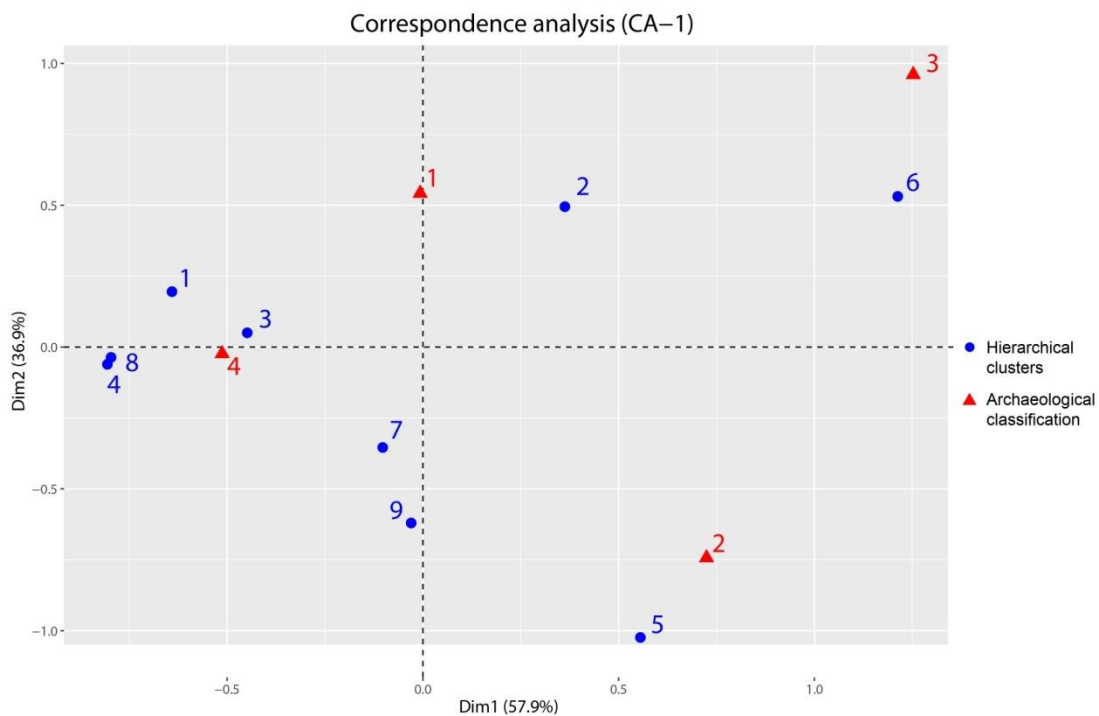


Figure 13. Correspondence analysis showing contingencies between physico-chemical clusters and archaeological classes.

Conversely, the correspondence analysis in Figure 14 (CA-2) shows the proximity distances between physico-chemical clusters (step1) and physico-chemical signatures (step 3) by means of 3 dimensions (the first dimension explaining 47.83% of total inertia). Signature 1 (HG) is closely associated with cluster 1 and to a less extent with cluster 2 (Vaharvo and Kalrio). Signatures 2 (AP) and 3 (Mixed) have the same pattern as in CA-1 and they are very close to the upper catena samples of Gokhijadio and Loteshwar, respectively. Signature 4, representing little or no anthropic occupation, is closely

6.4. MULTI-PROXY SURVEY OF SURFACE ARCHAEOLOGICAL SCATTERS

associated to the mid-slope catena of Gokhijadio (clusters 7 and 9) and more generally to lower and foot dune samples (clusters 4 and 8).

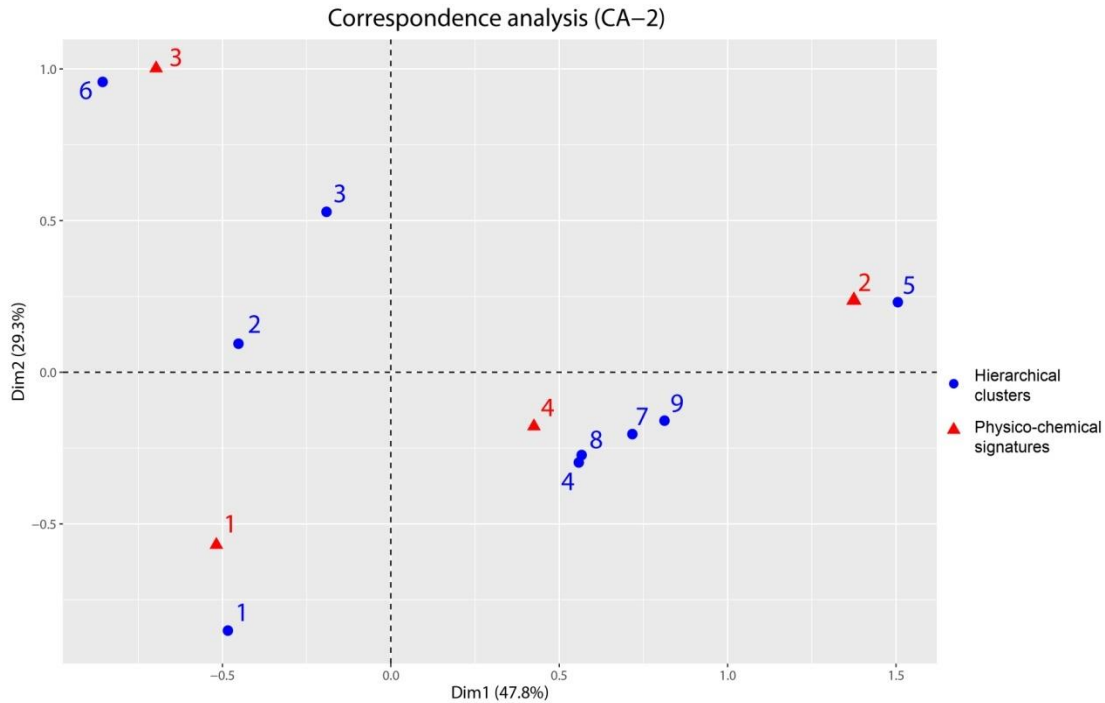


Figure 14. Correspondence analysis showing contingencies between physico-chemical clusters and physico-chemical signatures.

6.4.7. Discussion

Colluvial/Alluvial depositional environments: lower catena

Most of the physico-chemical clusters characterising the lower catena (7, 8 and 9 in Figure 9) characterise cracking clayish and silty vertisols rich in organic matter, iron and dependent silicate and metallic elements. High content of organic matter, relative to the surrounding environment, gives them a dark brown to very dark greyish colour and the clayish texture contributes to their shrink-swell potential. Vertisols are well spread in semi-arid moist regions of the Indian subcontinent, and in North Gujarat they are mostly found along the West Banas, Saraswati and Rupen river basins (Khadkikar *et al.* 1999; Pal *et al.* 2009; Bhattacharyya *et al.* 2013). In our study area, such soils are found in interdunal depressions, where finer deposits have accumulated following seasonal rainfall and derived floods, and eluviation of adjacent aeolian deposits (Juyal *et al.* 2006). Vertisols deposits, known locally as “black cotton soils” or “goradú” can be waterlogged during several months after the monsoonal

6.4. MULTI-PROXY SURVEY OF SURFACE ARCHAEOLOGICAL SCATTERS

rains (Conesa *et al.* 2014), and are suitable for semi-arid crops after the monsoonal season. Moreover, they are excellent grazing fields after harvesting (Bhan 2011).

In our physico-chemical clusters, the concentration of clay, silt and organic matter at the lower edges of the dune catena may reflect land use activities in interdune areas (such as crop residues and cattle grazing), as well as recurrent flooding events. The presence of highly dependent silicate and trace metallic elements may therefore be related to (1) potential increment of present-day irrigation and atmospheric pollution, leaching trace elements at the upper horizons of clay texture deposits (Aubert and Pinta 1980; Fengxiang 2007), as well as (2) the intensive cultivation of semi-arid cash crops (such as Indian mustard), leading to the accumulation of Pb, Zn, Ni, Cr and Cu (Ensley *et al.* 1997).

Aeolian sand dune: upper and mid-slope catena

The patterns of increasing sandy sediment, Ca concentration and carbonates content towards the top of the dune reveal the presence of calcic aridisols strongly linked to the late Quaternary sedimentation records of north-western India. Dating of the aeolian sediments for mainland Gujarat suggests an arid phase set between ca. 22 ka BP, corresponding to the enhanced dune activity in the Thar Desert around the Late Glacial Maximum, and ca. 14 ka BP, thus suggesting a maximum aeolian activity during the Pleistocene-Holocene transitional phases (Chawla *et al.* 1992; Singhvi *et al.* 2010). Arid climate conditions and aeolian sedimentation during this period originated the sand dunes of North Gujarat during the maximum extension of the Thar Desert (Juyal *et al.* 2003; Juyal *et al.* 2006). Aeolian sediments from the Thar Desert are rich in medium to fine sand (1.82-2.65 mean ϕ) and calcium carbonates (Goudie *et al.* 1973), which are introduced into aeolian deeper horizons by replacing of bicarbonate solutions and illuviation produced by precipitation (Wright and Tucker 1991). Higher Ca concentration and leaching of calcium carbonates should increment at deeper horizons in vertical dune profiles, as evidenced in the region by Goudie *et al.* (1973) and NoGAP vertical profiles carried out in Loteshwar (Balbo *et al.* in preparation). Therefore, surface concentration of Ca and carbonates in fossilised dunes (represented by physico-chemical clusters 1 and 3) reflects a sandy kunkarised surface (i.e. a crust of sand grains cemented together by a concentration of calcium carbonates that covers most of the fossilised sand dunes in the Thar region) although in most cases

this calcic surface have been nowadays disaggregated due to human and animal activities (Hedge 1977).

Anthropic markers: upper catena

Phosphorus

In semi-arid alkaline and calcic soils, P forms insoluble complexes of Ca-phosphates and remains fixed through archaeological time scales, anthropogenic P also being stable when converted to inorganic phosphate minerals from sources such as human and animal waste, stabling and grazing (Holliday 2004). As a result, prolonged human occupation may result in P enrichment, and P in archaeological settings may be found in concentrations much higher, sometimes by orders of magnitude, than those commonly found in the surrounding contexts. Archaeological research has broadly used soil P indicators in off-site and on-site studies to define the extension of otherwise invisible occupation areas, to distinguish different activity areas within a given site and to define the intensity of past anthropic activities (Sjöberg 1976; Middleton and Price 1996; Holliday and Gartner 2007; Bevan and Wilson 2013; Nielsen and Kristiansen 2014, to cite just a few). Although P analyses are not indicative of specific activities, P has been strongly correlated with cattle enclosures and food consumption activities in ethnoarchaeological hunter-gatherer and agropastoral contexts (Shahack-Gross *et al.* 2003; Rondelli *et al.* 2014).

Considering the overall continuity in settlement and land-use within our study region, the possible origin of P concentrations detected in our samples needs to be discussed. Anthropogenic P can be fixed in clay-rich soils along with such elements as Fe and Al, for example when manure is used as a fertiliser (Holliday 2004). If P was derived from manure in our study region, we would expect the highest concentrations of P in interdunal areas, where agricultural activities have traditionally been concentrated. Instead, interdunal soils give the lowest P concentrations (between 250 and 800 ppm). Thanks to recent irrigation developments, agricultural practices have recently been extended to the upper portions of fossilised dunes (e.g. castor oil at Loteshwar and Gokhijadio). Nevertheless, far from being homogeneous along the dune profile, P enrichment is attested almost exclusively in close correspondence with the areas showing high density of archaeological assemblages.

6.4. MULTI-PROXY SURVEY OF SURFACE ARCHAEOLOGICAL SCATTERS

The highest P concentrations were recorded in the upper section of the dune at Vaharvo (cluster 1, mean 930 ppm), Kalrio (cluster 2, mean 845 ppm) and Loteshwar (cluster 6, mean 2840, see [Table 4](#)). As shown in the correspondence analysis (CA-2), cluster 1 is closely associated with signatures 1 (HG) and 4 (low evidences). This signatures suggest that the dune of Vaharvo has preserved areas of slightly high P (signature 1, mean 1062 ppm) whereas most of the surface sediment has P concentrations equivalent to those found at the lower catena (signature 4, mean 396 ppm). In contrast, both cluster 6 and signature 3 (mixed occupation) representing Loteshwar upper catena samples show higher P concentrations (mean 2840 ppm and 1685 ppm, respectively), suggesting an intensification of past land use activities, corresponding to the archaeological richness of the deposit ([Ajithprasad 2004](#); [Ajithprasad 2011](#)).

Table 4. Mean values of physico-chemical proxies for selected hierarchical clusters and physico-chemical signatures.

	Hierarchical clusters					Physico-chemical signatures			
	1	2	3	5	6	1 (HG)	2 (AP)	3 (Mixed)	4 (Low)
Grain size (PSD ϕ units)	1.70	1.96	2.18	2.77	2.16	1.72	2.62	1.94	2.19
Calcium (ICP-AES %)	4.65	7.38	4.13	1.98	6.05	5.20	2.56	5.86	2.39
Iron (ICP-AES %)	0.74	0.70	0.62	0.98	0.86	0.73	0.91	0.75	0.70
Phosphorus (ICP-AES ppm)	930	845	577	899	2840	1062	799	1685	396

Although surface archaeological assemblages collected at Kalrio were similar to those from Loteshwar, both displaying artefacts from several periods, the dune top at Kalrio is mainly represented by cluster 2 (mean P of 845 ppm), associated with HG occupations with low anthropic impact.

Finally, the classification of most of the upper samples of Gokhijadio as an AP occupation (signature 3) shows a P mean of 900 ppm, while its physico-chemical clusters also shows an increasing pattern of P values towards the upper catena. Nonetheless, some top samples reach P concentration of 3800 ppm, thus suggesting a sporadic and very located usage of the dune by Anarta agro-pastoral populations.

Grain size

Several factors may have affected dune erosion since dune formation stopped some ca. 7000 years ago, including precipitation intensity, dune topography and wind direction (Srivastava *et al.* 2001; Khadkikar 2003). Sparse vegetation cover and high basic erodibility of dominant sandy soils predispose the region to wind erosion and the formation of gullies. As a result, coarse sediment fractions sit in the upper portions of stabilised dunes, whereas fine particles are transported towards interdunal depressions (Table 4). This pattern is partially attested at the prominent dune of Loteshwar, but is less explicit in the more flattened dunes of Vaharvo, Kalrio and Gokhijadio. Nonetheless, a close evaluation of grain size distribution points towards a potential marker of anthropic activity and occupation. In fact, contrary to expectations, pics of fine fractions of sediment were identified in the upper portions of the catena at Loteshwar and Gokhijadio, two sites attesting consistent occupation by AP groups. This pattern could therefore be related to dunes showing different levels of AP occupations. Overall, samples classified as AP signatures are more silty (mean ϕ value of 2.62), whereas signature 3 representing mixed scatters (mean 1.94 ϕ) has a tendency of higher presence of clay and silt particles in comparison to potential HG dune occupations (signature 1, mean 1.71 ϕ). This fine grain accumulation at the upper catena may be result of: (1) a continuous use of the top dune even today, with constant reworking material, and (2) a palimpsest debris of vanished structures from past occupations, such as cooking fires, habitation levels and pit plastering, as attested in North Gujarat ethnoarchaeological (Bhan 2011, and Figure 15c and d) and archaeological deposit examples (Balbo *et al.* 2015). In fact, the highest concentration of clay-balls and other non-cooked artefacts made with fine sediments have been found in association with Loteshwar and Gokhijadio and could well indicate activities related to pottery making and housing.

Cultural soilscapes of North Gujarat

The analysis of physico-chemical sediment descriptors at the local scale provides new possibilities for the determination of human occupation within the landscape of North Gujarat. We include these signatures in the broader analytic domain of cultural soilscapes, which are defined as distinct areas of landscapes that are the result of spatially and temporally variable geomorphic, pedogenic and cultural processes (Wells 2006). Cultural soilscapes represent an important analytical domain, little explored in

6.4. MULTI-PROXY SURVEY OF SURFACE ARCHAEOLOGICAL SCATTERS

semi-arid north-western India, which can reveal the long-term relationships between epipedons and human behaviour (Figure 15).

Two main classes of cultural soilscape arise from this research: (1) geogenical, Late Quaternary soil signatures, and (2) Holocene anthrosols. The first are represented in our analysis by signature 4, including aeolian aridisols and interdunal vertisols. Aridisols are exposed in fossilised sand dune surfaces, whereas interdunal deposits can be also described as agric horizons (Holliday 2004) due to their association with modern agriculture. Indeed, vertisols are on the basis of the economic wealth of North Gujarat due to intensive traditional and crash-crop land use (Dixit 2009). In a long-term perspective, the seasonal flooding of vertisols has structured settlement and mobility patterns in the region over time (Balbo *et al.* 2013; Salpeteur *et al.* 2015; Balbo *et al.* 2016).

Anthrosols are represented by aridisols showing different degrees of anthropic impact, which, in an initial exploratory level, can be associated to different past occupation in fossilised sand dunes. Therefore, surface anthrosols can be analysed as a palimpsest of archaeological dune deposits, exposed as the dune is eroded or affected by post-depositional processes (Fanning *et al.* 2007; Holdaway and Fanning 2010; Chase *et al.* 2014a). An interesting trade-off arise from the classification of HG and AP surface sediment signatures, based on relationships between the enrichment of P and the loosening of Ca concentration. At Vaharvo and Kalrio, an increasing pattern of Ca and carbonates towards the upper catena reflects the exposed geogenic palimpsest of the fossilised sand dune. Instead, at Loteshwar and Gokjihadio the anthrosol palimpsest is strong enough to mask the underlying geogenical Ca signature.

The identification of different intensities of dune occupation by different populations, as well as the broad delineation of settlement areas along the dune slope can therefore create a robust framework to improve further regional surveys and settlement dynamics in the study area.

6.4. MULTI-PROXY SURVEY OF SURFACE ARCHAEOLOGICAL SCATTERS

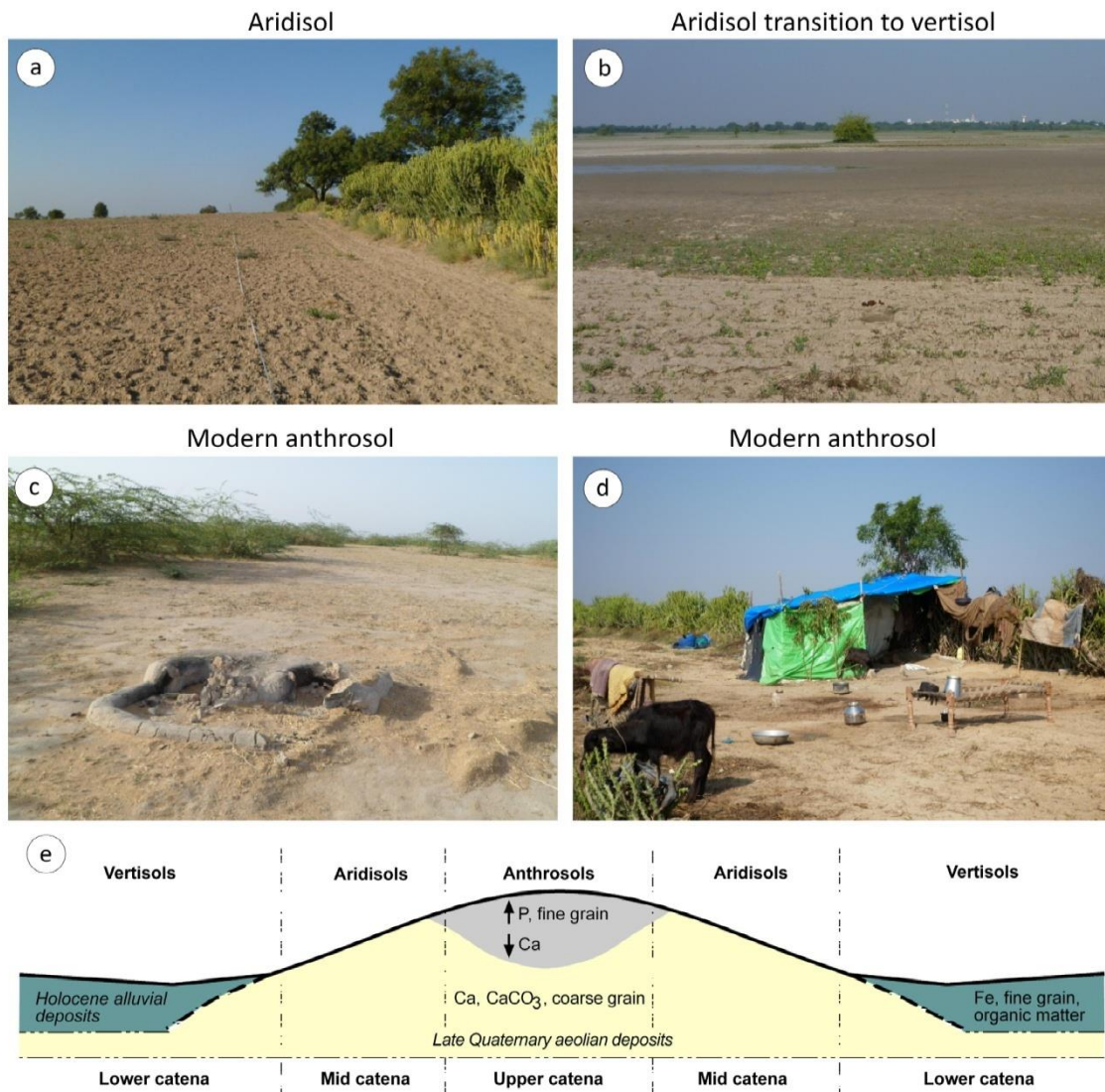


Figure 15. Cultural soilscapes of North Gujarat identified by distinct geogenical soils and anthrosols: (a) aridisol in the mid-slope dune of Loteshwar; (b) transition from aridisol near Vaharvo towards the interdunal vertisols; (c) example of cooking area from Vaharvo's archaeoloSIGTs campsite after three months of final use; (d) example of present day seasonal occupation at the upper catena of the dune Thumbda Timbo, related to post-monsoonal agropastoral exploitation of nearby vertisols.

6.4.8. Conclusions

This paper used a set of analytical tools to classify physico-chemical proxies from surface scatters in drylands, with the aim of looking critically at Holocene settlement patterns observed at the local scale. We have presented an exploratory model based on linear discriminant classifications of physico-chemical proxies accordingly to its potential archaeological significance. Surface proxies from

6.4. MULTI-PROXY SURVEY OF SURFACE ARCHAEOLOGICAL SCATTERS

fossilised sand dunes have been analysed using dune catena units to better understand depositional and post-depositional processes affecting archaeological assemblage distribution and potential anthropic markers in the sediment. Significant differences between the upper and lower slopes in fossilised sand dunes have also been attested by the classification of physico-chemical proxies in four main archaeological signatures: (1) geogenical dunes, showing aridisols rich in Ca and carbonates content; (2) low anthropised sand dunes related to hunter-gatherer occupations, (3) and (4) scatters showing different degrees of mixed occupations and pastoral land use. This classification has set the bases to identify major cultural soilscapes at the local scale within North Gujarat.

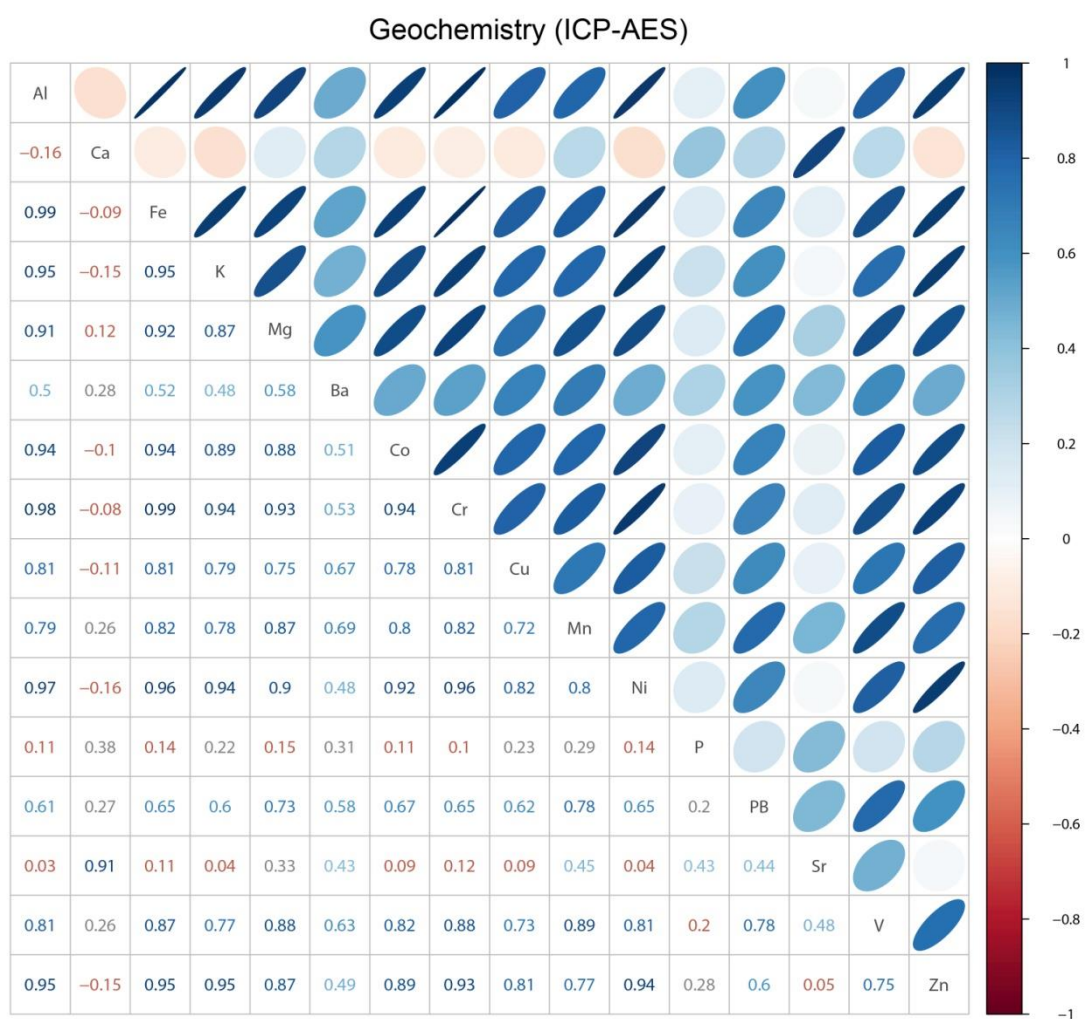
Further research is needed to make robust extrapolations based on the significance of archaeological surface scatters. Ongoing research will include more transects data, as well as regional informative samples to validate these preliminary observations. In addition, surface results will be compared with vertical profiles carried out in specific dune and interdunal locations analysed within the NoGAP. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) analyses will offer informative results to better understand the geological, biogenical and anthropic deposition of Ca within surface scatters and archaeological deposits.

6.4.9. Acknowledgements

This research arises from collaboration between the MS University of Baroda and the IMF-CSIC (Spanish National Research Council) within the framework of the North Gujarat Archaeological Project (NoGAP) and the SimulPast Project (CSD2010-00034). FC worked on this paper with funding from the JAE-PreDoc program (Spanish National Research Council and European Social Found). ALB worked on this paper with funding from the Juan de la Cierva Programme (MINECO JCI-2011-10734). FC wishes to thank Montse Guart and Patricia Povea from the Laboratori de Sedimentologia, Departament d'Estratigrafia, Paleontologia and Geosciències Marines, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona, where part of the physico-chemical analyses were carried out. The authors wish to thank Ramon Julià for his comments on soil geochemical patterns and Steve Markofsky and Natàlia Égüez for their valuable comments on the original manuscript.

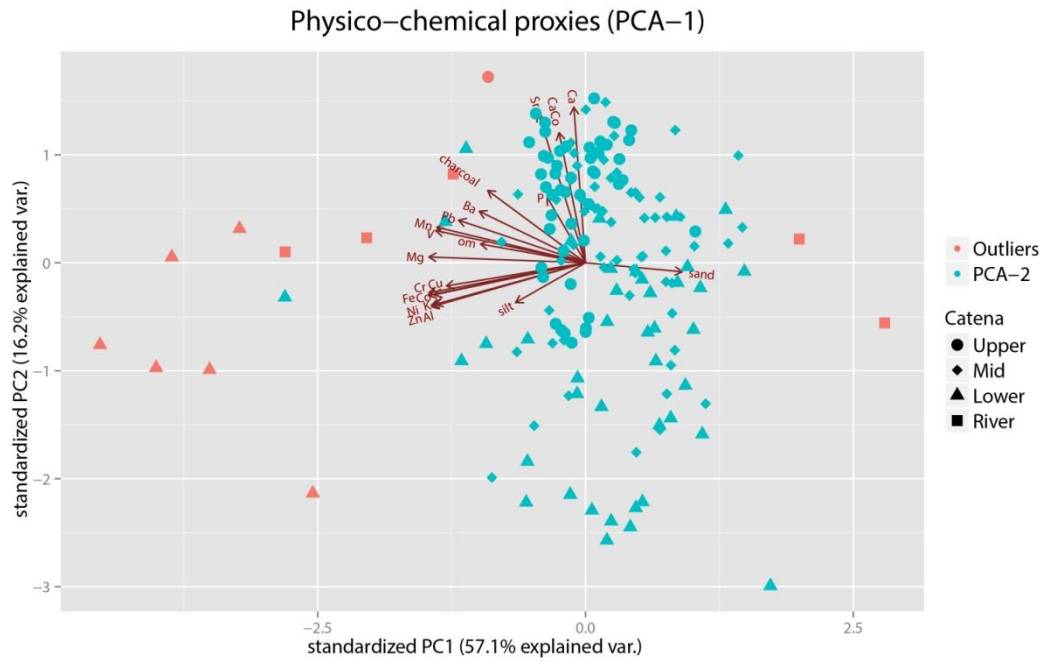
6.4.10. Electronic supplementary material

The following pages include the images that will complement the paper submission as online supplementary resources. Raw data (i.e. the dataset used to perform the statistical analysis) is included as a .kmz file.



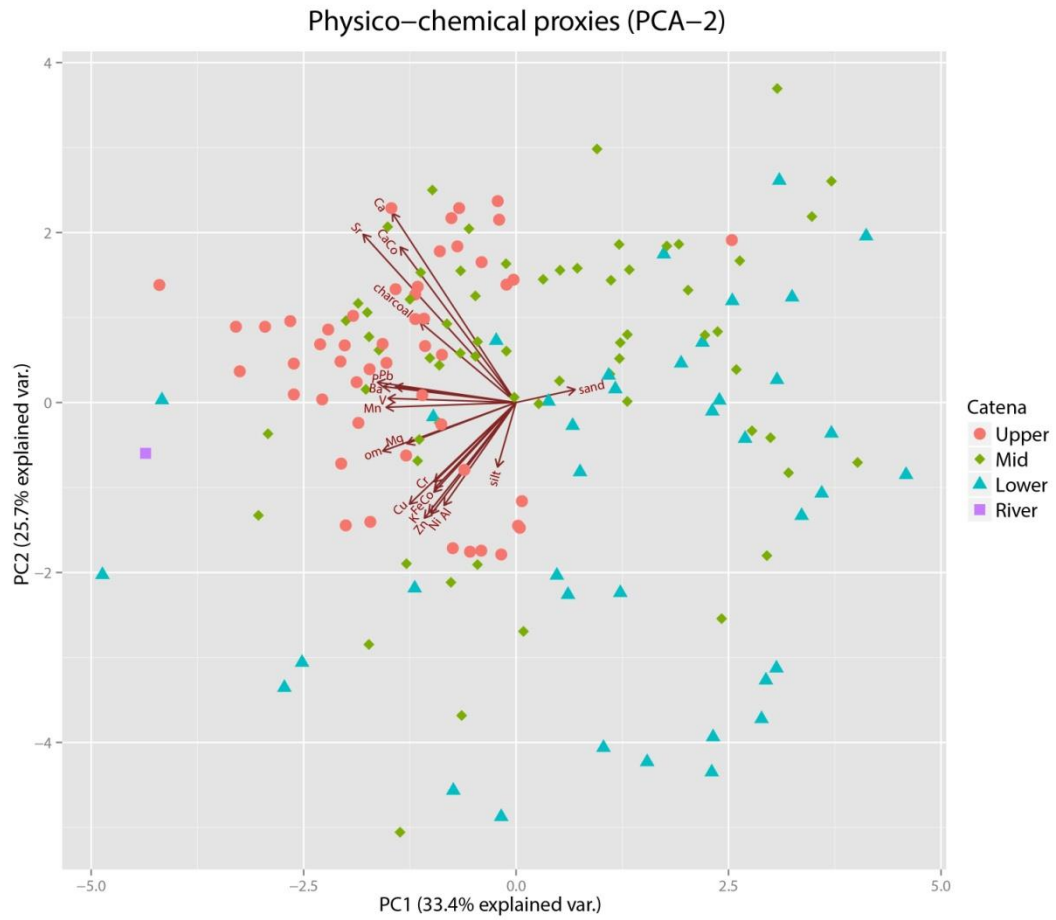
Online resource 1. Regression matrix of geochemistry concentrations (ICP-AES analysis).

6.4. MULTI-PROXY SURVEY OF SURFACE ARCHAEOLOGICAL SCATTERS

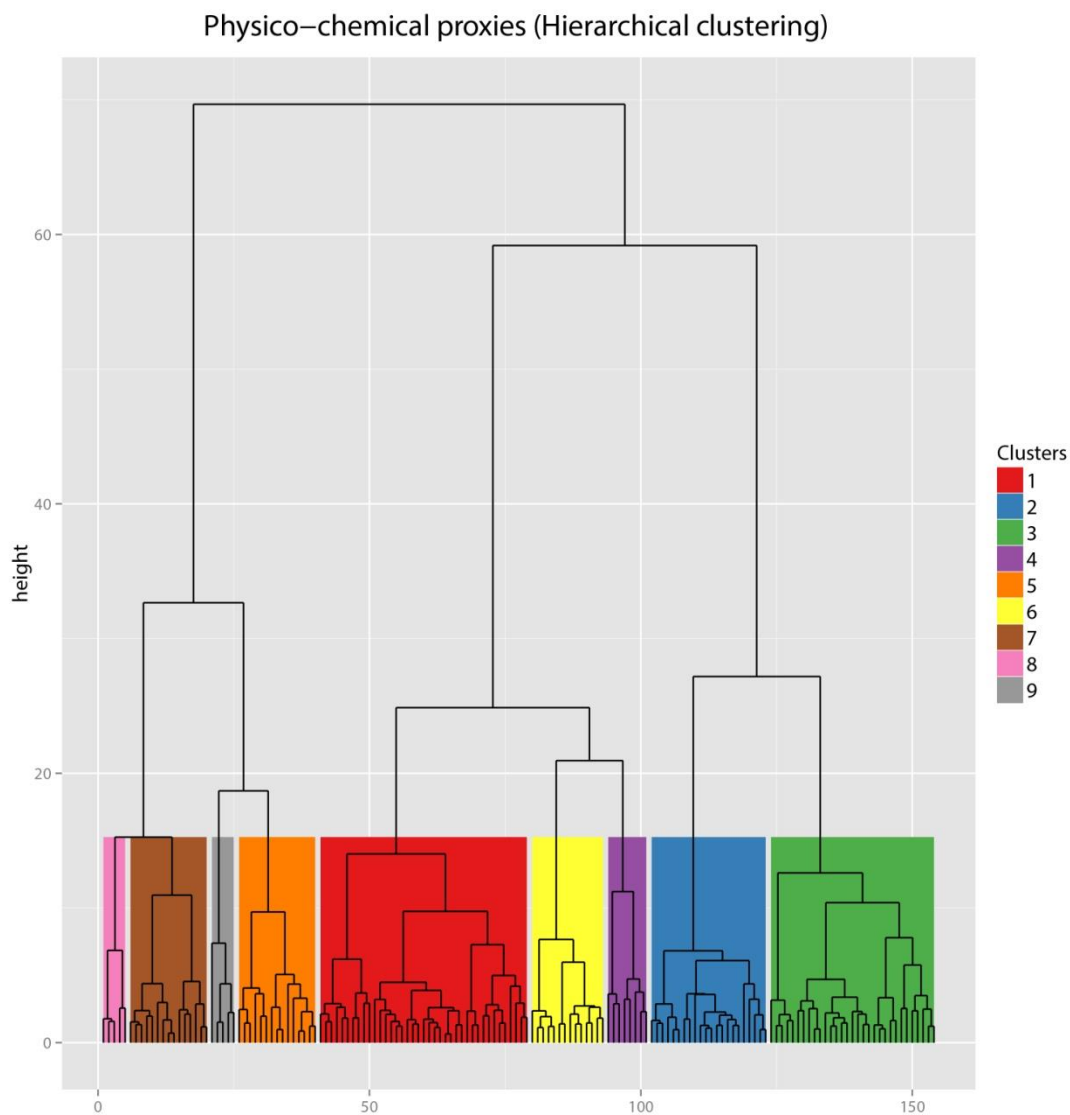


Online resource 2. PCA-1 biplot showing relationships of physico-chemical proxies and the identification of dune catena samples (to be used in PCA-2) and regional outliers.

6.4. MULTI-PROXY SURVEY OF SURFACE ARCHAEOLOGICAL SCATTERS

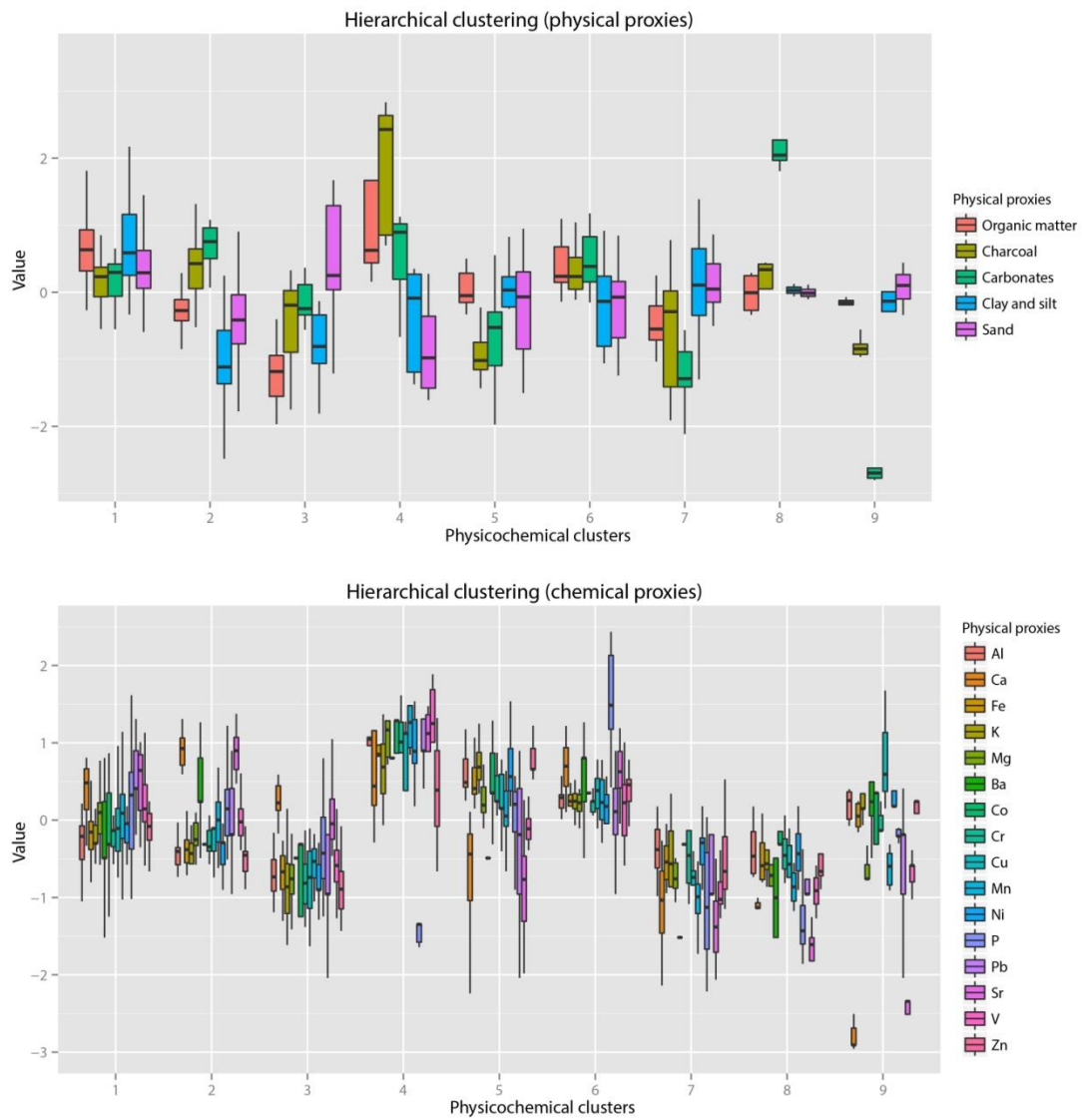


Online resource 3. PCA-2 biplot showing relationships of physico-chemical proxies after deleting regional noise identified in PCA-1.



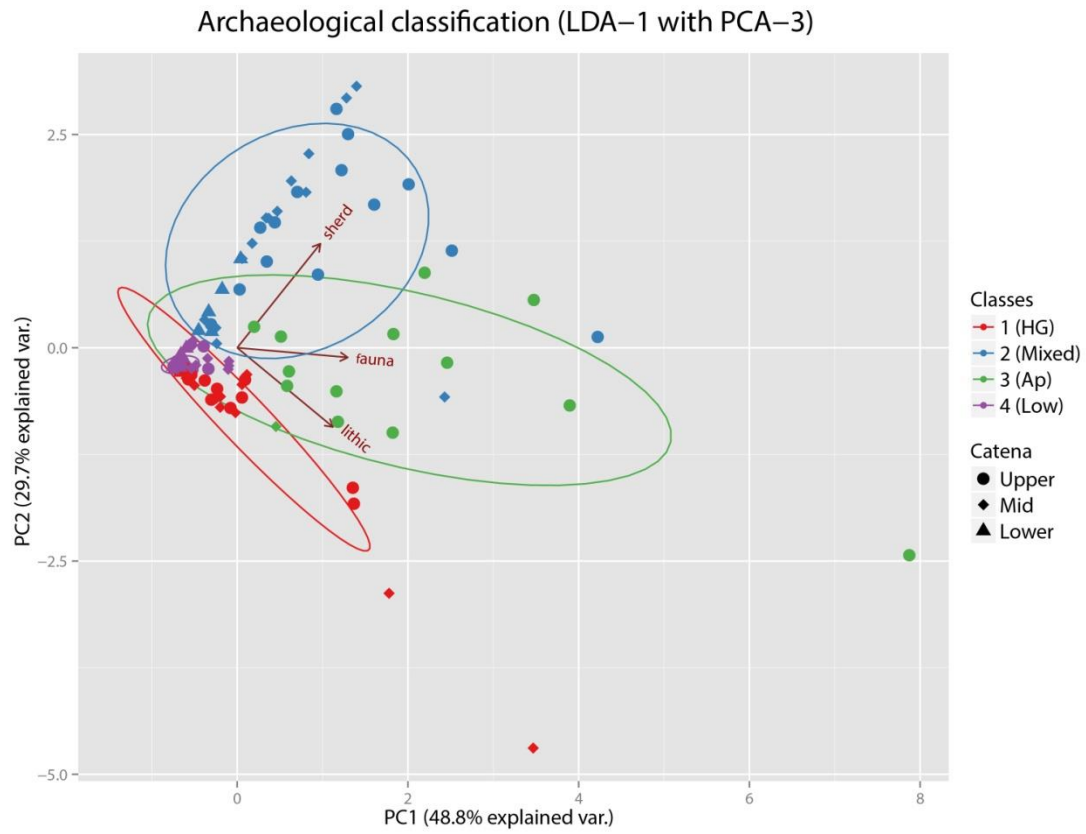
Online resource 4. Dendrogram showing the 9 physico-chemical clusters identified in the hierarchical clustering approach.

6.4. MULTI-PROXY SURVEY OF SURFACE ARCHAEOLOGICAL SCATTERS

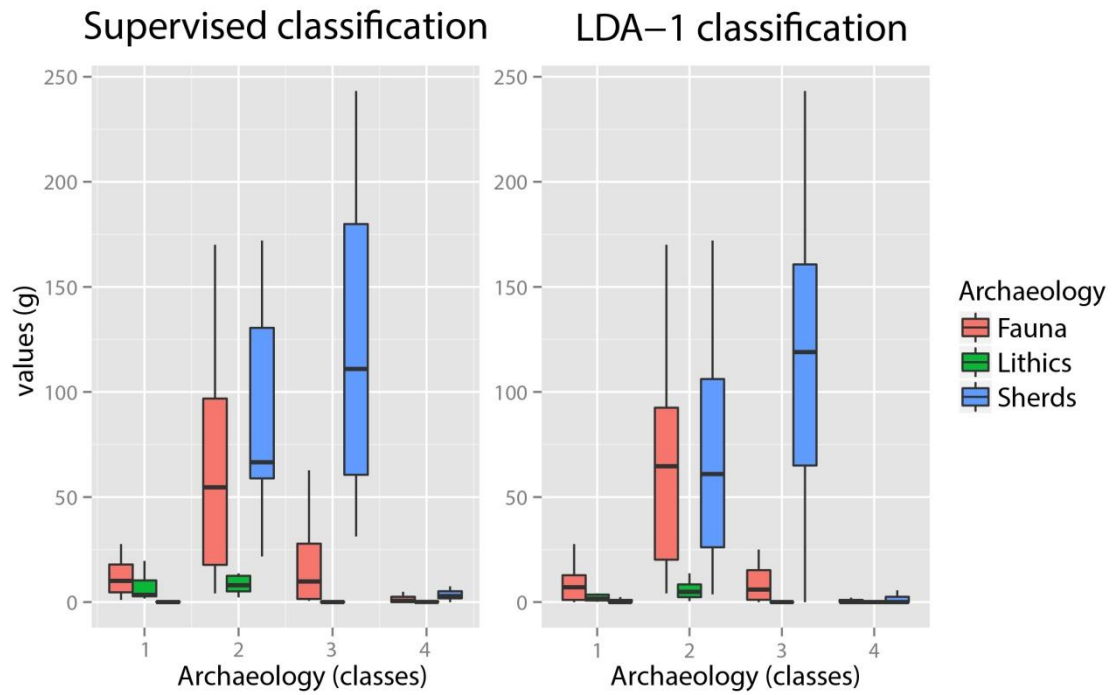


Online resource 5. Distribution of physico-chemical proxies for each physico-chemical cluster.

6.4. MULTI-PROXY SURVEY OF SURFACE ARCHAEOLOGICAL SCATTERS



Online resource 6. PCA-2 biplot showing relationships of archaeological assemblages, with the samples labeled as the resulting archaeological classification from LDA-2.



Online resource 7. Distribution of archaeological assemblages in the supervised dataset (hypothesised classes) and the final archaeological classification by LDA-2.

7. RESULTATS I DISCUSSIÓ

Aquest capítol desglossa i relaciona les principals aportacions de cada article en base a les preguntes de recerca plantejades a la secció 1.2.

7.1. Principals característiques fisiogràfiques del paisatge

El principal objectiu d'aquest estudi ha estat contextualitzar l'arqueologia del Gujarat del Nord amb les principals dinàmiques hidrològiques, fisiogràfiques i socioecològiques que han determinat (1) els patrons d'assentament durant l'Holocè i (2) la visibilitat i preservació de les evidències arqueològiques. A tal fi, la integració de dades provinents de la geoarqueologia i la teledetecció representa el principal valor afegit d'aquesta recerca.

7.1.1. Trets i unitats fisiogràfiques

En tota recerca arqueològica d'abast regional és essencial disposar d'informació cartogràfica de qualitat, tant per assegurar la correcta planificació de les campanyes de camp com per tenir una primera aproximació espacial dels patrons de distribució d'evidències arqueològiques. En regions remotes o de difícil accés, aquesta informació sovint és limitada o no està disponible, com era el cas a la nostra àrea d'estudi. Mitjançant la integració de diferents productes d'observació terrestre (imatges multiespectrals ASTER i Landsat i models digitals d'elevació SRTM) amb les validacions del treball de camp, aquesta recerca ha permès entendre els principals elements i unitats del paisatge del Gujarat del Nord i les seves relacions amb els patrons de presència o absència del registre arqueològic.

Unitats fisiogràfiques

La classificació semiautomàtica de macrounitats fisiogràfiques que es presenta en el primer article (Balbo *et al.* 2013) ofereix, per primera vegada, un marc geogràfic a escala regional on contextualitzar el resultat de les prospeccions anteriors i planificar noves prospeccions no en base a un límit administratiu, com s'havia fet fins ara, sinó en base a criteris geogràfics i edàfics (Figura 18).

7. RESULTATS I DISCUSSIÓ

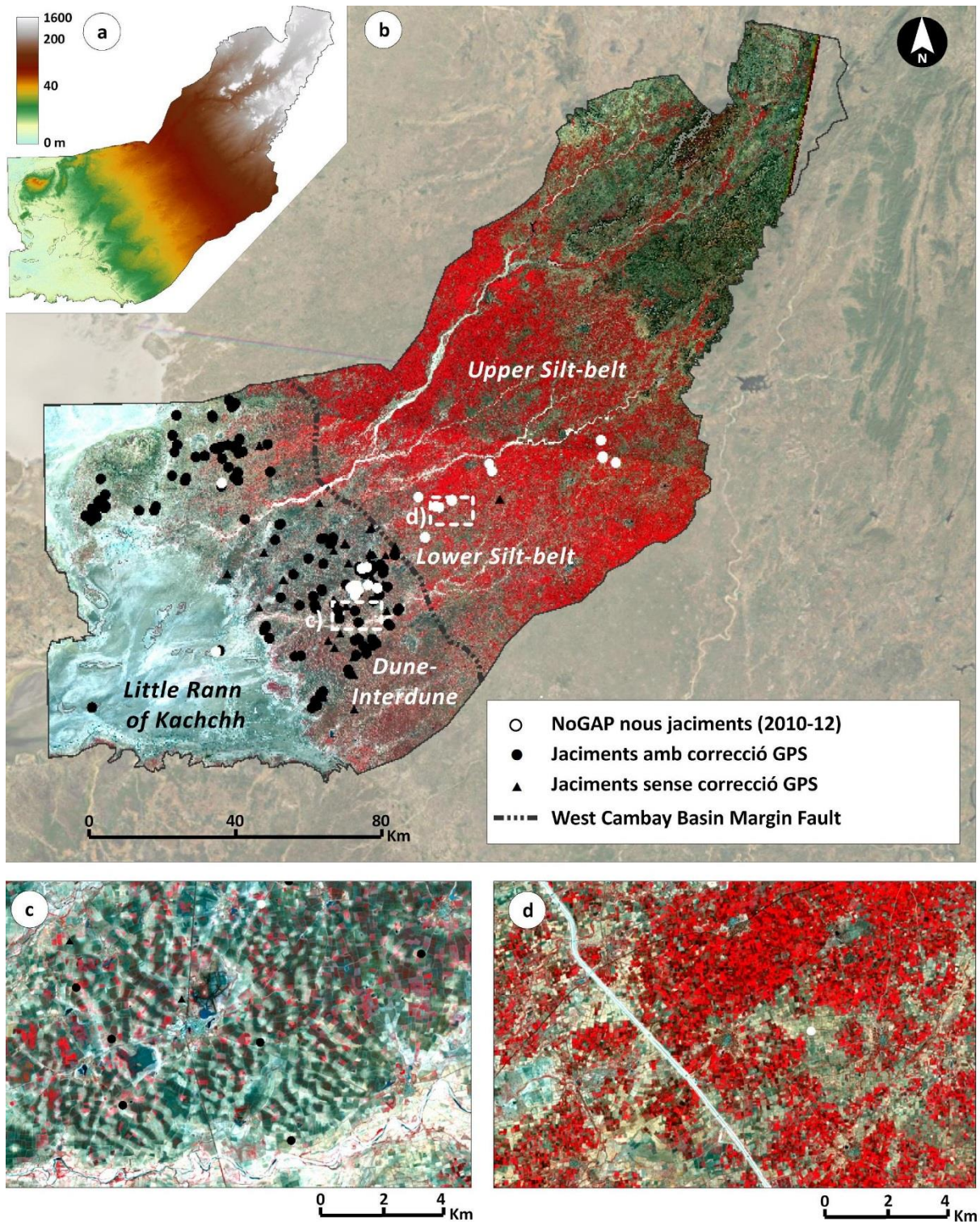


Figura 18. Principals unitats geomorfològiques de l'àrea d'estudi. (a) Elevació regional (SRTM v4); (b) Àrea d'estudi, amb la distribució dels jaciments del projecte NoGAP i la presència de la falla *West Cambay Basin Margin Fault*. (Landsat TM5 en fals color 4-3-2, 23 de gener del 200, mapa de base: ESRI World Imagery); Detall ASTER en fals color (3N-2-1, 11 de febrer de 2004), a on

7. RESULTATS I DISCUSSIÓ

s'observen (a) dunes fòssils i interdunes; i (d) sòls cultivats i irrigats a la Silt-belt que dificulten l'observació de dunes fòssils.

Les planes al·luvials del Gujarat del Nord s'estenen des de les maresmes de la *Little Rann* fins a les muntanyes Aravalli. La fossa de Khambat és el principal factor que divideix la plana al·luvial en dues unitats geomorfològiques principals: la franja costanera i la franja de l'interior. Aquestes dues unitats estan formades per dipòsits eòlics i al·luvials del Plistocè i l'Holocè (Juyal *et al.* 2003). L'anàlisi d'imatges multiespectrals ha revelat, però, certes diferències significatives que ens permeten relacionar les dinàmiques edàfiques i hidrològiques de cada unitat amb la seva cobertura terrestre i els usos del sòl actuals.

El corredor est-oest interior, anomenat *Silt-belt* en els nostres estudis per la presència homogènia d'un horitzó edàfic superficial de sorres fines i llims, discorre al llarg de la fossa tectònica de Khambat, delimitada al nord per la falla *East Cambay Basin Margin Fault*, i al sud per la falla *West Cambay Basin Margin Fault*. Aquesta unitat es pot subdividir en dues unitats fisiogràfiques: (1) l'*Upper Silt-belt*, que s'estén fins al piemont i les terres altes de les muntanyes Aravalli, i (2) la *Lower Silt-belt*, des del sud de Patan fins arribar al corredor litoral.

L'*Upper Silt-belt* presenta dunes fòssils molt més prominents i zones de cultiu més escampades, principalment en els sòls adjacents als cursos fluvials. La prominència de dunes fòssils en aquesta zona es deu a una major acumulació eòlica a prop de la barrera física de les muntanyes Aravalli. D'altra banda, aquesta zona presenta uns registres de precipitació més elevats que la zona de la *Little Rann* (Attri i Tyagi 2010). Possiblement, l'increment de precipitacions en aquesta zona afavorí la presència de vegetació arbustiva i petits boscos als peus de dunes, contribuint així a l'estabilització inicial de les dunes en aquesta àrea (Srivastava *et al.* 2001). Actualment, petits barrancs produïts per escorrenties tallen les dunes fòssils.

La *Lower Silt-belt*, en canvi, presenta una topografia plana, on les dunes fòssils no sobresurten respecte les planes al·luvials. Les observacions en fals color i les aplicacions de l'infraroig proper, comprovades posteriorment al camp, reflecteixen una intensa activitat agrícola en aquesta àrea. Aquest patró en els usos del sòl també es documenta en les fotografies CORONA de 1972, fet que fa pensar en una llarga explotació agrícola dels sòls de la *Lower Silt-belt*. Els sòls argilosos i l'explotació

7. RESULTATS I DISCUSSIÓ

dels aqüífers han permès el desenvolupament de l'agricultura intensiva, responsable de la forta erosió de les dunes fòssils en aquesta franja i, en conseqüència, de la possible obliteració del registre arqueològic en superfície. La integració d'imatges històriques CORONA, capturades en un moment en el qual l'agricultura mecanitzada no estava gaire estesa, imatges multispectrals i models d'elevació ha permès la detecció i posterior validació de dunes fòssils amb registre arqueològic en superfície o bé parcialment obliterat sota l'horitzó de sòls més recents.

Finalment, el corredor est-oest litoral s'ha anomenat *Dune-Interdune* ja que es tracta d'una extensió homogènia caracteritzada per camps de dunes fòssils, depressions inderdunals i paleocanals fluvials. Aquesta franja discorre en paral·lel a la *Little Rann*, per sota la *West Cambay Basin Margin Fault*. En aquesta zona es localitzen dunes fòssils més ben preservades, en forma de cúpula o transversals. Les dunes s'identifiquen fàcilment en imatges històriques (CORONA, en pancromàtic blanc i negre) i multi-espectrals (ASTER, LANDSAT) a causa del contrast en la reflectància espectral produïda entre el sòl eòlic i l'al·luvial (Figura 19). La combinació de bandes en infraroig (fals color) permet detectar la vegetació i els cultius en el sòl fèrtil de la interduna (molt més ric en matèria orgànica i humitat respecte la superfície de la duna). L'acumulació d'argiles i llims al sòl interdunal durant la inundació anual amb les pluges del monsó ha generat un vertisòl fèrtil, anomenat localment "*black cotton soil*", que afavoreix el cultiu estacional del mill (bajra, *Pennisetum glaucum*), el sorgo (jowar, *Sorghum bicolor*) i altres cultius de secà collits durant el període postmonsònic.

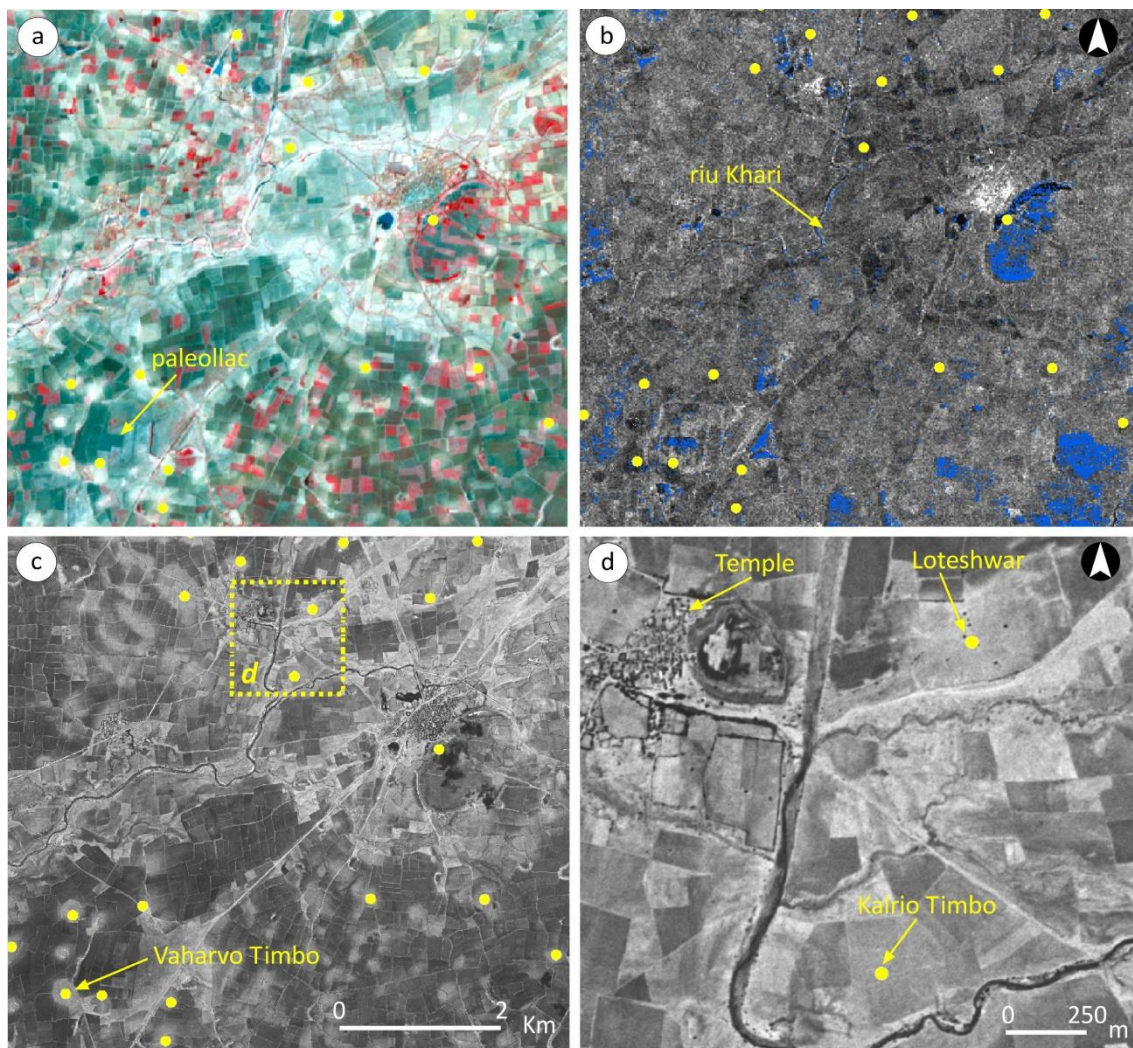


Figura 19. Aplicacions de l'observació terrestre a la conca del riu Khari, afluent del Rupen: (a) imatge ASTER (1 novembre 2004) en fals color que mostra la zona interdunal de Vaharvo Timbo identificada com a paleollac, amb assentaments al voltant (en groc) localitzats sobre dunes fòssils; (b) en blau, zones inundables durant el monsó, identificades amb imatges multitemporals de radar ENVISAT SAR; (c) ortofoto CORONA (2 maig 1972), (d) detall CORONA de les dunes de Loteshwar i Kalrio Timbo, amb paleocanals associats al riu Khari.

Dinàmiques morfològiques

Diversos autors han destacat que la depressió de la fossa de Khambat té els aqüífers més profunds de l'àrea d'estudi, reomplerts amb les diverses fases de sedimentació al·luvial produïdes durant el Plistocè (p.e. [Maurya et al. 1995](#); [Rangarajan 2008](#)). La capacitat de recàrrega dels nivells freàtics, tal i com també s'ha pogut observar amb les imatges de radar, és molt més ràpida a la *Lower Silt-belt* que en les altres unitats fisiogràfiques de l'àrea d'estudi. La combinació de diversos factors (el

7. RESULTATS I DISCUSSIÓ

reompliment al·luvial de la fossa de Khambat, la recàrrega dels aquífers i l'enriquiment dels sòls de sorres fines i llims per pedogènesi) ha generat unes característiques edafològiques pròpies que han contribuït a la intensa explotació agrícola de la *Lower Silt-belt*.

Els models d'elevació del terreny aplicats a l'àrea d'estudi mostren una gradient descendent en sentit nord-est sud-oest des de les muntanyes Aravalli fins a la zona costanera de la *Little Rann*. Els patrons d'elevació no presenten grans variacions, però la presència de la fossa de Khambat i la influència de la *West Cambay Basin Margin Fault* marquen un lleuger increment de la pendent a la *Silt-belt* vers les muntanyes Aravalli, mentre que el corredor litoral es torna molt més pla fins arribar als cons al·luvials que entren a la *Little Rann*.

La conca del riu West Banas és la més extensa, ja que la seva conca de drenatge ocupa gran part de les valls de les muntanyes Aravalli. La influència tectònica regional té un fort impacte en el cursos fluvials, tal i com s'observa amb els punts d'àrees de captació d'afluents, situats en els límits nord i sud de la fossa de Khambat, a on es tracen la *West* i *East Cambay Basin Margin Fault*. La diferència entre desnivells que crea aquesta conca origina uns cursos fluvials molt més incisos al corredor interior, mentre que al corredor litoral els cursos es tornen anastomosats. Aquest patró queda reflectit sobretot en els recurrents episodis de migració fluvial i nombrosos paleocanals que es troben a la riba baixa del riu West Banas (Balbo *et al.* 2013: Figura 5).

Patrons de deposició eòlica

L'anàlisi dels indicadors fisicoquímics ha permès reduir l'escala de les observacions regionals per identificar els patrons i processos edàfics que ens permeten diferenciar sòls d'origen geogènic (p.e. dunes fòssils sense impacte antròpic i interdunes) d'aquells sòls amb aportacions antròpiques.

Durant els processos de transport i acumulació eòlica, és a dir, quan les dunes són actives i reben l'acció directa del vent, la sorra gruixuda tendeix a acumular-se al peu de la duna, mentre que les partícules més fines salten fins a la cresta de la duna. En canvi, quan el transport eòlic disminueix, la duna s'estabilitza i comença el seu desgast, mentre que els patrons de transport de sediments s'inverteixen. La il·lumiació lateral i l'escolament superficial causat per la precipitació deposita els

7. RESULTATS I DISCUSSIÓ

sediments més fins a la part baixa, mentre que les partícules sorrenques, més gruixudes, queden retingudes al vèrtex de la duna (Gutierrez 1993).

D'altra banda, la cresta de la duna crea una crosta superficial de carbonats similar al caliche (*calcrete*, en anglès o *kankar*, en hindi). Aquesta crosta es forma en regions àrides quan els carbonats depositats per il·liviació són lixiviats al sòl. Amb el pas del temps, els carbonats precipiten cap als nivells inferiors de la duna (Wright i Tucker 1991).

Aquests patrons de transport eòlic de sediments i precipitació de carbonats s'han pogut documentar extensament en dunes actives a l'actual desert del Thar. Segons Goudie *et al.* (1973), aquestes dunes són riques en sorra fina i concentracions de carbonats de calci geogènica, produïdes per la il·liviació i precipitació de bicarbonats cap als horitzons inferiors de les dunes.

La caracterització fisicoquímica de dunes fòssils per a la nostra àrea d'estudi és similar als patrons que emergeixen de les dunes del desert del Thar, fet gens estrany si tenim en compte que les dunes del Gujarat es van formar durant l'expansió màxima del desert, produïda durant les fases àrides i de major activitat eòlica produïdes a finals del Plistocè (Chawla *et al.* 1992; Roy *et al.* 2010; Singhvi *et al.* 2010). Les dunes analitzades mostren una tendència granulomètrica d'acumulació de sediments sorrenca al llarg de la pendent, amb partícules més gruixudes a mesura que ens apropem a la part superior. Les concentracions de calci i altres carbonats en superfície també segueixen aquest patró ascendent, mentre que la informació preliminar de sondejos verticals del projecte NoGAP també mostra la precipitació de carbonats cap als nivells inferiors de dunes i l'acumulació d'aquests als nivells més inferiors (Balbo *et al.* en preparació). La deposició geogènica de carbonats de calci en el sediment eòlic també s'ha pogut corroborar a les mostres de sediment superficial de Loteshwar, analitzades mitjançant espectrometria d'infrarojos amb transformada de Fourier (FTIR, de *Fourier transform infrared spectroscopy*) per Balbo *et al.* (2015). En aquest estudi, la calcita precipitada en el sediment és d'origen geogènica i no antròpic (p.e. restes de cendres recents).

Patrons de deposició al·luvial

L'anàlisi a escala local i intrajaciment ha permès caracteritzar els sòls que configuren les depressions inderdunals del corredor litoral. Aquests són vertisòls llimosos rics en matèria orgànica, ferro i

7. RESULTATS I DISCUSSIÓ

elements de silicats metàl·lics. L'alt contingut de matèria orgànica els dóna un espectre de coloració entre el marró fosc i el grisós molt fosc, i la textura argilosa contribueix al seu potencial d'expansió-contracció en època seca, fet que produeix les esquerdes tan característiques d'aquests sòls. Els vertisòls estan ben distribuïts en les regions humides semiàrides del subcontinent indi, i al Gujarat del Nord es troben sobretot al llarg de les conques dels rius West Banas, Saraswati i Rupen (Khadkikar *et al.* 1999; Pal *et al.* 2009; Bhattacharyya *et al.* 2013).

Aquests sòls, coneguts localment com *black cotton soils* o *goradú* són el resultat de la pedogènesi de llims eòlics a partir de l'inici de les condicions climàtiques més humides durant l'Holocè inicial (Chamyal *et al.* 2003). En l'àrea d'estudi, es troben sobretot en les depressions interdunals, on els dipòsits més fins s'han acumulat per erosió i deposició relacionades amb les pluges estacionals i les inundacions que se'n deriven. Els camps interdunals, de fet, poden ser negats d'aigua durant diversos mesos després de les pluges del monsó, tal i com suggereixen les imatges de radar, i són adequats per a l'ús agrícola després de la temporada del monsó. A més, són excel·lents camps de pastura després de la collita, tal i com evidencià l'estudi etnoarqueològic efectuat per Bhan (2011).

7.1.2. Dinàmiques hidrològiques

Aquesta recerca és la primera aproximació al nord-oest indi que avalua l'extensió de les inundacions produïdes durant el monsó des d'una perspectiva arqueològica, i representa una millora substancial de la informació temporal disponible per a l'àrea d'estudi.

A escala regional, els mapes de canvi de les observacions de radar han permès identificar la variació estacional entre l'estació del monsó i del postmonsó en tres grans unitats fisiogràfiques: (1) la depressió de maresmes de la *Little Rann* i les illes que en formen part; (2) els camps de dunes i les depressions interdunals del corredor litoral, i (3) les conques hidrogràfiques dels rius West Banas, Saraswati, Rupen i Khari.

Les mitjanes de la senyal d'amplitud de radar per al període estudiat (2004-2009) mostren que la *Little Rann* no s'inunda completament, però manté canals inundats que segueixen els cons al·luvials dels rius i condueixen les riuades cap al golf del Kachchh. Sí que es formen, però, estanys de suficient envergadura com per permetre la pesca local i la subsistència de diverses espècies animals, com ara

7. RESULTATS I DISCUSSIÓ

l'ase salvatge i el flamenc. Les illes de la *Little Rann*, d'altra banda, presenten depressions i dipòsits d'aigua encara inundats durant el postmonsó, fet que remarca el paper d'aquestes illes com a àrees d'assentaments temporals encara avui en dia, a on també s'estacionen ramats de zebú (Ishnava 2011; Balbo *et al.* 2013).

Les observacions de radar també han permès contextualitzar els patrons hidrològics amb la influència tectònica que exerceix la fossa de Khambat i l'altimetria regional. Els dipòsits al·luvials que reomplen la fossa de Khambat permeten més infiltració d'aigua de pluja, que es diposita en els rics aquífers de la *Silt-belt*. Aquest procés d'infiltració repercuteix durant el postmonsó en la evotranspiració i conseqüent humitat del sòl, especialment al llarg de les conques fluvials, que és on es troba més vegetació. Per contra, els sediments sorrencs del corredor litoral, on es troben les dunes més ben preservades, són molt més impermeables i no retenen la humitat del monsó, donant-se processos d'escorrenties i escolaments superficials cap a les depressions interdunals, converties en autèntics estanys durant el monsó (Conesa *et al.* 2014: Figura 7).

Els mapes de canvi entre l'estació del monsó i els mesos postmonsònics, d'octubre a gener, mostren com moltes interdunes i paleocanals mantenen aigua al llarg de l'any. De fet, els sondejos realitzats durant les campanyes de camp del projecte NoGAP han evidenciat l'existència de paleollacs en moltes d'aquestes depressions inundables durant l'Holocè mig (Balbo *et al.* en preparació). Les imatges de radar han documentat també la capil·laritat dels sòls argilosos de la zona interior, on s'observa una ràpida absorció freàtica de l'aigua del monsó i un increment de la humitat del sòl en època postmonsònica, especialment les depressions pròximes a les conques fluvials.

7.2. Evidències arqueològiques en superfície

Per tal d'obtenir una millor comprensió de l'arqueologia a escala regional, la carta arqueològica es revisà i s'integrà amb un mapa geomorfològic que descriu les principals unitats fisiogràfiques de l'àrea d'estudi. La carta arqueològica actual consta de 202 dunes fòssils amb material arqueològic en superfície. D'aquestes, se'n visitaren 87 per comprovar el seu estat actual i corregir la seva situació i se'n afegiren 77 de noves. La detecció de dunes fòssils a la franja interior de la *Silt-belt*, molt poc explorada anteriorment, permeté identificar 18 nous jaciments.

7. RESULTATS I DISCUSSIÓ

Taula 17. Noves localitzacions amb material arqueològic en superfície i correccions de coordenades per a l'àrea d'estudi.

	<u>Total</u>	<u>NoGAP (nous)</u>	<u>MSUB⁽²⁾ (nous)</u>	<u>NoGAP (correccions)</u>	<u>MSUB (correccions)</u>
Pre-NoGAP ⁽¹⁾	120	--	--	--	3
2009	123	3	--	5	--
2010	135	17	6	8	--
2011	180	23	29	6	81
2012	184	4	--	--	--
Total	202	42	22	19	84
Coordenades revisades	167	(1) PreNoGAP inclou dades de Bhan 1994, Sonawane 1994, Sonawane i Ajithprasad 1994, Seth <i>et al.</i> 2007 i Rajesh i Patel 2007a, 2007b			
Coordenades no revisades	35	(2) <i>MS University of Baroda</i> (Ajithprasad i Sonawane 2011)			

El registre arqueològic en superfície és força heterogeni i sovint presenta varies tipologies ceràmiques (Anarta i tipologies preurbanes, urbanes i posturbanes de la Civilització de la Vall de l'Indus, indústria lítica i restes de fauna. Un total de 73 dunes presenten *a priori* un sol registre tipocronològic, incloent: 29 dunes aceràmiques microlítiques, 6 dunes amb material Anarta i 38 dunes amb material de la fase posturbana de la Civilització de la Vall de l'Indus. Totes les altres presenten una dispersió de diversos materials que, a causa de l'ús perllongat de certes tradicions (p.e. la indústria lítica o la ceràmica Anarta), dificulta determinar la seva correcta atribució cronològica sense una excavació.

7.2.1. Relacions entre els trets fisiogràfics i la distribució d'evidències arqueològiques

La totalitat de les localitzacions de la carta arqueològica es documenten en dunes fòssils. Les prospeccions regionals i en transecte han evidenciat que la major densitat d'artefactes i ecofactes es localitza a la part més alta de les dunes, sovint en proximitat al centre de les mateixes.

Ni en el transcurs d'aquesta recerca ni en la literatura existent hem pogut documentar la presència de registre arqueològic en dipòsits al·luvials interdunals. Aquest patró és pot explicar parcialment com el resultat d'una visibilitat esbiaixada en les zones interdunals a causa dels dipòsits de sediment acumulats just després de l'estabilització de les dunes a partir de l'Holocè inicial (Bhan 2011; Saini i

7. RESULTATS I DISCUSSIÓ

Mujtaba 2012). En el cas que s'hagués produït alguna activitat o ocupació en la zona interdunal, aquesta hauria estat de caràcter estacional (a causa de les inundacions d'aquestes zones durant el monsó) i, en conseqüència, els indicis d'activitat antròpica serien febles i difícils de detectar. En qualsevol cas, el patró d'assentament en duna fòssil és robust, i mostra una preferència per zones altes i no inundables durant l'estació del monsó, però pròximes a zones interdunals que retenen aigua durant el monsó i els mesos següents.

En general, l'estat actual de la recerca no permet discernir en profunditat les relacions espacials entre assentaments a nivell regional per tal de produir possibles escenaris arqueològics a partir de les datacions o classificacions cronològiques dels assentaments. Aquesta limitació es deu principalment al nombre reduït d'excavacions efectuades (12 entre les 202 localitzacions de la carta arqueològica) i al fet que la majoria de localitzacions arqueològiques presenten un palimpsest mixt en superfície amb materials que poden ser atribuïts per tipologia material a més d'una fase cronològica. D'altra banda, les àrees amb major densitat d'assentaments corresponen, principalment, a aquelles zones que han estat més explorades en els últims anys, com per exemple l'eix vertical del riu Khari. Les nostres prospeccions regionals, però, han evidenciat material arqueològic en superfície en dunes fòssils tant de la *Lower Silt-belt* com de l'*Upper Silt-belt*, zones que no havien estat explorades en profunditat anteriorment.

Amb tot, els patrons que emergeixen de les nostres observacions permeten enfortir la comprensió del paisatge arqueològic del Gujarat del Nord en una perspectiva a llarg termini. La majoria d'assentaments es localitzen en dunes pròximes a depressions que retenen aigua durant mesos després de les inundacions del monsó. A més, la major densitat d'assentaments es localitza en els corredors naturals identificats a l'àrea d'estudi: la costa de la *Little Rann* (corredor horitzontal) i les conques fluvials (corredors verticals). La *Little Rann* és encara avui en dia una reserva per a la fauna salvatge (Ishnava et al. 2011), i la presència d'otòlits, fauna i micròlits en jaciments de tipus caçadors-recol·lectors testimonien la pràctica de la caça i la pesca. Aquestes pràctiques han continuat fins avui en dia, i són complementàries a les estratègies agrícoles i pastorals que aprofiten la presència de llacs estacionals en interdunes o lleres de paleocanals, que haurien actuat com a illes ecològiques per a la fauna local i, eventualment, haurien suportat el cultiu de plantes després de la inundació (García-

[Granero et al. 2016](#)). De fet, molts poblats actuals s'han bastit a sobre dunes fòssils de la zona costanera, aprofitant les zones interdunals per l'agricultura o bé convertint-les en reserves d'aigua per abastir els serveis ecològics del municipi ([Mehta 2001](#); [Sutcliffe et al. 2011](#)).

7.2.2. Indicadors per a la caracterització d'ocupacions humanes

Anàlisi geoquímica: fòsfor

Davant la limitació que presenten els palimpsests arqueològics en superfície, aquesta recerca ha explorat el potencial que ofereix la identificació d'indicadors antròpics preservats en les signatures fisicoquímiques en sediments superficials.

L'ocupació humana perllongada en el temps pot resultar en un enriquiment de fòsfor, les concentracions del qual en nivells arqueològics es poden trobar en valors molt elevats, de vegades en ordres de magnitud, respecte les concentracions que es troben normalment en els contextos no antròpics. Efectivament, en sòls semiàrids alcalins i amb alt contingut de carbonat de calci, la presència de fòsfor forma complexos insolubles de calci-fosfats i roman fix al sòl, fins i tot al llarg d'escales d'anàlisi arqueològiques (per al període que ens ocupa, uns milers d'anys al llarg de l'Holocè). El fòsfor antropogènic també esdevé estable quan es converteix en minerals de fosfat inorgànic a partir de fonts de fòsfor associades a activitats humanes, com ara deixalles humanes i animals, estabulació i activitats de pasturatge ([Holliday 2004](#)).

La investigació arqueològica ha utilitzat àmpliament el fòsfor com a indicador per definir l'extensió d'espais d'ocupació que d'altra manera són invisibles o difícils de detectar, i també per definir la intensitat d'activitats antròpiques (veure [Sjöberg 1976](#); [Middleton i Price 1996](#); [Holliday i Gartner 2007](#); [Bevan i Wilson 2013](#); [Nielsen i Kristiansen 2014](#), per citar només alguns). Encara que les anàlisis de fòsfor no són indicatives d'activitats específiques, la detecció de fòsfor en contextos arqueològics i etnoarqueològics sovint s'interpreta com un indicador de sòls d'estabulació o d'àrees a on es dugueren a terme activitats de processament i consum d'aliments ([Shahack-Gross et al. 2003](#); [Rondelli et al. 2014](#)).

Tenint en compte la continuïtat en els patrons d'assentament, així com també la continuïtat en les pràctiques d'usos del sòl dins la nostra àrea d'estudi, l'origen de les concentracions de fòsfor

7. RESULTATS I DISCUSSIÓ

detectades en dunes fòssils ha de ser investigat i entès correctament per tal de descartar possibles factors recents que hagin comportat una forta estabilització de fòsfor en els sòls analitzats. Per exemple, el fòsfor antropogènic pot ser fixat en sòls rics en argila juntament amb elements com ara el Fe i Al, per exemple quan els fems s'utilitzen com a fertilitzant (Holliday 2004). Si el fòsfor derivés de fem o de les activitats agrícoles relacionades amb l'enriquiment de sòls, esperaríem que les majors concentracions de fòsfor es localitzarien en zones interdunals, on tradicionalment s'han concentrat les activitats agrícoles. Tot al contrari, als camps interdunals es documenta unes concentracions de fòsfor molt inferiors (entre 250 i 800 ppm) que a les zones altes de les dunes fòssils (entre 2000-5000 ppm). D'altra banda, també podríem argumentar que, com que les pràctiques agrícoles s'han estès a les parts superiors de les dunes fossilitzades (per exemple, es cultiva oli de ricí a Loteshwar i Gokhijadio), també podríem esperar una concentració de fòsfor força homogènia i elevada al llarg de la duna. El patró que s'observa, però, és ben diferent, ja que l'enriquiment i estabilització de fòsfor només es produeix a la part més alta de les dunes, en correspondència amb les zones que registren una elevada densitat d'evidències arqueològiques.

El fòsfor és, doncs, un indicador de les ocupacions humanes i la seva intensitat sobre les dunes fòssils. Sota aquesta premissa, cal remarcar que la detecció de concentracions altes de fòsfor coincideix en aquelles dunes que han estat ocupades per poblacions agropastorals, com ara Loteshwar o Gokhijadio. En canvi, les dunes amb un sol nivell d'ocupació de caçadors-recol·lectors, com ara Vaharvo i Kalrio, evidencien una concentració molt més baixa de fòsfor en el seu sediment superficial.

Anàlisi de mida de partícules

L'anàlisi de mida de partícules ha resultat molt significatiu per a la documentació d'un altre indicador antròpic basat en la distribució espacial de la granulometria. En ambients àrids i semiàrids, i especialment en climes caracteritzats per precipitacions intenses i concentrades en una breu estació de pluges, com ara el règim monsonic, les dunes fòssils experimenten processos de desgast causats per diversos factors (p.e. la intensitat de la precipitació, la topografia local i la direcció del vent). Com a resultat, les partícules de sediment més fines són transportades i dipositades a les depressions interdunals, mentre que el sediment més gruixut roman a la cresta superior de la duna (Srivastava et

7. RESULTATS I DISCUSSIÓ

al. 2001; Khadkikar 2003). La distribució espacial dels sediments fins, però, mostra un altre tipus de patró a les dunes de Loteshwar i Gokhijadio, ocupades per poblacions agropastorals. En aquests assentaments s'han identificat fraccions fines de sediment a les parts altes de les dunes, amb concordança amb la major presència de restes materials. Aquesta acumulació de gra fi a la part superior de dunes fòssils, en contra de les dinàmiques erosives i deposicionals, pot ser resultat d'un ús continu de la cresta o part més alta de la duna fins i tot avui en dia, amb una constant aportació des de la part interdunal (documentada avui en dia, per exemple, en l'extracció d'argiles per a construcció de maons) i la reelaboració dels sediments exposats en superfície. D'altra banda, la concordança de sediments fins en assentaments agropastorals pot ser també un indicador de la presència de possibles estructures avui desaparegudes, com ara focs de cuina, aplanament de nivells de circulació i revestiments tant de sitges com d'estructures d'hàbitat, tal i com ha evidenciat el registre etnoarqueològic (Bhan 2011), o també pot indicar la presència d'artefactes de fang com les boles d'argila (*clay lumps*) associades al registre material Anarta (Rajesh *et al.* 2013b).

Caracterització de sòls i sediments

L'aplicació de la prospecció per transecte intrajacement ha permès distingir entre dos tipus de sòls principals: (1) sòls geogènics, formats durant la fi del Plistocè i l'inici de l'Holocè, especialment durant els processos de sedimentació eòlica (aridisòls) i al·luvial (vertisòls), i (2) antropòsols, representats per aridisòls que mostren diferents graus d'impacte antròpic associats a diversos tipus d'ocupació en les dunes fòssils (Figura 20).

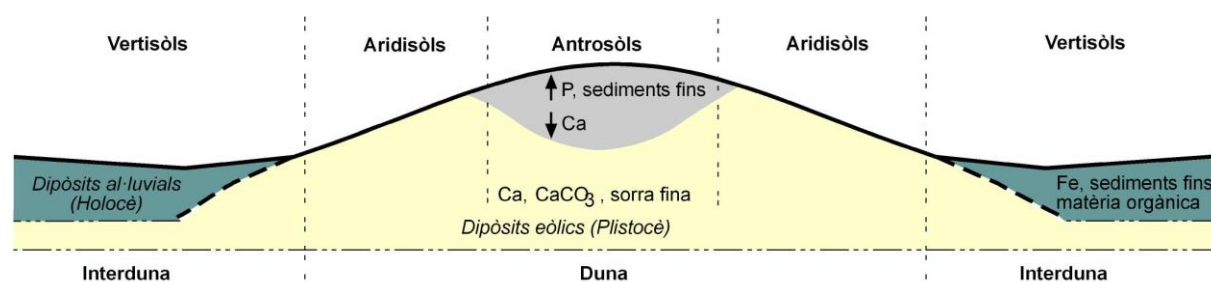


Figura 20. Esquema de la distribució de sòls geogènics i antropòsols que caracteritzen les dunes fòssils del Gujarat del Nord.

7. RESULTATS I DISCUSSIÓ

A més, la interpolació espacial de les mostres pot millorar la planificació de futures excavacions, ja que permet identificar l'extensió de la superfície de la duna original quan la inspecció visual o per satèl·lit no es suficient, i permet acotar les àrees susceptibles de preservar una potència arqueològica més significativa (Figura 21).

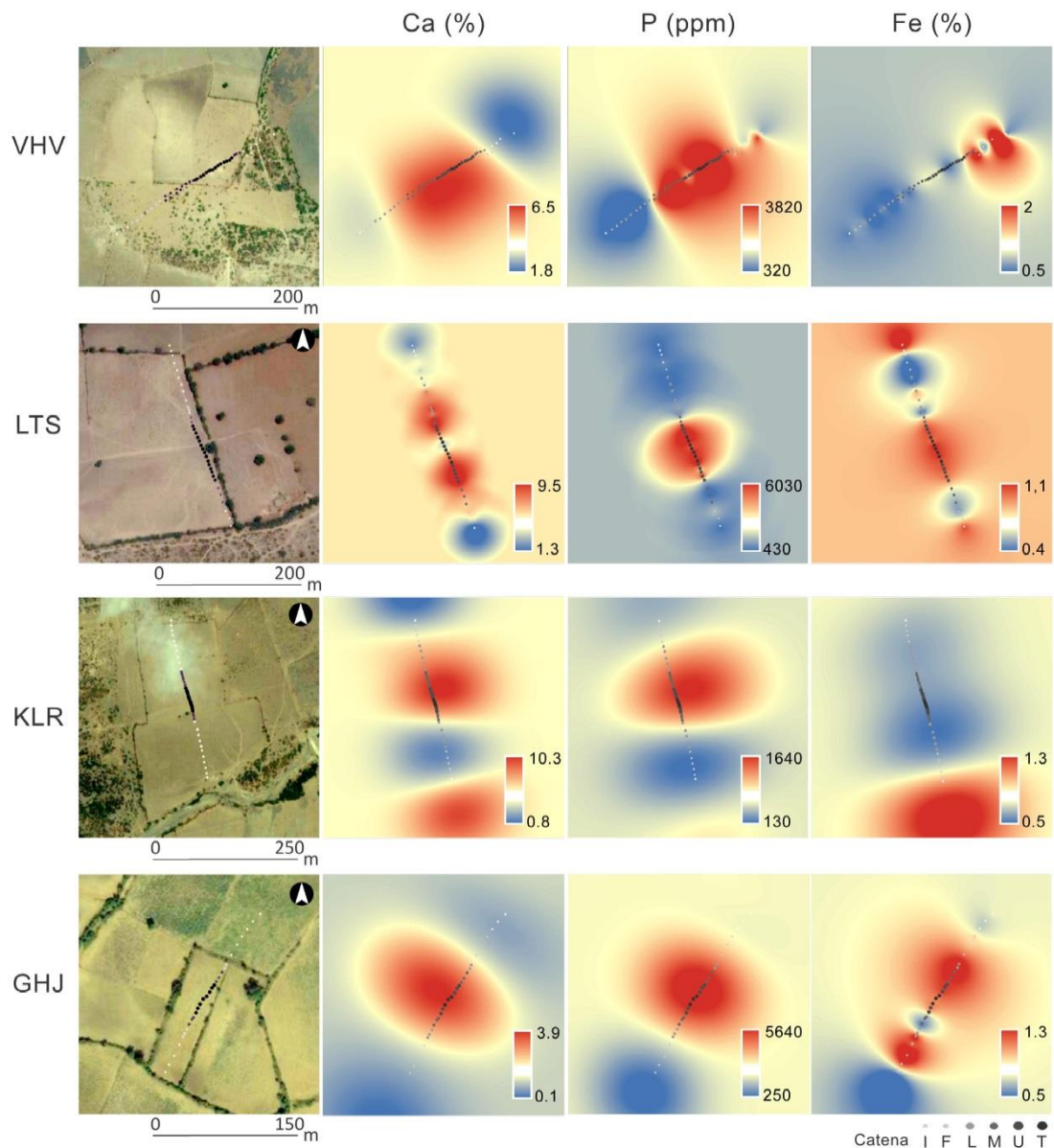


Figura 21. Interpolació espacial de variables fisicoquímiques, de caràcter exploratori, per avaluar el potencial que ofereixen els marcadors fisicoquímics per identificar i delimitar l'extensió d'aridisòls (Ca), antrosòls (P) i vertisòls (Fe) i poder així planificar zones de futures excavacions o sondejos verticals.

L'anàlisi dels descriptors fisicoquímics de sediments en superfície a escala local ofereix noves possibilitats per a determinar el possible grau d'impacte d'ocupacions humanes en el paisatge del Gujarat del Nord, més enllà de la mera descripció del registre del material arqueològic o de les observacions realitzades a escala regional. La classificació de signatures geogèniques i antròpiques ens permet parlar de paisatges amb diversos sòls culturals, que es defineixen com a àrees amb propietats edafològiques pròpies, resultat de diversos processos geomorfològics i antròpics a diferents nivells espacials i temporals, i que revelen diversos patrons tant edàfics com culturals (Wells 2006). La descripció de sòls culturals representa un nou domini analític, poc explorat en les àrees semiàrides del nord-oest de l'Índia, que pot revelar les relacions a llarg termini entre epipèdons (sòls superficials) i el comportament humà a llarg termini.

7.3. Influxos antròpics, visibilitat i preservació del registre arqueològic

El tercer article remarca i emfatitza l'autèntic valor de les fotografies CORONA: la capacitat d'observar el paisatge en alta resolució espacial en un moment previ al grans influxos antròpics produïts durant els darrers anys. El paisatge del Gujarat del Nord s'ha mantingut pràcticament sense canvis durant els últims 50 anys pel que fa als límits de camps, carreteres secundàries i pistes. D'altra banda, les fotografies CORONA han permès detectar canvis importants en la coberta terrestre a causa del ràpid desenvolupament de les infraestructures i, en particular, de la construcció de noves carreteres, canals de reg i el creixement de les zones residencials i industrials. Aquest desenvolupament ha donat lloc a un canvi en les estratègies locals d'ús del sòl, amb la proliferació de les factories de maons per a material constructiu, l'explotació industrial d'argila i sorra i la introducció d'energies renovables (p.e. parcs eòlics i solars). En molts casos, la pèrdua de la capa superior del sòl s'ha traduït en una amenaça alarmant per a la preservació del registre arqueològic exposat a la superfície de dunes fòssils.

Els patrons d'usos del sòl que anteriorment estaven determinats per la disponibilitat d'aigua del monsó (emmagatzemada en dipòsits d'aigua naturals o artificials, per al consum local) havien mantingut un paisatge fossilitzat que va suportar una economia rural basada en la irrigació dels cultius aprofitant l'aigua del monsó i les activitats ramaderes. A causa de l'augment demogràfic, la necessitat de produir cada vegada més excedent agrícola i, sobretot, la variabilitat erràtica del monsó, al llarg del

7. RESULTATS I DISCUSSIÓ

període colonial britànic els sistemes tradicionals de gestió de l'aigua van passar a segon terme amb la introducció de l'explotació de les aigües subterrànies (Agarwal i Narain 1999). A principis de la dècada de 1960, la tecnologia de bombes elèctriques va començar a introduir-se en l'economia local, fet que dóna inici a l'anomenada Revolució Verda, període durant el qual l'economia de subsistència es va transformar lentament cap a una economia de mercat basada en el cultiu de *cash-crops* possibilitat pel reg subterrani i el transport d'aigua provinent de cabals de rius més prominents (Kumar i Singh 2001). Dins d'un entorn normatiu de l'electricitat subvencionada, l'àrea sota reg subterrani total s'ha triplicat des de 1970, principalment com a resultat de les inversions privades i la creació de pous individuals (Prakash 2008). Tot i que el Gujarat està naturalment dotat d'un dels aqüífers al·luvials més rics de l'Índia gràcies a la incidència de la fossa de Khambat (Ranade *et al.* 2004), la seva explotació incontrolada per a usos agrícoles i industrials ha donat lloc a l'abandonament dels pous tradicionals i els sistemes tradicionals de recollida d'aigua del monzó (Figura 22).

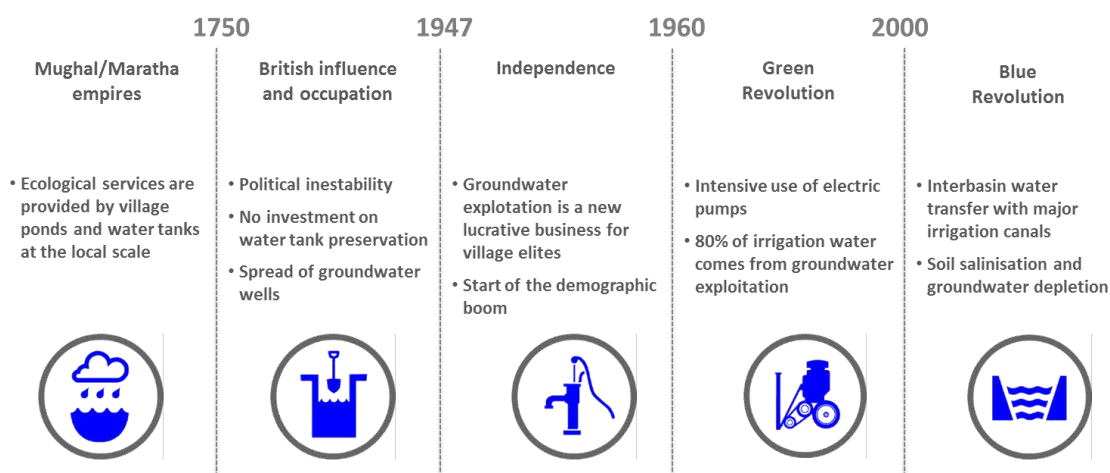


Figura 22. Tendències històriques en l'explotació dels recursos hídrics i la producció agrícola al Gujarat del Nord, segons Prakash 2008.

La crítica situació dels aqüífers augmenta la pobresa dels recursos d'aigües superficials. Per fer front als problemes d'escassetat d'aigua, en els últims deu anys el Govern ha invertit en la creació de grans canals de reg que han alterat la dependència de l'aigua del monzó a la regió. A l'any 2000, es va aprovar la construcció del Gran Canal de Narmada, un ambiciós projecte que ha construït un dels majors canals de reg al món. El canal principal té uns 458 quilòmetres de llarg, amb origen a la presa de Narmada, al Gujarat del Sud, i final a la frontera del Gujarat amb el Rajasthan, al desert del Thar.

7. RESULTATS I DISCUSSIÓ

Des del canal principal, diversos canals secundaris es ramifiquen cap al sud-oest per portar aigua al corredor litoral, que és el més afectat per l'increment de la salinitat. De fet, el canal principal s'ha construït en paral·lel al límit detectat en aquesta recerca entre la *Silt-belt* i el corredor litoral, en concordança amb la presència de la *West Cambay Basin Margin Fault*, fet que indica la major sostenibilitat en els recursos hídrics de la *Silt-belt* respecte el corredor litoral pròxim a la *Little Rann*. El flux d'aigua en el canal principal va començar, en diverses fases, entre el 2008 i el 2010 (Chinnasamy *et al.* 2015) i durant aquests pocs anys ha alterat progressivament el drenatge de l'aigua de la zona i la deposició de sediments naturals (Conesa *et al.* 2015: Figura 7).

Els cultius adaptats al règim monsònic, com ara els mills i les lleguminoses tropicals, han estat l'aliment bàsic al Gujarat del Nord durant els darrers 5000 anys. La producció agrícola moderna, però, es basa en cultius destinats a una economia de mercat que requereix una gran quantitat d'aigua provinent, en major part, de la sobreexplotació dels recursos freàtics, principal causant d'una ràpida degradació del medi. A més a més, la construcció recent de grans canals d'irrigació està canviant les dinàmiques hidrològiques locals (amb conseqüències a mig-llarg termini encara desconegudes) i destruint el patrimoni arqueològic. Els costos mediambientals de l'agricultura moderna contrasten amb el baix impacte ecològic de les estratègies de subsistència tradicionals que perviuen avui en dia, tant pel que fa a l'agricultura (Singh 2010) com pel que fa a la ramaderia (Salpeteur *et al.* en premsa). Tenint en compte aquestes consideracions, tornar al conreu tradicional i a pràctiques ancestrals de gestió de recursos hídrics sembla la millor alternativa per mirar de pal·liar la degradació ecològica en aquesta i altres regions semiàrides del món. En aquesta direcció, algunes iniciatives recents advoquen per la integració de tècniques de microirrigació (com el regatge gota a gota) amb la restitució de la irrigació postmonsònica d'abast local basada en la restauració i manteniment de zones interdunals i reserves d'aigua (Shah 2014; Chinnasamy *et al.* 2015).

Els canvis en la disponibilitat dels recursos hídrics i el conseqüent canvi edàfic que comporta l'agricultura mecanitzada (pedogènesi i rebliment de llims, en un procés similar al que es documenta a la *Silt-belt*) posa en risc la preservació del registre arqueològic exposat en superfície. Les fotografies CORONA i les sèries temporals de les noves missions de sensors multiespectrals són especialment útils per identificar els canvis en la coberta terrestre i els usos del sòl produïts per la irrigació a gran

7. RESULTATS I DISCUSSIÓ

escala i adreçar, en futurs treballs de camp, prospeccions arqueològiques en aquelles dunes fòssils amb alt risc d'erosió per l'expansió de l'activitat agrícola.

8. CONCLUSIONS

Aquesta secció remarca els resultats principals d'aquesta tesi i esbossa les possibles direccions que pren aquesta recerca. Les conclusions específiques per a cada cas d'estudi es troben en el compendi d'articles.

8.1. Aproximació multi-escalar a l'estudi del paisatge del Gujarat del Nord

El paisatge arqueològic del Gujarat del Nord s'ha estudiat des d'una perspectiva crítica sobre la base de la detecció i la identificació dels principals trets fisiogràfics i dels influxos antròpics que intervenen en les dinàmiques del paisatge a llarg termini, i que en última instància modifiquen els processos postdeposicionals i el grau de visibilitat del registre arqueològic en superfície. La integració de dades provinents de prospeccions geoarqueològiques i observacions de la teledetecció ofereix un marc metodològic robust per entendre el context espacial dels assentaments arqueològics en múltiples escales d'anàlisi. Aquesta informació és, evidentment, indispensable per entendre les dinàmiques socioecològiques produïdes en el passat, els patrons de distribució i la significança de les evidències arqueològiques en superfície.

Aquesta investigació ha permès engegar un procés de discussió que ha fixat les possibilitats i les limitacions de les aplicacions de la teledetecció i les prospeccions de camp per validar *in situ* els patrons geomorfològics i arqueològics. Els mètodes i tècniques utilitzats en aquesta recerca s'han desenvolupat per millorar les prospeccions arqueològiques tot salvant costos financers i de temps. És per a això que aquesta tesi posa en valor imatges obertes a tothom (p.e. l'arxiu Landsat o els models digitals d'elevació SRTM i Aster GDEM), imatges de baix cost (p.e. les fotografies CORONA) o imatges que es poden adquirir a partir de sol·licituds especials per a ús científic (p.e. les imatges de radar ENVISAT, a través de l'Agència Espacial Europea). D'altra banda, la integració i anàlisi multivariant de dades qualitatives de sòls i sediments ofereix una nova perspectiva per a la caracterització de jaciments en superfície.

8.1.1. Dinàmiques fisiogràfiques del paisatge

Les dinàmiques tafonòmiques del paisatge del Gujarat del Nord que alteren la visibilitat i preservació del registre arqueològic estan influïdes principalment per la tectònica regional i els fluxos antròpics actuals. A nivell geomorfològic, s'han identificat les característiques edàfiques de diferents macro-unitats fisiogràfiques, resultat de la influència en la variabilitat regional de les precipitacions del monsó i la diferència en la riquesa dels aqüífers que genera la presència de la fossa tectònica de Khambat. El processament i integració d'imatges òptiques multiespectrals i models digitals d'elevació regionals ha permès detectar distribucions d'artefactes en zones prèviament definides com zones d'absència arqueològica, com ara la *Silt-belt*.

La observació dels fenòmens hidrològics s'ha aconseguit amb l'aplicació dels sistemes de radar d'obertura sintètica. Aquests sensors, a diferència de la resta de sensors fotogramètrics o multiespectrals, permeten capturar imatges en qualsevol condició climàtica, tant de dia com de nit, i poden penetrar capes de núvols. L'exploració d'imatges multitemporals ENVISAT (2005-2009) ha permès posar en relació els registres de precipitació amb les inundacions produïdes per el monsó. Els mapes de canvi entre l'estació del monsó i els mesos postmonsònics mostren com moltes interdunes i paleocanals mantenen aigua al llarg de l'any. Les imatges de radar han documentat també la capillaritat dels sòls argilosos de la zona interior, documentant una ràpida absorció freàtica de l'aigua del monsó i un increment de la humitat del sòl en època postmonsònica, especialment les depressions pròximes a les conques fluvials.

8.1.2. Visibilitat i preservació del registre arqueològic

L'observació de patrons de distribució arqueològica a nivell regional depèn en gran mesura de la planificació de les prospeccions de camp i el grau de comprensió que tenim sobre el paisatge actual. Tradicionalment, el paisatge del Gujarat del Nord ha estat considerat com un paisatge fòssil i estable, on la relativa bona preservació de relictos geomorfològics facilitava l'estudi de patrons d'assentament. Aquesta recerca, però, evidencia que el paisatge de l'àrea d'estudi es més actiu que mai, amb dinàmiques hidrològiques dependents de la intensitat i variabilitat del monsó i un fort impacte antròpic que no farà més que créixer en els propers anys. En aquesta direcció, aquesta tesi destaca l'impacte i les conseqüències de dos períodes clau en el desenvolupament del nord-oest indi com a motor

7. RESULTATS I DISCUSSIÓ

econòmic i agrícola: la Revolució Verda (dècades de 1970-80), i l'anomenada Revolució Blava (dècades de 1990-00). La Revolució Verda canvià els cultius tradicionals, cultivats aprofitant les pluges del monso i la retenció d'aigua en zones interdunals, per cultius de més profit econòmic, que però requereixen més recursos hídrics. La Revolució Blava, conseqüència de la primera, ha comportat la construcció de grans canals d'irrigació per mitigar l'eixugament de la capa freàtica i mantenir l'aportació d'aigua extra que necessiten els nous cultius. Les conseqüències per a la preservació del registre arqueològic tot just es comencen a notar ara. En primer lloc, el canvi de les condicions edàfiques produït per la intensitat de les activitats agrícoles pot augmentar els processos d'erosió de dunes fòssils al corredor litoral, reproduint el procés que, a llarg termini, ha tingut lloc a la *Silt-belt*. D'altra banda, la construcció de canals no té en compte la presència de patrimoni arqueològic. La detecció de destrucció de jaciments per vies de la teledetecció és, ara per ara, l'única manera de documentar aquest risc per al patrimoni arqueològic de la regió i avisar a les autoritats pertinents.

8.1.3. Integració de nous indicadors físicoquímics

La revisió de la carta arqueològica ha posat de manifest la necessitat d'obtenir més contextos estratigràfics i datacions absolutes, en especial per poder entendre les interaccions entre grups de caçadors-recol·lectors i grups agropastorals a partir de l'anàlisi detallat de la indústria microlítica, els materials Anarta i les diferents estratègies de subsistència que tingueren lloc al Gujarat del Nord al llarg de l'Holocè ([García-Granero et al. 2016](#)). En aquesta direcció, l'anàlisi d'indicadors antròpics ([Rondelli et al. 2014](#); [Negre et al. 2016](#)) i les prospeccions en transsecte intrajaciment desenvolupades en el marc d'aquesta recerca aporten indicadors físicoquímics que ajuden a entendre l'extensió i la intensitat del palimpsest arqueològic en superfície.

Les signatures antròpiques definides per tècniques d'anàlisi físicoquímiques permet afegir una nova dimensió que caracteritza la intensitat de les ocupacions humanes. El mostreig físicoquímic en transsectes de superfície permet distingir diversos graus d'ocupació a la superfície de dunes fòssils. Les signatures geoquímiques del contingut de calci i fòsfor s'interpreten com signatures geogèniques i antròpiques, respectivament. El contingut de calci i carbonats, juntament amb un baix contingut de fòsfor, predomina en dunes amb una ocupació antròpica de poc impacte (com aquelles definides per

7. RESULTATS I DISCUSSIÓ

poblacions de caçadors-recol·lectors), i es correspon als nivells de carbonats similars en dunes actives del desert del Thar. Les dunes amb una o diverses fases d'ocupació de tipus agropastoral, en canvi, presenten un menor contingut de carbonats i un alt contingut en fòsfor amb un sediment molt més fi, interpretat com els residus d'una forta activitat antròpica de tipus pastoral. Les observacions fetes en aquest estudi, de caràcter exploratori i limitades a quatre contextos de dunes fòssils amb evidències arqueològiques en superfície, suggereixen una signatura edàfica molt més important per grups tipus Anarta, amb una economia basada en l'agricultura i la ramaderia, mentre que la petjada edàfica de grups de caçadors-recol·lectors és molt menor. La identificació de la intensitat i la distribució espacial d'aquestes signatures en la superfície de dunes fòssils aporta informació complementària per a la caracterització dels d'assentaments que es localitzen en la superfície de relictos geomorfològics.

8.2. Perspectives i propostes de recerca futures

El caire metodològic del compendi d'articles que configura el cos principal d'aquesta recerca ha generat un marc robust per a poder desenvolupar nous anàlisis mitjançant la teledetecció i la geoarqueologia tant en el Gujarat del Nord com en altres zones àrides i semiàrides.

Durant en els últims anys l'observació terrestre ha experimentat una millora sense precedents, deguda principalment a l'obertura de dades espacials per a ús científic i a la millora de la resolució espacial i temporal de nous sensors òptics i de radar. Aquest marc ofereix noves possibilitats per a classificació de paisatges arqueològics mitjançant sensors d'alta resolució i l'anàlisi de sèries temporals.

Com ja s'ha esmentat anteriorment, moltes zones àrides o semiàrides no disposen de cartografia temàtica de prou qualitat. A més a més, el caràcter remot i de difícil accés de moltes d'aquestes zones fa difícil la seva exploració sistemàtica i, malauradament, en alguns casos la inestabilitat política desaconsella el treball de camp per a validar les observacions fetes amb la teledetecció, com és el cas del Sàhara central o el Pròxim Orient. És per això que la recerca arqueològica actual necessita sensors d'alta resolució i amb una resolució temporal adequada per tal de poder monitoritzar i classificar remotament els paisatges arqueològics.

7. RESULTATS I DISCUSSIÓ

Durant el transcurs d'aquesta tesi doctoral, la majoria d'imatges de satèl·lit en alta resolució (especialment els satèl·lits comercials, gestionats per companyies privades) tenien un cost massa alt o bé no tenien cobertura sobre la nostra àrea d'estudi. Actualment aquest panorama ha canviat i molts sensors (p.e. Sentinel-1, WorldView 1-3, Pléiades) són avui en dia disponibles per a gairebé la totalitat de la cobertura terrestre. El proper pas, doncs, està encaminat en utilitzar aquestes recursos per a refinar les observacions fetes escala regional i obtenir classificacions automàtiques de la coberta terrestre, els usos del sòl i aquells relictos geomorfològics (p.e. dunes fossilitzades, paleocanals) que permeten la reconstrucció de dinàmiques del paisatge. En aquest direcció, la classificació estadística basada en l'anàlisi discriminant lineal (LDA), que aquesta tesi ha explorat per classificar variables arqueològiques i fisicoquímiques, ha despertat l'interès de la comunitat arqueològica recentment, tot demostrant el potencial d'aquest anàlisi per a la classificació de bandes multiespectrals (veure [Megarry et al. 2016](#)).

En els darrers anys també hi hagut una clara aposta per consolidar l'observació terrestre amb sensors de radar. La gran disponibilitat de sensors SAR (p.e. Sentinel-2, TerraSAR-X o CosmoSkyMed) i la multiplicació de les seves aplicacions ha fet retornar l'interès de la recerca arqueològica per a la detecció de paleocanals i xarxes hidrogràfiques en zones àrides ([Tapete et al. 2013](#)) i també per detectar la destrucció de patrimoni arqueològic a Síria ([Tapete et al. 2016](#)). Pel que fa a aquesta recerca, actualment està en curs l'anàlisi multitemporal d'imatges TerraSAR-X (1-5 metres de resolució) sobre el Gujarat del Nord i l'illa de Khadir, al Kachchh, a on es troba la ciutadella de Dholavira, un dels exemples urbans de la Civilització de la Vall de l'Indus més importants del Gujarat, per tal de reconstruir les xarxes hidrogràfiques a escala local.

D'altra banda, la futura integració de nous models de marcadors fisicoquímics i arqueològics permetrà una millor caracterització de sòls i sediments en superfície, més enllà del registre material recollit en el transcurs de prospeccions arqueològiques. L'extensió d'aquest mètode en noves dunes amb diversos escenaris arqueològics permetrà afinar i reforçar la identificació de signatures geogèniques o antròpiques que puguin ajudar a interpretar el palimpsest arqueològic superficial. La millora dels models fisicoquímics permetrà avaluar quines variables són més significatives per a cada signatura,

7. RESULTATS I DISCUSSIÓ

amb l'objectiu de millorar la recollida sistemàtica de mostres al camp i reduir les analítiques de laboratori.

9. REFERÈNCIES

- AGARWAL, A., NARAIN, S. 1999. Making Water Management Everybody's Business: Water Harvesting and Rural Development in India. *Gatekeeper Series*, 87, 3–20.
- AGRAWAL, D., PANDE, B. EDS. 1977. *Ecology and Archaeology of Western India*, Anand Nagar: Naurang Rai.
- AJITHPRASAD, P. 2002. The Pre-Harappan cultures of Gujarat. In S. Settar & R. Korisettar, eds. *Indian archaeology in retrospect*. New Delhi: Manohar, 129–158.
- AJITHPRASAD, P. 2004. Holocene Adaptations of the mesolithic and Chalcolithic Settlements in North Gujarat. Dins Y. Yasuda i V. Shinde, eds. *Monsoon and Civilizations*. New Delhi: Roli Books, 115–132.
- AJITHPRASAD, P. 2011. Chalcolithic Cultural Patterns and the Early harappan Interaction in Gujarat. Dins T. Osada i M. Witzel, eds. *Cultural Relations between the Indus and the Iranian Plateau during the Third Millenium BCE*. Cambridge: Harvard Oriental Series, 11–42.
- AJITHPRASAD, P., SONAWANE, V.H. 2011. The Harappa Culture in North Gujarat: A Regional Paradigm. Dins T. Osada i A. Uesugi, eds. *Linguistics, Archaeology and the Human Past*. Kyoto: Research Institute for Humanity and Nature, 223–269.
- ALLCHIN, B. 1976. Palaeolithic Sites in the Plains of Sind and Their Geographical Implications. *Geographical Journal*, 142(3), 471–489.
- ALLCHIN, B., HEDGE, K.T.M., GOUDIE, A. 1972. Prehistory and Environmental Change in Western India: A Note on the Budha Pushkar Basin, Rajasthan. *Man and Environment*, 7(4), 541–564.
- ALLCHIN, R., ALLCHIN, B. 1982. Pathways to Settled Life: the Mesolithic and Early Neolithic. Dins R. Allchin i B. Allchin, eds. *The Rise of Civilization in India and Pakistan*. Cambridge University Press.
- ALLEN, H., HOLDAWAY, S.J., FANNING, P.C., LITTLETON, J. 2008. Footprints in the sand: appraising the archaeology of the Willandra Lakes, western New South Wales, Australia. *Antiquity*, 82(315), 11–24.
- ATTRI, S.D., TYAGI, A. 2010. *Climate profile of India*, New Delhi: India Meteorological Department.
- AUBERT, H., PINTA, M. 1980. *Trace elements in Soils*, New York: Elsevier.
- BALBO, A.L., RONDELLI, B., CONESA, F.C., LANCELOTTI, C., MADELLA, M., AJITHPRASAD, P. 2013. Contributions of geoarchaeology and remote sensing to the study of Holocene hunter–gatherer and agro-pastoral groups in arid margins: The case of North Gujarat (Northwest India). *Quaternary International*, 308-309, 53–65.

9. REFERÈNCIES

- BALBO, A.L., RUBIO-CAMPILLO, X., RONDELLI, B., RAMÍREZ, M., LANCELOTTI, C., TORRANO, A., SALPETEUR, M., LIPOVETZKY, N., REYES-GARCÍA, V., MONTAÑOLA, C., MADELLA, M., RUBIO, X. 2014. Agent-based simulation of Holocene monsoon precipitation patterns and hunter-gatherer population dynamics in semi-arid environments. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 21, 426–446.
- BALBO, A.L., CABANES, D., GARCÍA-GRANERO, J.J., BONET, A., AJITHPRASAD, P., TERRADAS, X. 2015. A microarchaeological approach for the study of pits. *Environmental Archaeology*, 20(4), 390–405.
- BALBO, A.L., GÓMEZ-BAGGETHUN, E., SALPETEUR, M., PUY, A., BIAGETTI, S., SCHEFFRAN, J. 2016. Resilience of small-scale societies. A view from drylands. *Ecology and Society*, 1, 1–23.
- BARKER, G., GILBERSTON, D. 2000. Living at the margin: themes in the archaeology of drylands. Dins G. Barker i D. Gilberston, eds. *The Archaeology of Drylands. Living at the margin*. New York: Routledge, 63–85.
- BARTON, C.M., ULLAH, I.I., BERGIN, S. 2010. Land use, water and Mediterranean landscapes: modelling long-term dynamics of complex socio-ecological systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1931, 5275–5297.
- BARTON, C.M., ULLAH, I.I., BERGIN, S.M., MITASOVA, H., SARJOUGHIAN, H. 2012. Looking for the future in the past: Long-term change in socioecological systems. *Ecological Modelling*, 241, 42–53.
- BARTSCH, A., DOUBKOVA, M., PATHE, C., SABEL, D., WAGNER, W., WOLSKI, P. 2008. River flow and wetland monitoring with ENVISAT ASAR Global Mode in the Okavango basin and delta. *Proceedings of the Second IASTED Africa Conference Water Resource Management (AfricaWRM)*, 152–156.
- BARTSCH, A., TROFAIER, A.M., HAYMAN, G., SABEL, D., SCHLAFFER, S., CLARK, D.B., BLYTH, E. 2012. Detection of open water dynamics with ENVISAT ASAR in support of land surface modelling at high latitudes. *Biogeosciences*, 9(2), 703–714.
- BECK, A., PHILIP, G., ABDULKARIM, M., DONOGHUE, D. 2007. Evaluation of Corona and Ikonos high resolution satellite imagery for archaeological prospection in western Syria. *Antiquity*, 81, 161–175.
- BEVAN, A., CONOLLY, J. 2009. Modelling spatial heterogeneity and nonstationarity in artifact-rich landscapes. *Journal of Archaeological Science*, 36(4), 956–964.
- BEVAN, A., WILSON, A. 2013. Models of settlement hierarchy based on partial evidence. *Journal of Archaeological Science*, 40(5), 2415–2427.
- BEVAN, A., CREMA, E., LI, X., PALMISANO, A. 2013. Intensities, interactions and uncertainties: some new approaches to archaeological distributions. Dins A. Bevan i M. Lake, eds. *Computational Approaches to Archaeological Spaces*. Walnut Creek: Left Coast Press.
- BHAN, K.K. 1994. Cultural Development of the Prehistoric Period in North Gujarat with Reference to

9. REFERÈNCIES

- Western India. *South Asian Studies*, 10, 71–90.
- BHAN, K.K. 2011. Pastoralism in Late Harappan Gujarat, western India: an ethnoarchaeological approach. Dins T. Osada i A. Uesugi, eds. *Linguistics, Archaeology and the Human Past*. Kyoto: Research Institute For Humanity And Nature, 1–27.
- BHATTACHARYYA, T., PAL, D.K., MANDAL, C., CHANDRAN, P., RAY, S.K., SARKAR, D., VELMOURUGANE, K., SRIVASTAVA, A., SIDHU, G.S., SINGH, R.S., SAHOO, A.K., DUTTA, D., NAIR, K.M., SRIVASTAVA, R., TIWARY, P., NAGAR, A.P., NIMKHEDKAR, S.S. 2013. Soils of India: historical perspective, classification and recent advances. *Current Science*, 104(10), 1308–1323.
- BISHT, R.S., DORJE, C., BANERJI, A. EDS. 2000. *Indian Archaeology 1993-04: a review*, New Delhi: Archaeological Survey of India.
- BLAU, S., DENHAM, T., MAGEE, P., BIGGINS, A., ROBINSON, J., JASIM, S. 2008. Seeing Through the Dunes: Geophysical Investigations at Muweilah, an Iron Age Site in the United Arab Emirates. *Journal of Field Archaeology*, 27, 117–129.
- BLINKHORN, J., ACHYUTHAN, H., PETRAGLIA, M., DITCHFIELD, P. 2013. Middle palaeolithic occupation in the thar desert during the upper pleistocene: The signature of a modern human exit out of Africa? *Quaternary Science Reviews*, 77, 233–238.
- BLINKHORN, J. 2014. Late Middle Palaeolithic surface sites occurring on dated sediment formations in the Thar Desert. *Quaternary International*, 350, 94–104.
- BOIVIN, N., FULLER, D.Q., DENNELL, R., ALLABY, R., PETRAGLIA, M.D. 2013. Human dispersal across diverse environments of Asia during the Upper Pleistocene. *Quaternary International*, 300, 32–47.
- BRANTINGHAM, P.J., SUROVELL, T.A., WAGUESPACK, N.M. 2007. Modeling post-depositional mixing of archaeological deposits. *Journal of Anthropological Archaeology*, 26(4), 517–540.
- BROWN, A.G., 1997. *Alluvial geoarchaeology. Floodplain archaeology and environmental change*, Cambridge: Cambridge University Press.
- BURGER, O., TODD, L. 2006. Grain, Extent, and Intensity: The Components of Scale in Archaeological Survey. Dins G. Lock i B. Leigh, eds. *Confronting Scale in Archaeology. Issues of Theory and Practice*. New York: Springer, 235–256.
- BURGER, O., TODD, L.C., BURNETT, P., STOHLGREN, J., STEPHENS, D. 2002. Multi -Scale and Nested-Intensity Sampling Techniques for Archaeological Survey. *Journal of Field Archaeology*, 29, 409–423.
- BUTZER, K.W. 1979. The Prehistory and Palaeogeography of the Great Indian Desert. *The South African Archaeological Bulletin*, 34(129), 71.
- BUTZER, K.W. 1982. *Archaeology as Human Ecology. Method and Theory for a Contextual Approach*,

9. REFERÈNCIES

- Cambridge: Cambridge University Press.
- BUTZER, K.W. 1996. Ecology in the Long View: Settlement Histories, Agrosystemic Strategies, and Ecological Performance. *Journal of Field Archaeology*, 23(2), 141–150.
- CALEGARI, M.R., MADELLA, M., VIDAL-TORRADO, P., PESSEDA, L.C.R., MARQUES, F.A. 2013. Combining phytoliths and $\delta^{13}\text{C}$ matter in Holocene palaeoenvironmental studies of tropical soils: An example of an Oxisol in Brazil. *Quaternary International*, 287, 47–55.
- CASANA, J., COTHREN, J. 2008. Stereo analysis, DEM extraction and orthorectification of CORONA satellite imagery: archaeological applications from the Near East. *Antiquity*, 82(317), 732-749.
- CASANA, J., COTHREN, J. 2013. The CORONA Atlas Project: Orthorectification of CORONA Satellite Imagery and Regional-Scale Archaeological Exploration in the Near East. In D. C. Comer & M. J. Harrower, eds. *Mapping Archaeological Landscapes from Space*. New York: Springer, 31–41.
- CASANA, J., COTHREN, J., KALAYCI, T. 2012. Swords into Ploughshares: Archaeological Applications of CORONA Satellite Imagery in the Near East. *Internet Archaeology*, 32.
- CHAMYAL, L.S., MAURYA, D.M., RAJ, R. 2003. Fluvial systems of the drylands of western India: a synthesis of Late Quaternary environmental and tectonic changes. *Quaternary International*, 104(1), 69–86.
- CHASE, B. 2010. Social change at the Harappan settlement of Gola Dhoro: a reading from animal bones. *Antiquity*, 84, 528–543.
- CHASE, B., AJITHPRASAD, P., RAJESH, S.V., PATEL, A., SHARMA, B. 2014a. Materializing Harappan identities: Unity and diversity in the borderlands of the Indus Civilization. *Journal of Anthropological Archaeology*, 35, 63–78.
- CHASE, B., MEIGGS, D., AJITHPRASAD, P., SLATER, P.A. 2014b. Pastoral land-use of the Indus Civilization in Gujarat : faunal analyses and biogenic isotopes at Bagasra. *Journal of Archaeological Science*, 50, 1-15.
- CHAWLA, S., DHIR, R.P., SINGHVI, A.K. 1992. Thermoluminescence Chronology os Sand Profiles in the Thar Desert and Their Implications. *Quaternary Science Reviews*, 11, 25–32.
- CHINNASAMY, P., MISRA, G., SHAH, T., MAHESHWARI, B., PRATHAPAR, S. 2015. Evaluating the effectiveness of water infrastructures for increasing groundwater recharge and agricultural production – A case study of Gujarat, India. *Agricultural Water Management*, 158, 179–188.
- CHUVIECO, E. 2010. *Teledetección Ambiental. La observación de la tierra desde el espacio*, Barcelona: Ariel Ciencia.
- CIGNA, F., TAPETE, D., LASAPONARA, R., MASINI, N. 2013. Amplitude Change Detection with ENVISAT ASAR to Image the Cultural Landscape of the Nasca Region, Peru. *Archaeological Prospection*, 20(2), 117-131.

9. REFERÈNCIES

- CONESA, F.C. 2011. *Els assentaments prehistòrics a la regió semiàrida del Gujarat del Nord (Índia): una aproximació geoarqueològica i geomorfològica*. Tesi de màster. Universitat de Barcelona.
- CONESA, F.C., DEVANTHÉRY, N., BALBO, A.L., MADELLA, M., MONTSERRAT, O. 2014. Use of satellite SAR for understanding long-term human occupation dynamics in the monsoonal semi-arid plains of North Gujarat, India. *Remote Sensing*, 6, 11420–11443.
- CONESA, F.C., MADELLA, M., GALIATSATOS, N., BALBO, A.L., RAJESH S.V., AJITHPRASAD, P. 2015. CORONA photographs in monsoonal semi-arid environments: addressing archaeological surveys and historic landscape dynamics over North Gujarat, India. *Archaeological Prospection*, 22, 75–90.
- CONESA, F.C., GARCÍA-GRANERO, J.J., MADELLA, M., BALBO, A.L., GADEKAR, C.S., LANCELOTTI, C., RAJESH, S. V., AJITHPRASAD, P. (en premsa). Poblament, recursos i medi ambient en zones àrides: el North Gujarat Archaeological Project (NoGAP). *Tribuna d'Arqueologia 2014-2015*.
- CONOLLY, J., LAKE, M. 2006. *Geographical Information Systems in Archaeology*, Cambridge: Cambridge University Press.
- COSTA, A.G. 2015. New Observations on Animal Bones and Lithics from Tejpur, Northern Gujarat. *Heritage: Journal of Multidisciplinary Studies in Archaeology*, 3, 33–43.
- COSTA, A.G., AJITHPRASAD, P., SHARMA, B. 2011. Tracking Early Humans in coastal Western India: the Gujarat Palaeoanthropology Project. *Antiquity Gallery*, 85(327).
- CUMMING, G.S. 2011. *Spatial Resilience in Social-Ecological Systems*, New Delhi: Springer.
- DAVIE, T., KELLY, R., TIMONCINI, M. 2000. SAR imagery used for soil moisture monitoring: the potential. *Remote Sensing and Hydrology*, 2000(267), 327–332.
- DEO, S.G., GHATE, S., RAJAGURU, S.N. 2011. Holocene environmental changes and cultural patterns in coastal western India: A geoarchaeological perspective. *Quaternary International*, 229(1-2), 132–139.
- DINCAUZE, D.F. 2000. *Environmental Archaeology*, Cambridge: Cambridge University Press.
- DIRIX, K., MUCHEZ, P., DEGRYSE, P., MU, B., POBLOME, J. 2013a. Integrating Multi-element Geochemical and Magnetic Survey at Ancient Sagalassos (Southwest Turkey): Anthropogenic Versus Natural Anomalies. *Archaeological Prospection*, 20(4), 233–247.
- DIRIX, K., MUCHEZ, P., DEGRYSE, P. AND MU, B. 2013b. Integrating geochemical survey and magnetic prospection on an archaeological site in SW-Turkey. *EGU General Assembly 2013*, Publication 4/2013.
- DIXIT, A.K. 2009. Agriculture in a High Growth State: Case of Gujarat (1960 to 2006). *Economic and Political Weekly*, 69(50), 64–71.
- DIXIT, Y., HODELL, D.A., PETRIE, C.A. 2014. Abrupt weakening of the summer monsoon in northwest

9. REFERÈNCIES

- India 4100 yr ago. *Geology*, 42(4), 339–342.
- DUNNELL, R.C. 1992. The Notion Site. In J. Rossignol & L. Wandsnider, eds. *Space, Time, and Archaeological Landscapes*. Springer, 21–43.
- ENSLEY, B., RASKIN, I., SALT, D.E. 1997. Phytoremediation Applications for Removing Heavy Metal Contamination from Soil and Water. Dins G. S. Saylor, J. Sanseverino i K. Davis, eds. *Biotechnology in the Sustainable Environment*. New York: Springer, 59–64.
- EVANS, J.G. 1978. *An introduction to Environmental Archaeology*, New York: Cornell University Press.
- FANNING, P.C., HOLDAWAY, S.J. 2001. Artifact Visibility at Open Sites in Western New South Wales, Australia. *Journal of Field Archaeology*, 255–271.
- FANNING, P.C., HOLDAWAY, S.J., RHODES, E.J. 2007. A geomorphic framework for understanding the surface archaeological record in arid environments. *Geodinamica Acta*, 20(4), 275–286.
- FENGXIANG, X.H. 2007. *Biogeochemistry of Trace Elements in Arid Environments*, New York: Springer.
- FERNÁNDEZ-LÓPEZ DE PABLO, J., BARTON, C.M. 2015. Bayesian Estimation Dating of Lithic Surface Collections. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 22(2), 1–25.
- FERRETTI, A., MONTI-GUARNIERI, A., PRATI, C., ROCCA, F. 2007. *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*, Rome: European Space Agency.
- FOWLER, M.J.F., FOWLER, Y.M. 2005. Detection of archaeological crop marks on declassified CORONA KH-4B intelligence satellite photography of Southern England. *Archaeological Prospection*, 12(4), 257–264.
- FRENCH, C.A.I., SULAS, F., PETRIE, C.A. 2014. Expanding the research parameters of geoarchaeology: case studies from Aksum in Ethiopia and Haryana in India. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 1, 1–14.
- FUKUNAGA, K. 1990. *Introduction to Statistical Pattern Recognition*, New York: Academic Press.
- FULLER, D.Q., MADELLA, M. 2002. Issues in Harappan Archaeology: Retrospect and Prospect. Dins R. Settar i R. Korisettar, eds. *Protohistory: Archaeology of the Harappa Civilization*. Delhi: Manohar, 317–390.
- FULLER, D.Q. 2006. Agricultural origins and frontiers in South Asia: *A working synthesis*. *Journal of World Prehistory*, 20, 1–86.
- GADEKAR, C., AJITHPRASAD, P., MADELLA, M. 2013. Crested Ridge Technique and Lithic Assemblage from Datrana, Gujarat. *Heritage: Journal of Multidisciplinary Studies in Archaeology*, 1, 16–28.
- GADEKAR, C., AJITHPRASAD, P., MADELLA, M., BALBO, A.L., RAJESH, S.V., RONDELLI, B., GARCIA-GRANERO, J.J., RODRIGUEZ ANTÓN, D., YANNITTO, V. 2014. Continuation of a Tradition over Five Thousand Years: Lithic Assemblage from Loteshwar, North Gujarat, Western India. *Heritage: Journal of Multidisciplinary Studies in Archaeology*, 2, 283–304.

9. REFERÈNCIES

- GADEKAR, C., RAJESH, S.V., AJITHPRASAD, P. 2016. A Comparison of Lithic Assemblages Belonging to Economically Diverse Settlements Flourishing During Mid-third Millennium BCE Gujarat. *Heritage: Journal of Multidisciplinary Studies in Archaeology* , 3, 44–53.
- GALIATSATOS, N. 2004. *Assessment of the CORONA series of satellite imagery for landscape archaeology*. Tesi doctoral. University of Durham.
- GALIATSATOS, N., DONOGHUE, D., PHILIP, G. 2005. An evaluation of the stereoscopic capabilities of CORONA declassified spy satellite image data. *25th EARSeL Symposium, Workshop on 3D Remote Sensing, Porto, Portugal*.
- GALIATSATOS, N., DONOGHUE, D., PHILIP, G. 2008. High resolution elevation data derived from stereoscopic CORONA imagery with minimal ground control: an approach using IKONOS and SRTM data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 74(9), 1093–1106.
- GALLANT, T.W. 1986. “Background Noise” and Site Definition: a Contribution to Survey Methodology. *Journal of Field Archaeology*, 13, 403–418.
- GALLOPIN, G.C. 2006. Linkages between vulnerability , resilience , and adaptive capacity. *Global Environmental Change*, 16(3), 293–303.
- GARCÍA-GRANERO, J.J., LANCELOTTI, C., MADELLA, M. 2015. A tale of multi-proxies: integrating macro- and microbotanical remains to understand subsistence strategies. *Vegetation History and Archaeobotany*, 24(1), 121–133.
- GARCÍA-GRANERO, J.J. 2015. *From gathering to farming in semi-arid northern Gujarat (Índia): a multi-proxy approach*. Tesi doctoral. Universitat de Barcelona.
- GARCÍA-GRANERO, J.J., LANCELOTTI, C., MADELLA, M., AJITHPRASAD, P. 2016. Millets and herders: the origins of plant cultivation in semi-arid North Gujarat (India). *Current Anthropology*, 57(2), 149–166.
- GIOSAN, L., CLIFT, P.D., MACKLIN, M.G., FULLER, D.Q., CONSTANTINESCU, S., DURCAN, J.A, STEVENS, T., DULLER, G.A.T., TABREZ, A.R., GANGAL, K., ADHIKARI, R., ALIZAI, A., FILIP, F., VANLANINGHAM, S., SYVITSKI, J.P.M. 2012. Fluvial landscapes of the Harappan civilization. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(26), 1–7.
- GOLDBERG, P., MACPHAIL, R. 2006. *Practical and theoretical geoarchaeology*, Oxford: Blackwell Publishing.
- GOOSSENS, R., DE WULF, A., BOURGEOIS, J., GHEYLE, W., WILLEMS, T. 2006. Satellite imagery and archaeology: the example of CORONA in the Altai Mountains. *Journal of Archaeological Science*, 33(6), 745–755.
- GOUDIE, A., ALLCHIN, B., HEGDE, K.T.M. 1973. The Former Extensions of the Great Indian Sand Desert. *The Geographical Journal*, 139(2), 243–257.

9. REFERÈNCIES

- GOUDIE, A. 2002. *Great Warm Deserts of the World: Landscapes and Evolution*, Oxford University Press.
- GUTIERREZ, M. 1993. *Climatic geomorphology*. Developments in Earth Surface Processes, 8. New York: Elsevier.
- HARRIS, S. 2013. Small-scale Interactions across the North Gujarat Plain. Dins S. A. Abraham, P. Gullapalli i T. P. Raczek, eds. *Connections and Complexity: New Approaches to the Archaeology of South Asia*. New York: Left Coast Press, 401–420.
- HEDGE, K.T.M. 1977. Late Quaternary Environments in Gujarat and Rajasthan. Dins D. P. Agrawal i B. M. Pande, eds. *Ecology and Archaeology of Western India*. Anand Nagar: Naurang Rai, 169–180.
- HEIRI, O., LOTTER, A.F., LEMCKE, G. 2001. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *Journal of Paleolimnology*, 25, 101–110.
- HOLDAWAY, S.J., FANNING, P.C. 2010. Geoarchaeology in Australia: understanding human-environment interactions. *Geological Society of London, Special Publications*, 346(1), 71–85.
- HOLLIDAY, V.T. 2004. *Soils in Archaeological Research*, Oxford: Oxford University Press.
- HOLLIDAY, V.T., GARTNER, W.G. 2007. Methods of soil P analysis in archaeology. *Journal of Archaeological Science*, 34(2), 301–333.
- HUGENHOLTZ, C.H., LEVIN, N., BARCHYN, T.E., BADDOCK, M.C. 2012. Remote sensing and spatial analysis of aeolian sand dunes: A review and outlook. *Earth-Science Reviews*, 111(3-4), 319–334.
- ISHNAVA, K., RAMARAO, V., MOHAN, J.S.S., KOTHARI, I.L. 2011. Ecologically important and life supporting plants of little Rann of Kachchh , Gujarat. *Journal of Ecology and the Natural Environment*, 3, 33–38.
- JUYAL, N., KAR, A., RAJAGURU, S.N.N., SINGHVI, A.K. 2003. Luminescence chronology of aeolian deposition during the Late Quaternary on the southern margin of Thar Desert, India. *Quaternary International*, 104(1), 87–98.
- JUYAL, N., CHAMYAL, L.S., BHANDARI, S., BHUSHAN, R., SINGHVI, A.K. 2006. Continental record of the southwest monsoon during the last 130ka: evidence from the southern margin of the Thar Desert, India. *Quaternary Science Reviews*, 25(19-20), 2632–2650.
- KANTNER, J. 2008. The archaeology of regions: From discrete analytical toolkit to ubiquitous spatial perspective. *Journal of Archaeological Research*, 16(1), 37–81.
- KHADKIKAR, A.S. 2003. Bedform migration and bar evolution in a late Quaternary monsoon-influenced river, Gujarat, western India. *Sedimentary Geology*, 157, 277–289.

9. REFERÈNCIES

- KHADKIKAR, A.S., MATHEW, G., MALIK, J.N., GUNDU RAO, T.K., CHOWGAONKAR, M.P., MERH, S.S. 1999. The influence of the South-west Indian monsoon on continental deposition over the past 130 kyr, Gujarat, western India. *Terra Nova*, 11(6), 273–277.
- KHADKIKAR, A.S., BASAVAIHAH, N., GUNDURAO, T.K., RAJSHEKHAR, C., KUMARAN, K. 2004. Palaeoenvironments around the Harappan Port of Lothal, Gujarat, western India. *Journal of Indian Geophysical Union*, 8(1), 49–53.
- KHAN, S., HONG, Y., GOURLEY, J., KHATTAK, M., DE GROEVE, T. 2014. Multi-Sensor Imaging and Space-Ground Cross-Validation for 2010 Flood along Indus River, Pakistan. *Remote Sensing*, 6(3), 2393–2407.
- KRUMBEIN, W.C. 1938. Size frequency distribution of sediments and the normal phi curve. *Journal of Sedimentary Petrology*, 8(3), 84–90.
- KUENZER, C., GUO, H., HUTH, J., LEINENKUGEL, P., LI, X., DECH, S. 2013. Flood Mapping and Flood Dynamics of the Mekong Delta: ENVISAT-ASAR-WSM Based Time Series Analyses. *Remote Sensing*, 5(2), 687–715.
- KUMAR, M.D., SINGH, O.P. 2001. Market instruments for demand management in the face of scarcity and overuse of water in Gujarat, Western India. *Water Policy*, 3, 387–403.
- KUSSUL, N., SHELESTOV, A., SKAKUN, S. 2011. Flood Monitoring from SAR Data. Dins F. Kogan, A. Powell i O. Fedorov, eds. *Use of Satellite and In-Situ Data to Improve Sustainability*. New York: NATO, 19–29.
- LANCELOTTI, C., CARACUTA, V., FIORENTINO, G., MADELLA, M., AJITHPRASAD, P. 2013. Holocene Monsoon Dynamics and Human Occupation in Gujarat: Stable Isotopes Analyses on Plant Remains. *Journal of Multidisciplinary Studies in Archaeology*, 1, 288–300.
- LANCELOTTI, C., RUBIO-CAMPILLO, X., SALPETEUR, M., BALBO, A.L., MADELLA, M. En premsa. Sustainability of incipient agro-pastoralism in semi-arid ecotones. *Plos ONE*.
- LAW, R. 2013. The Important Stone and Metal Resources of Gujarat during the Harappan Period. *Heritage: Journal of Multidisciplinary Studies in Archaeology*, 1, 319-343.
- LEMMEN, C., KHAN, A. 2012. A simulation of the Neolithic transition in the Indus valley. Dins L. Giosan, D.Q. Fuller, K. Nicoll, R.K Flad, P.D. Clift, eds. *Climates Landscapes Civilizations*, New York: American Geophysical Union.
- LILLESAND, T.M., KIEFER, R.W., CHIPMAN, J.W. 2008. *Remote Sensing and Image Interpretation*, New York: John Wiley& Sons Inc.
- LIU, J.G., MASON, P.J. 2009. *Essential Image Processing and GIS for Remote Sensing*, Oxford: Wiley-Blackwell.
- MACDONALD, G. 2011. Potential influence of the Pacific Ocean on the Indian summer monsoon and

9. REFERÈNCIES

- Harappan decline. *Quaternary International*, 229(1-2), 140–148.
- MADELLA, M., FULLER, D.Q. 2006. Palaeoecology and the Harappan Civilisation of South Asia: a reconsideration. *Quaternary Science Reviews*, 25(11-12), 1283–1301.
- MADELLA, M., AJITHPRASAD, P., LANCELOTTI, C., RONDELLI, B., BALBO, A.L., FRENCH, C.A.I., RODRÍGUEZ, D., GARCÍA-GRANERO, J.J., YANNITTO, V., RAJESH, S. V., GADEKAR, C., BRIZ, I., YANNITTO, V. 2010. Social and environmental transitions in arid zones: the North Gujarat Archaeological Project — NoGAP. *Antiquity Gallery*, 84(325).
- MADELLA, M., BALBO, A.L., RONDELLI, B., RODRÍGUEZ, B., YANNITTO, V., AJITHPRASAD, P., GADEKAR, G.S., RAJESH, S.V., GARCIA-GRANERO, J. J. LANCELOTTI, C., FRENCH, C.A.I. 2011. Proyecto arqueológico Norte del Gujarat. Dins *Informes y trabajos 5. Excavaciones en el exterior 2009*. Ministerio de Cultura, 114–119.
- MADELLA, M., AJITHPRASAD, P., BALBO, A.L., CARO, J., CONESA, F.C., GARCIA-GRANERO, J.J., LANCELOTTI, C., RONDELLI, B., RAJESH, S.V., RUIZ, J., MATEOS, J.L., GADEKAR, G., KOTHYARI, G.C., MORTEKHAI, P., SUKUMARAN, P. 2012a. La campaña de excavación 2011 del North Gujarat Archaeological Project (NoGAP): metodología interdisciplinar para el estudio de contextos socio-ecológicos en el Holoceno. Dins *Informes y trabajos. Excavaciones en el exterior 2011*. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, 261–272.
- MADELLA, M., AJITHPRASAD, P., BALBO, A.L., LANCELOTTI, C., RONDELLI, B., CONESA, F.C., FIORENTINO, G., RAJESH, S.V., GADEKAR, G., GARCÍA, N., YANNITTO, V., RODRÍGUEZ, D., MATEOS, J.L., RUIZ, J., GARCÍA-GRANERO, J.J. 2012b. La campaña de excavación 2010 del proyecto NoGAP: metodología interdisciplinar para el estudio de contextos socio-ecológicos en el Holoceno. Dins *Informes y trabajos 5. Excavaciones en el exterior 2010*. Ministerio de Cultura, 110–117.
- MANJHI, H., DORJE, C., BANJERJI, A. EDS. 2000. *Indian Archaeology 1994-95: a review*, New Delhi: Archaeological Survey of India.
- MARKOFSKY, S., NINFO, A., BALBO, A., CONESA, F.C., MADELLA, M. En premsa. An investigation of local scale human/landscape dynamics in the endorheic alluvial fan of the Murghab River, Turkmenistan. *Quaternary International*.
- MAURYA, D.M., CHAMYAL, L.S., MERH, S.S. 1995. Tectonic evolution of the Central Gujarat plain, western India. *Current Science*, 69(7), 610–613.
- MEGARRY, P., COONEY, G., COMER, D. C., PRIEBE, C. E. 2016. Posterior Probability Modeling and Image Classification for Archaeological Site Prospection: Building a Survey Efficacy Model for Identifying Neolithic Felsite Workshops in the Shetland Island. *Remote Sensing*, 8(6), 529
- MEHTA, L. 2001. The Manufacture of Popular Perceptions of Scarcity: Dams and Water-Related Narratives in Gujarat, India. *World Development*, 29(12), 2025–2041.
- MERH, S.S., CHAMYAL, L.S. 1997. The Quaternary Geology of Gujarat Alluvial Plains. *Proceedings of*

9. REFERÈNCIES

- the Indian National Science Academy*, 63(1), 1–98.
- MÉSZÁROS, M., SZATMÁRI, J., TOBAK, S., MUCSI, L. 2009. Extraction of digital surface models from CORONA satellite stereo images. *Journal of Environmental Geography*, 1(1), 5–10.
- MIDDLETON, W.D., PRICE, D.T. 1996. Identification of Activity Areas by Multi-element Characterization of Sediments from Modern and Archaeological House Floors Using Inductively Coupled Plasma-atomic Emission Spectroscopy. *Journal of Archaeological Science*, 23(5), 673–687.
- MILLIGAN, G.W., COOPER, M.C. 1985. An examination of procedures for determining the number of clusters in a data set. *Psychometrika*, 50(2), 159–179.
- MOJENA, R. 1977. Hierarchical grouping methods and stopping rules: An evaluation. *The Computer Journal*, 20(4), 359–363.
- MUSHRIF-TRIPATHY, V., AJITHPRASAD, P., MADELLA, M., MATEOS, J.L., RAJESH, S.V., RONDELLI, B., CARO, J., LANCELOTTI, C., GADEKAR, C., GARCIA-GRANERO, J.J. 2014. Osteological Study of a Human Skeleton Excavated from Vaharvo Timbo, District Patan, Gujarat. *Man and Environment*, 46–51.
- NEGRE, J., MUÑOZ, F., LANCELOTTI, C. 2016. Geostatistical modelling of chemical residues on archaeological floors in the presence of barriers. *Journal of Archaeological Science*, 70, 91–101.
- NIELSEN, N.H., KRISTIANSEN, S.M. 2014. Identifying ancient manuring: traditional phosphate vs. multi-element analysis of archaeological soil. *Journal of Archaeological Science*, 42, 390–398.
- NORMAND, M. 1995. The Use of Radar Backscattering for Measuring Soil Moisture and Surface Roughness Signals. *Remote Sensing of Environment*, 68(December 1994), 61–68.
- PAL, D.K., DASOG, G.S., BHATTACHARYYA, T. 2009. Pedogenetic Processes in Cracking Clay Soils (Vertisols) in Tropical Environments of India: A Critique. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 57(4), 422–432.
- PALMER, R. 2013. Uses of Declassified corona Photographs for Archaeological Survey in Armenia. DinsW. S. Hanson i I. A. Oltean, eds. *Archaeology from Historical Aerial and Satellite Archives*. New York: Springer, 279–290.
- PARCAK, S.H. 2009. *Satellite Remote Sensing for Archaeology*, New York: Routledge.
- PATEL, A.K. 2009. Occupational Histories, Settlements, and Subsistence in Western India: What Bones and Genes can tell us about the Origins and Spread of Pastoralism. *Anthropozoologica*, 44(1), 173–188.
- PETRIE, C.A., SINGH, R.N., FRENCH, C.A.I., HODELL, D., BATES, J., DIXIT, Y., JOGLEKAR, P., JONES, P.J., LANCELOTTI, C., NEOGI, S., PANDEY, A.K., PARIKH, D., PATHAK, A., PAWAR, P., REDHOUSE, D.I., SARASWAT, K.S., TEWARI, R. En premsa. Rethinking climate, environment and settlement in ancient northwest India: insights from the Land, Water and Settlement project. *Ancient India*.

9. REFERÈNCIES

- PHILIP, G., DONOGHUE, D., BECK, A., GALIATSATOS, N. 2002. CORONA satellite photography: an archaeological application from the Middle East. *Antiquity*, 76, 109–118.
- PONTON, C., GIOSAN, L., EGLINTON, T.I., FULLER, D.Q., JOHNSON, J.E., KUMAR, P., COLLETT, T.S. 2012. Holocene aridification of India. *Geophysical Research Letters*, 39, L03704.
- POSSEHL, G.L. 2007. The Harappan Settlement of Gujarat. Dins E. C. Stone, ed. *Settlement and Society*. The Oriental Institute of the University of Chicago, 297–328.
- POSSEHL, G.L., HERMAN, C.F. 1990. The Sorath Harappan: A new regional manifestation of the Indus Urban phase. Dins M. Taddei, ed. *South Asian Archaeology*. Instituto Italiano per il Medio Estremo Oriente, Serie Oriental, 295–320.
- PRAKASH, A. 2008. Political Economy of Groundwater Governance in Gujarat: A Micro-level Analysis. In V. Ballabh, ed. *Governance of Water: Institutional Alternatives and Political Economy*. New Delhi: SAGE, 215–236.
- PRASAD, V., FAROOQUI, A., SHARMA, A., PHARTIYAL, B., CHAKRABORTY, S., BHANDARI, S., RAJ, R., SINGH, A. 2014. Mid–late Holocene monsoonal variations from mainland Gujarat, India: A multi-proxy study for evaluating climate culture relationship. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 397, 38–51.
- PUY, A., BALBO, A.L. 2013. The genesis of irrigated terraces in al-Andalus. A geoarchaeological perspective on intensive agriculture in semi-arid environments (Ricote, Murcia, Spain). *Journal of Arid Environments*, 89(0), 45–56.
- PUY, A., BALBO, A.L., VIRGILI, A., KIRCHNER, H. 2014. The evolution of Mediterranean wetlands in the first millennium AD: The case of Les Arenes floodplain (Tortosa, NE Spain). *Geoderma*, 232-234, 219–235.
- RAJ, R., CHAMYAL, L.S., PRASAD, V., SHARMA, A., TRIPATHI, J.K., VERMA, P. 2015. Holocene climatic fluctuations in the Gujarat Alluvial Plains based on a multiproxy study of the Pariyaj Lake archive, western India. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 421, 60–74.
- RAJESH, S.V., PATEL, A. 2007a. A gazetteer of pre- and protohistoric sites in Gujarat. *Man and Environment*, 32(2), 61–136.
- RAJESH, S.V., PATEL, A. 2007b. Excavated Chalcolithic Sites in Gujarat: An Appraisal. *Puratattva*, 37, 46–67.
- RAJESH, S.V. 2011. *A comprehensive study of the regional chalcolithic cultures of Gujarat*. Tesi doctoral. The Maharaja Sayajirao University of Baroda.
- RAJESH, S. V., KRISHNAN, K., AJITHPRASAD, P., MADELLA, M. 2013a. Pre-Prabhas Assemblage from Gujarat, Western India. *Heritage: Journal of Multidisciplinary Studies in Archaeology*, 1, 181–209.

9. REFERÈNCIES

- RAJESH, S.V., KRISHNAN, K., AJITHPRASAD, P., SONAWANE, V.H. 2013b. Evaluating the Anarta Tradition in the Light of Material Culture from Loteswar and Other Sites in Gujarat. *Man and Environment*, 38(2), 10–45.
- RAJESH, S.V., KRISHNAN, K. 2014. Chalcolithic Cultures of Gujarat (c. 3950-900 BCE): An appraisal. DinsB. R. Mani, A. K. Singhvi i R. Kumar, eds. *Pracyabodha. Indian Archaeology and Tradition*. New Delhi: B. R. Publishing, 194–205.
- RANADE, R., KUMAR, M.D. 2004. Narmada Water for Groundwater Recharge in North Gujarat. *Economic and Political Weekly*, 3510–3513.
- RANGARAJAN, S. 2008. Evidence of igneous diapirism in the northern part of Narmada Block, Cambay Basin, India. *New Concepts in Global Tectonics*, (47), 1–49.
- RAO, S.R. 1963. Excavations at Rangpur and other excavations in Gujarat. *Ancient India*, 18-19, 13–27.
- R-CORE-TEAM. 2014. R: A language and environment for statistical computing.
- READ, D.W. 1986. Sampling Procedures for Regional Surveys: a Problem of Effectiveness and Representativeness. *Journal of Field Archaeology*, 13, 477–491.
- ROBERTS, J.M., MILLS, B.J., CLARK, J.J., HAAS, W.R., HUNTLEY, D.L., TROWBRIDGE, M.A. 2012. A method for chronological apportioning of ceramic assemblages. *Journal of Archaeological Science*, 39, 1513–1520.
- RONDELLI, B., STRIDE, S., GARCÍA-GRANERO, J.J., 2013. Soviet military maps and archaeological survey in the Samarkand region. *Journal of Cultural Heritage*, 14, 270-276.
- RONDELLI, B., LANCELOTTI, C., MADELLA, M., PECCI, A., BALBO, A.L., PEREZ, J.R., INSERRA, F., GADEKAR, C., CAU, M.A., AJITHPRASAD, P. 2014. Anthropogenic activity markers and spatial variability: an ethnoarchaeological experiment in a domestic unit of Northern Gujarat (India). *Journal of Archaeological Science*, 41, 482–492.
- ROSSIGNOL, J. 1992. Concepts, methods and theory building: a landscape approach. Dins J. Rossignol i L. Wandsnider, eds. *Space, Time, and Archaeological Landscapes*. New York: Springer, 3–14.
- SAINI, H.S., MUJTABA, S.A.I. 2012. Depositional history and palaeoclimatic variations at the northeastern fringe of Thar Desert, Haryana plains, India. *Quaternary International*, 250, 37–48.
- SALISBURY, R.B., BERTÓK, G., BÁCSMEGI, G. 2013. Integrated Prospection Methods to Define Small-site Settlement Structure: a Case Study from Neolithic Hungary. *Archaeological Prospection*, 20(1), 1–10.
- SALPETEUR, A.M., PATEL, H., BALBO, A.L., MADELLA, M., AJITHPRASAD, P. 2015. When Knowledge Follows Blood Kin Groups and the Distribution of Traditional. *Current Anthropology*, 56(3).
- SALPETEUR, M., MADELLA, M., REYES-GARCÍA, V., PATEL, H.R. En premsa. Adaptation, access to

9. REFERÈNCIES

- resources and mobility: from contemporary pastoral systems to ancient societies. *Nomadic Peoples Journal*.
- SAREEN, B.K., TANDON, S.K., BHOLA, A.M. 1993. Slope-deviatory alignment, stream network and lineament orientation of the Sabarmati River system-Neotect. *Current Science*, 64(11-12), 827–836.
- SCOLLAR, I., GALIATSATOS, N., MUGNIER, C. 2016. Mapping from CORONA: Geometric Distortion in KH4 Images. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 82(1), 7–13.
- SEN, A. 2014. Terracotta Objects from Nagwada: A Harappan Site in North Gujarat, India. *Heritage: Journal of Multidisciplinary Studies in Archaeology*, 2, 854-861.
- SETH, H., PATEL, L.C., VARHAT, B. 2007. Harappan sites in Gujarat. Dins T. Osada, ed. *Linguistics, Archaeology and the Human Past*. Kyoto: Research Institute for Humanity and Nature, 77–110.
- SHAH, T. 2014. Towards a Managed Aquifer Recharge strategy for Gujarat, India: An economist's dialogue with hydro-geologists. *Journal of Hydrology*, 518, 94–107.
- SHAHACK-GROSS, R., MARSHALL, F., WEINER, S. 2003. Geo-ethnoarchaeology of pastoral sites: the identification of livestock enclosures in abandoned Maasai settlements. *Journal of Archaeological Science*, 30, 439–459.
- SHENNAN, S. 2004. *Quantifying Archaeology*, Edinburgh University Press.
- SINGHVI, A.K., KAR, A. 2004. The aeolian sedimentation record of the Thar desert. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences, Earth and Planetary Sciences*, 113(3), 371–401.
- SINGHVI, A.K., WILLIAMS, M.J., RAJAGURU, S.N., MISRA, V.N., CHAWLA, S., STOKES, S., CHAUHAN, N., FRANCIS, T., GANJOO, R.K., HUMPHREYS, G.S. 2010. A 200 ka record of climatic change and dune activity in the Thar Desert, India. *Quaternary Science Reviews*, 29(23-24), 3095–3105.
- SJÖBERG, A. 1976. Phosphate Analysis of Anthropoc Soils. *Journal of Field Archaeology*, 3, 447–454.
- SMITH, M.J., PAIN, C.F. 2009. Applications of remote sensing in geomorphology. *Progress in Physical Geography*, 33(4), 568–582.
- SONAWANE, V.H. 1994. Harappan Settlements of Rupen Estuary, Gujarat. *Pragdhara*, 5, 1–11.
- SONAWANE, V.H., AJITHPRASAD, P. 1994. Harappa Culture and Gujarat. *Man and Environment*, 19(1-2), 129–139.
- SONAWANE, V.H. 2000. Early Farming Communities of Gujarat, India. *Indo-Pacific Prehistory Association Bulletin*, 19(3), 137–146.
- SONAWANE, V.H. 2002. Post-Urban Harappan Cultures of Gujarat. Dins S. Settar i R. Korisettar, eds. *Protohistory: Archaeology of the Harappa Civilization*. New Delhi: Indian Archaeology in Retrospect, 159–172.

9. REFERÈNCIES

- SONAWANE, V.H. 2004. Harappan Civilization in Western India with Special Reference to Gujarat. *Journal of Interdisciplinary Studies in History and Archaeology*, 1(2), 63–78.
- SPIELMANN, K.A., NELSON, M., INGRAM, S., PEEPLES, M.A. 2011. Sustainable small-scale agriculture in semi-arid environments. *Ecology and Society*, 16(1).
- SRIVASTAVA, P., JUYAL, N., SINGHVI, A.K., WASSON, R.J., BATEMAN, M.D. 2001. Luminescence chronology of river adjustment and incision of Quaternary sediments in the alluvial plain of the Sabarmati River, north Gujarat, India. *Geomorphology*, 36(3-4), 217–229.
- SUTCLIFFE, J., SHAW, J., BROWN, E. 2011. Historical water resources in South Asia: the hydrological background. *Hydrological Sciences Journal*, 56(5), 37–41.
- TAINTER, J. 1979. The Mountainair Lithic Scatters: Settlement Patterns and Significance Evaluation of Low Density Surface Sites. *Journal of Field Archaeology*, 6, 463–469.
- TANDON, S.K., SAREEN, B.K., RAO, M., SINGHVI, A.K. 1997. Aggradation history and luminescence chronology of Late Quaternary semi-arid sequences of the Sabarmati basin, Gujarat, Western India. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 128, 339–357.
- TAPETE, D., CIGNA, F., MASINI, N. 2013. Prospection and monitoring of the archaeological heritage of Nasca, Peru, with ENVISAT ASAR. *Archaeological Prospection*, 20, 133-147.
- TAPETE, D., CIGNA, F., DONOGUE, D. 2013. 'Looting marks' in space-borne SAR imagery: Measuring rates of archaeological looting in Apamea (Syria) with TerraSAR-X Staring Spotlight. *Remote Sensing of Environment*, 178, 42-58.
- TAPPAN, G.G., HADJ, A., WOOD, E.C., LIETZOW, R.W. 2000. Use of Argon, Corona, and Landsat Imagery to Assess 30 Years of Land Resource Changes in West-Central Senegal. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66(6), 727–735.
- TERAMURA, H., KONDO, T., UNO, A., KISHIDA, T., SAKAI, H. 2008. Archaeology with GIS in the Indus Project. Dins H. Teramura i T. Osada, eds. *Linguistics, Archaeology and the Human Past*. Kyoto: Research Institute for Humanity and Nature, 45–102.
- TURNER, M., GARDNER, R., O'NEILL, R. EDS. 2001. *Landscape Ecology in Theory and Practice. Pattern and Process*, New York: Springer.
- VERMEULEN, F., VERHOEVEN, G. 2006. An Integrated Survey of Roman Urbanization at Potentia, Central Italy. *Journal of Field Archaeology*, 31(4), 395–410.
- VETH, P. 2005. Major Themes and Future Research Directions. Dins P. Veth, M. Smith i P. Hiscock, eds. *Desert Peoples*. Victoria: Blackwell Publishing, 293–301.
- WANDSNIDER, L., CAMILLI, E.L. 1992. The Character of Surface Archaeological Deposits and Its Influence on Survey Accuracy. *Journal of Field Archaeology*, 19(1982), 169–188.
- WELLS, E.C. 2006. Cultural soilscales. Dins E. Frossard, W.E.H. Blum i B.P. Warkentin, eds. *Function*

9. REFERÈNCIES

- of Soils for Human Societies and the Environment*. London, 125–132.
- WILSON, C.A., DAVIDSON, D.A., CRESSER, M.S. 2008. Multi-element soil analysis: an assessment of its potential as an aid to archaeological interpretation. *Journal of Archaeological Science*, 35(2), 412–424.
- WILSON, L. 2011. The role of geoarchaeology in extending our perspective. Dins L. Wilson, ed. *Human Interactions with the Geosphere: The Geoarchaeological Perspective*. London: Geological Society, 1–9.
- WRIGHT, V., TUCKER, E.M. 1991. Calcretes: an introduction. Dins V. Wright iM. E. Tucker, eds. *Calcretes*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1–22.
- YASUDA, Y., SHINDE, V. EDS. 2004. *Monsoon and Civilization*, New Delhi: Roli Books.
- ZEDER, M.A. 2012. The Broad Spectrum Revolution at 40: Resource diversity, intensification, and an alternative to optimal foraging explanations. *Journal of Anthropological Archaeology*, 31(3), 241–264.

