

pca

european journal of
postclassicalarchaeologies

volume 12/2022

SAP Società Archeologica s.r.l.

Mantova 2022



EDITORS

Gian Pietro Brogiolo (chief editor)

Alexandra Chavarría (executive editor)

EDITORIAL BOARD

Paul Arthur (Università del Salento)

Alicia Castillo Mena (Universidad Complutense de Madrid)

Margarita Díaz-Andreu (ICREA - Universitat de Barcelona)

Martin Carver (University of York)

José M. Martín Civantos (Universidad de Granada)

Girolamo Fiorentino (Università del Salento)

Caterina Giostra (Università Cattolica del Sacro Cuore - Milano)

Susanne Hakenbeck (University of Cambridge)

Matthew H. Johnson (Northwestern University of Chicago)

Vasco La Salvia (Università degli Studi G. D'Annunzio di Chieti e Pescara)

Bastien Lefebvre (Université Toulouse - Jean Jaurès)

Alberto León (Universidad de Córdoba)

Tamara Lewit (University of Melbourne)

Yuri Marano (Università Ca' Foscari Venezia)

Federico Marazzi (Università degli Studi Suor Orsola Benincasa di Napoli)

Andrew Reynolds (University College London)

Mauro Rottoli (Laboratorio di archeobiologia dei Musei Civici di Como)

Colin Rynne (University College Cork)

Marco Valenti (Università degli Studi di Siena)

Giuliano Volpe (Università degli Studi di Foggia)

Post-Classical Archaeologies (PCA) is an independent, international, peer-reviewed journal devoted to the communication of post-classical research. PCA publishes a variety of manuscript types, including original research, discussions and review articles. Topics of interest include all subjects that relate to the science and practice of archaeology, particularly multidisciplinary research which use specialist methodologies, such as zooarchaeology, paleobotany, archaeometallurgy, archaeometry, spatial analysis, as well as other experimental methodologies applied to the archaeology of post-classical Europe.

Submission of a manuscript implies that the work has not been published before, that it is not under consideration for publication elsewhere and that it has been approved by all co-authors. Authors must clear reproduction rights for any photos or illustration, credited to a third party that they wish to use (including content found on the Internet). For more information about **ethics** (including plagiarism), copyright practices and guidelines please visit the website www.postclassical.it.

PCA is published once a year in May. Manuscripts should be submitted to editor@postclassical.it in accordance to the guidelines for contributors in the webpage <http://www.postclassical.it>.

Post-Classical Archaeologies' manuscript **review process** is rigorous and is intended to identify the strengths and weaknesses in each submitted manuscript, to determine which manuscripts are suitable for publication, and to work with the authors to improve their manuscript prior to publication.

This journal has the option to publish in **open access**. For more information on our open access policy please visit the website www.postclassical.it.

How to **quote**: please use "PCA" as abbreviation and "European Journal of Post-Classical Archaeologies" as full title.

Cover image: © Michel Royon / Wikimedia Commons.

"Post-Classical Archaeologies" is indexed in Scopus. It was approved on 2015-05-13 according to ERIH PLUS criteria for inclusion and indexed in Carhus+2018. Classified A by ANVUR (Agenzia Nazionale di Valutazione del sistema Universitario e della Ricerca).

DESIGN:

Paolo Vedovetto

PUBLISHER:

SAP Società Archeologica s.r.l.

Strada Fienili 39/a, 46020 Quingentole, Mantua, Italy

www.saplibri.it

Authorised by Mantua court no. 4/2011 of April 8, 2011

CONTENTS PAGES

EDITORIAL

5

RESEARCH - ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN ARCHAEOLOGY

J.A. Barceló, F. Del Castillo, D. Kayikci, B. Urbistondo Neural networks for archaeological classification and typology: an overview

7

L. Burigana, A. De Guio Modellando la Bassa Veronese: simulazione e predizione dell'umidità del suolo

33

C. Bettineschi, L. Magnini, G. Azzalin, A. De Guio Clearance cairnfields forever: combining AI and LiDAR data in the Marcesina upland (northern Italy)

49

F. Anichini, G. Gattiglia Reflecting on artificial intelligence and archaeology: the ArchAIDE perspective

69

S. Basile The funerary landscape of late antique and early medieval Lucca through Point Pattern Analysis

87

BEYOND THE THEME

J.M. Román Punzón, M. Moreno Alcaide, P. Ruiz Montes, J. Ramos Noguera, A. Peralta Gómez Life and afterlife of a Roman villa in western Granada, Spain: Salar from the 4th to the 7th centuries

107

J. Sarabia-Bautista, H. Bolívar Sanz, I. Ureña Herradón Who was buried there and what did they eat? Dietary study of the Balazote late Roman villa (Albacete, Spain)

135

A. Fornaciari, A. Amaro, L. Cavallini, F. Coschino, V. Giuffra The cemetery of San Pietro di Pozzeveri, Lucca. Bioarchaeology and funerary archaeology of a medieval monastic churchyard (11th-13th centuries)

163

M. Bouzas, P. Castanyer, M. Campo, M. Santos, J. Tremoleda, E. Hernández	The episcopal buildings of Empúries and the Late Antique nucleus of Santa Margarida. First reflections following the discovery of a hoard of coins	187
M. Bernardi	Il cantiere edile a Roma nel medioevo: storia, caratteristiche ed evoluzione del paesaggio costruito	211
G.P. Brogiolo	San Giovanni di Castel Seprio. Architetture, stratigrafie e interventi dopo una serie di crolli	237
H.S. Saglam	Identifying a late medieval maritime defense network: Tower of Büyük Maden Island, Tower of Mardaliç Island and Castle of Çandarlı	265
DOSSIER - WORLD HERITAGE CONVENTION: 50 YEARS ON		
D. Rodwell	Inhabited historic cities, urban heritage, and dissonances at the heart of the World Heritage system	291
PROJECT		
F. Benetti, A. Olivier, M. Heyworth, S. Huggett-Jones, L. Glithero-West	Facilitating high-level collaboration in the historic environment sector in England	353
V. Di Cola	Archeologia, pubblico e comunità: dal “Derbyshire Scout Archaeology Badge” ad un progetto di archeologia pubblica “under 18” a Roma	363
REVIEWS		
S. Gelichi, C. Negrelli, E. Grandi (eds), <i>Un emporio e la sua cattedrale. Gli scavi di piazza XX Settembre e Villaggio San Francesco a Comacchio</i> - by E. Giannichedda		385
A. Augenti, P. Galetti (eds), <i>L'incastellamento. Storia e archeologia. A 40 anni da Les Structures di Pierre Toubert</i> - by G.P. Brogiolo		
S.A. Cugno, R. Piserà, <i>Zungri. Archeologia di un villaggio rupestre medievale nel territorio di Vibo Valentia</i> - by M. Leo Imperiale		

Laura Burigana, Armando De Guio*

Modellando la Bassa Veronese: simulazione e predizione dell'umidità del suolo

1. L'*Agent-Based Modeling* come metodologia di ricerca

AMPBV SIMULATOR è un modello informatico simulativo di tipo agenziale, attualmente in sviluppo preliminare, concepito per sperimentare questo tipo di modellazione (detta *Agent-Based Modeling* o *ABM*) come metodologia d'indagine di uno scenario storico (o meglio protostorico) complesso come la società terramaricola alle soglie del collasso, focalizzando lo studio attorno l'area a nord del Po della Bassa pianura Veronese (fig. 1). I modelli, mettendo in relazione dati (di natura sia quantitativa che qualitativa) e teoria, possono servire come dispositivi euristici per osservazioni e ipotesi, ma possono trovare applicazione anche come sistemi di visualizzazione, mezzi per analisi comparative e per lo sviluppo di teorie (Harvey 1969, p. 141); formalizzazione, comprensione, previsione e ap-

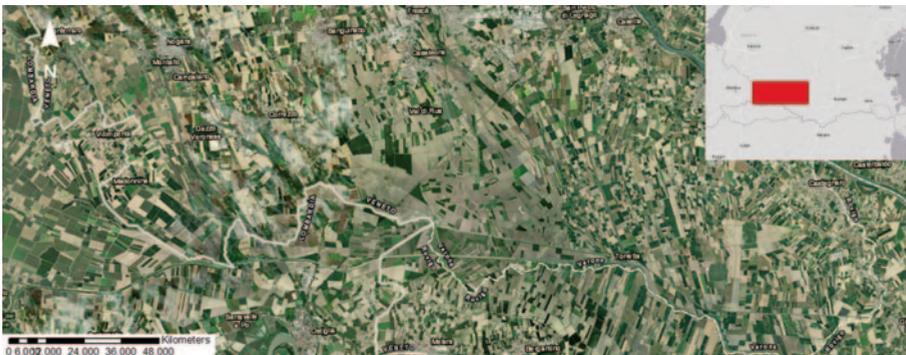


Fig. 1. Veduta aerea dell'area d'indagine.

* Dipartimento dei Beni Culturali: Archeologia, Storia dell'Arte, del Cinema e della Musica, Università degli Studi di Padova: laura.burigana@studenti.unipd.it, armando.deguio@unipd.it.

prendimento sono le principali ragioni della modellazione (Epstein 2008; Gilbert, Troitzsch 2009). Già da tempo hanno trovato crescente spazio in archeologia i modelli di tipo simulativo, che possono costituire un vero e proprio esperimento per comprendere fenomeni complessi: se la storia è un processo che si produce un'unica volta, all'interno di una simulazione in ambiente digitale i fenomeni del passato possono essere ripetuti, osservati e manipolati infinite volte. Gli *Agent Based Models* sono una particolare categoria di modelli simulativi, tipicamente indirizzati ad esplicitare l'emergenza di eventi collettivi su larga scala generati dal comportamento individuale di attori (agenti) indipendenti: si prestano all'analisi, ad esempio, di alleanze insorgenti, norme, agitazioni pubbliche, reti internazionali o transnazionali (Cioffi Revilla 2010, p. 265). Si tratta di uno strumento "di pensiero" particolarmente adatto alle scienze sociali e all'archeologia in particolare, in cui sono oggetto d'interesse sia l'emergenza di fenomeni collettivi che i relativi effetti a medio e lungo termine sugli attori coinvolti nei processi. Diversamente da altre tipologie di modelli più "tradizionali" (ad esempio quelli basati su equazioni differenziali, che richiedono essenzialmente competenze statistico-matematiche) gli ABM, spesso sviluppati per mezzo di software dedicati, necessitano anche di competenze informatiche per la loro implementazione. Per la presente ricerca si è scelto di utilizzare come ambiente di modellazione e linguaggio di programmazione NetLogo, frutto del lavoro di Uri Wilensky a partire dal 1999 e tuttora in continuo sviluppo e aggiornamento presso il *Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling (CCL)*¹. Oltre ad essere *open source*, poco oneroso in termini di spazio e altamente versatile (è utilizzabile su tutte le principali piattaforme informatiche), NetLogo è corredato da un'ampia documentazione, sia online che accessibile dal software, e di tutorial, sono inoltre editi più manuali più o meno ufficiali (a partire da Wilenski, Rand 2015). Queste caratteristiche, unitamente ad un linguaggio "umanizzato" particolarmente intuitivo e per questo accessibile ad un ampio bacino di utenza, lo rendono un ottimo mezzo analitico e didattico, che si presta ad un'ampia condivisione e ha dunque buone prospettive in termini di ricerca: uno strumento di facile comprensione e utilizzo consente, dal punto di vista tecnico, di pianificare più facilmente il processo logico e valutare a priori le potenzialità realizzative. I contenuti e i campi di applicazione sinora studiati grazie all'utilizzo di questa piattaforma sono molteplici e appartengono sia alle scienze naturali che sociali, tra cui biologia e medicina, fisica e chimica, matematica e informatica, economia e psicologia. L'approccio *user friendly* di NetLogo agevola anche la condivisione delle idee alla base del modello: sin dalla fase progettuale è possibile

¹ Il CCL è un gruppo di ricerca a cui fa capo il Prof. Wilensky. È stato fondato nel 1995 presso la Tufts University e trasferito alla *Northwestern University* nel 2000. Il centro comprende ricercatori nel campo dell'istruzione, sviluppatori e programmatori, ingegneri informatici e costruttori di modelli (<https://ccl.northwestern.edu/>, ultimo accesso: 29/08/2021).

coinvolgere e confrontarsi anche con studiosi o esperti non programmatori, prefigurando loro uno scenario e delle dinamiche a cui possano contribuire con le rispettive competenze.

2. Un ABM per la Bassa Veronese

Obiettivo primario dello sviluppo di AMPBV SIMULATOR è quello di investigare, attraverso un approccio simulativo, le modalità e i principali fattori che possono aver portato le comunità protostoriche della Bassa Pianura Veronese, tra la fine del Bronzo Recente nel XII secolo a.C. e gli inizi del Bronzo Finale, da un momento climax di massima espansione ed articolazione (socio-politica, economica e territoriale) ad un repentino collasso. Si tratta di un contesto di studio con un interessante potenziale applicativo per l'ABM come metodologia d'indagine, sia per via della complessità del caso in sé, in cui dovette avere un ruolo determinante una molteplicità di fenomeni, attori e fattori tra loro interrelati, sia per la ricchezza di dati archeologici a disposizione per l'area, che forniscono sia un'eccellente base informativa per lo sviluppo del modello che un valido termine di confronto. Parte di questi dati deriva dall'impegno pluridecennale del gruppo AMPBV (Alto-Medio Polesine Basso Veronese²) in attività di ricerca multidisciplinari, prevalentemente specializzate in indagini a zero (o quasi) impatto favorite dalla vocazione agricola del territorio in esame. Lo sviluppo di AMPBV SIMULATOR, in questa fase, rivolge il suo interesse proprio verso l'aspetto produttivo, e soprattutto agricolo, in età antica, intendendo in particolar modo esplorare la relazione tra la sopravvivenza dei siti nell'area e l'impatto del clima. Data la rilevanza, in questa chiave di lettura, delle informazioni di tipo spaziale è stato fondamentale il GIS come strumento di gestione ed elaborazione di dati da remoto e mappe tematiche, sfruttati nella simulazione come specifici livelli informativi modificabili.

2.1. Disponibilità idrica e produttività

Il modello offre la possibilità, attraverso appositi comandi predisposti nell'interfaccia, di "stressare" gli agenti in maniera discrezionale, regolando intensità (scarsità o sovrabbondanza di pioggia) e durata di oscillazioni climatiche. La presenza d'acqua è un fattore cruciale per l'esito della produzione alimentare (sia animale che vegetale) e dunque, nell'ottica di un'economia locale delle co-

² Il progetto AMPBV (Alto-Medio Polesine - Bassa Veronese), attivo sin dal 1982 (BALISTA *et al.* 1986) sotto la direzione del Prof. Armando De Guio (Università degli Studi di Padova) e della University College di Londra, è focalizzato sull'indagine archeologica non invasiva e di superficie (DE GUIO 1985) dell'area pianiziarica nord-polesana e del territorio delle Grandi Valli Veronesi meridionali, con particolare interesse per le dinamiche antropiche di età protostorica (da ultimo: DE GUIO in press).

munità protostoriche, fondamentale per l'autonomia degli insediamenti. Contestualmente al progressivo ampliamento degli spazi aperti coltivabili, abbiamo attestazione di soluzioni di gestione idrica³ tecnologicamente avanzate in tutto il territorio terramaricolo. A nord del Po il caso più significativo, anche dal punto di vista archeologico per il suo stato di visibilità (Tozzi, Harari 1990; Calzolari 1991; Burigana, Magnini 2017), è quello dell'insediamento arginato di Castello del Tartaro, attorno a cui era strutturato un sistema di canalizzazioni che parcellizzavano l'area coltivata, delimitata e protetta dal terrapieno "SAM" o "Strada su Argine Meridionale" (Balista *et al.* 2005; De Guio *et al.* 2011; Betto 2013; De Guio *et al.* 2015; Balista *et al.* 2016; Burigana *et al.* in press) dal rischio di impaludamento. In area sub-padana, invece, uno dei casi più approfonditamente studiati è la terramara di Santa Rosa di Poviglio (Bernabò Brea, Cremaschi 1997) dove, a prova di una fase siccitosa, si è scoperta testimonianza dell'escavo di pozzi di crescente profondità per intercettare, presumibilmente, una falda sempre meno accessibile alle colture (Cremaschi *et al.* 2007; Cremaschi, Pizzi 2006; Cremaschi 2009a, 2009b, 2017). Dai dati archeologici si evince quindi, da un lato, una varietà (dovuta verosimilmente alla specificità delle aree insediate e della fase cronologica) nelle problematiche legate alla gestione dell'acqua; dall'altro risulta, ai fini di una simulazione del collasso, essenziale una definizione dei processi legati al clima e al suolo.

Modellare un ciclo idrologico di cui fanno parte molteplici entità del sistema (siti, ambiente generale, celle spaziali) ha rappresentato una delle maggiori sfide anche in termini di programmazione. In questo senso è stato necessario:

- definire degli agenti con dei loro attributi e funzionalità;
- scegliere dei parametri-chiave e dei dati di riferimento per la caratterizzazione dell'ambiente ricostruito;
- definire un processo per descrivere la modalità d'impatto del clima sull'ambiente;
- definire un processo per descrivere un rapporto interattivo tra uomo e ambiente.

2.2. Gli agenti, l'ambiente e il tempo

La definizione dell'ambiente in AMPBV SIMULATOR avviene innanzitutto tramite la caratterizzazione delle celle spaziali o *patch*, ovvero le celle fisse che compongono, insieme a *turtle* e *link*⁴, la gamma di entità operative nell'ambiente

³ L'irrigazione, oltre a fornire l'acqua necessaria al germogliare delle sementi, arricchisce il suolo di molteplici nutrienti, specialmente organici (MERCURI *et al.* 2006).

⁴ In Netlogo le *turtle* sono agenti a coordinate variabili, che operano nel mondo simulato, partizionato secondo una griglia regolare di *patch*, che costituiscono gli agenti a coordinate fisse. I *link* sono una particolare categoria di agenti che definisce una relazione tra due turtles, e pertanto le coordinate di un link dipendono dalla posizione di queste ultime (WILENSKI, RAND 2015).

NetLogo. Pur non essendo dotate di funzionalità di movimento, le patch posseggono alcune delle proprietà di un agente attivo: sono associate a delle specifiche variabili (attributi) individuali e sono in grado di modificare sé stesse e altri agenti (anche di altre tipologie) attraverso interrelazioni di reciproca influenza di tipo sia “agente-ambiente” (relazioni con turtle) che “ambiente-ambiente” (relazioni con altre patch). In AMPBV SIMULATOR a ciascuna patch corrisponde un ettaro di terreno. Tra i principali attributi che le caratterizzano, fondamentali sono il sito di appartenenza (ovvero il sito che ne amministra la produzione), il tipo di tessitura del suolo, l'umidità del terreno e la specie cerealicola coltivata. Gli agenti principalmente attivi all'interno del modello sono costituiti dai siti insediati. Benché anche i siti non mutino le loro coordinate durante la simulazione, essi sono stati modellati come turtle per essere dotati di maggiori funzionalità come, ad esempio, la capacità di “morire” (quindi scomparire dal sistema) in assenza dei dovuti presupposti: una quantità di popolazione sufficiente (ovvero oltre una soglia stabilita) e una quantità di derrate sufficienti al proprio mantenimento. Questi due aspetti sono rappresentati come attributi dei siti, sono tra di loro correlati e dipendono a loro volta dalla produzione delle patch controllate e gestite dal sito stesso. Ogni ciclo iterato corrisponde ad una stagione: la scelta di una risoluzione temporale così alta consente all'utente di intervenire, grazie alla proprietà “open-box” che caratterizza gli ABM, nel corso della simulazione su micro-eventi, per poterne poi osservare l'effetto su un arco di tempo maggiore e quindi cogliere, eventualmente, l'emergenza di macro-fenomeni più impattanti sul sistema.

2.3. Definizione del processo generale

I siti pianificano la loro produzione agricola attraverso due azioni principali. In primo luogo, annualmente (quando la stagione in corso è l'autunno), essi stabiliscono l'estensione del territorio (ovvero il numero di patch) che dedicheranno alla cerealicoltura. Tale scelta è direttamente proporzionale alla quantità di popolazione presente (attributo dell'agente-sito) e inversamente proporzionale alla quantità media di cereali prodotta l'anno precedente: più la produzione per ettaro è stata scarsa, più spazio verrà dedicato alle colture per compensare l'improduttività, in questo modo gli agenti serbano quindi una memoria (anche se di un passato recente) in base a cui possono stimare (o tentare di stimare) la produzione per l'anno successivo. In secondo luogo, ad ogni ciclo i siti monitorano lo stato delle patch coltivate e, qualora non sia già presente⁵, scelgono la specie più adatta alla coltivazione. Le specie contemplate per questa ricostruzione sono frumenti vestiti, frumenti nudi, orzo (cereali a ciclo lungo e semina tipica-

⁵ Il raccolto di una *patch* può andar perso per via di una concomitanza di fattori antropici e ambientali, in questa sede solo parzialmente approfonditi.

mente autunnale), avena e miglio (cereali a ciclo stagionale, tipicamente impiegati, soprattutto il miglio, come soluzione di emergenza in caso di problemi con le colture principali). La scelta della specie dipende dalla stagione in corso, ma anche dalle condizioni ambientali più o meno idonee. Similmente a quanto avviene con la produttività, i siti prendono atto, durante ogni stagione, delle condizioni di piovosità e dello stato di umidità dei suoli coltivati. In base all'esperienza pregressa, sia per quanto riguarda la resa agraria che le condizioni climatiche locali, i siti definiscono quindi la propria strategia produttiva. Il processo generale della produzione è così sintetizzabile:

- I siti aggiornano la propria popolazione in base alla disponibilità alimentare.
- I siti stabiliscono lo spazio da coltivare in base alla disponibilità (il sovraffollamento nell'area è stato uno degli aspetti potenzialmente critici per le sorti della polity terramaricola) e in base alla precedente produzione.
- I siti scelgono le specie da coltivare in ogni cella di loro pertinenza in base alla disponibilità idrica precedentemente riscontrata.
- Le patch aggiornano l'andamento della produzione in base alle effettive condizioni climatiche in corso. Se le minime esigenze ambientali della coltura presente non vengono soddisfatte, la patch cessa di produrre e azzerata la specie in essa coltivata.
- In assenza di colture presenti il sito può fare una nuova scelta adeguata alle condizioni presenti. Se invece il ciclo colturale prosegue senza intoppi, al suo termine viene "prodotta" una quantità alimentare adeguata alle condizioni ambientali: produrrà maggiormente, cioè, una patch con condizioni di umidità e temperatura più vicine all'*optimum* climatico della specie coltivata.
- Le quantità derivate dall'attività agricola vengono raccolte e consumate dai siti.

Due aspetti cruciali per l'andamento del sistema, specificamente trattati in questa sede, sono dunque in primo luogo il rapporto del territorio con il clima, e più precisamente la modalità con cui, in base alle condizioni ambientali, è regolata l'umidità del suolo in ogni patch, e in secondo luogo la capacità degli agenti-sito di predire e pianificare una produzione ottimale in base alla loro esperienza recente. Si è voluto rappresentare questo aspetto all'interno del modello poiché ad esacerbare uno stato di crisi generalizzata potrebbe essere stato anche un approccio scorretto da parte dei centri insediati, indotto da previsioni in seguito disattese. In quest'ottica, una drastica variazione climatica imprevista, soprattutto se siccitosa, avrebbe destabilizzato in maniera ancor più marcata l'intero sistema.

2.4. Parametri di riferimento e dati input

Nel caso del calcolo dell'umidità del suolo sono le proprietà stesse delle patch, sensibili a specifiche variabili globali (ovvero variabili che interessano tutti gli agenti all'interno del sistema), che influenzano questo valore. Determinante è

infatti la stagionalità: ad ogni ciclo della simulazione viene impostata una nuova stagione, e le patch aggiornano (in base ad un'estrazione stocastica attorno ad un valore medio di riferimento, secondo la distribuzione di probabilità di Poisson) il proprio stato di piovosità, espresso come quantità (in mm, corrispondenti a l/m^2) di pioggia precipitata nell'arco di tempo considerato di tre mesi, e contestualmente il livello di falda. Oltre che di questo attributo mutevole, le patch sono dotate anche di attributi fissi relativi alle loro proprietà idrogeologiche, a loro volta derivate dalla tessitura del suolo presente. I dati tessiturali utilizzati sono derivati dalle mappe disponibili nei geoportali regionali di Veneto e Lombardia⁶ e sono relativi al primo metro di profondità dall'attuale piano di campagna. Pur essendoci senza dubbio una difformità tra le superfici del paesaggio antico e quelle attuali (molteplici processi post-deposizionali nel corso del tempo hanno inoltre verosimilmente alterato, in alcune zone, la stratigrafia nel sottosuolo) si è scelto di accettare e prendere in considerazione questo dato come riferimento. Poiché infatti i suoli databili all'epoca in esame sono già in buona parte esposti dall'impatto di anni di agricoltura intensiva (che ha contribuito ad esporre sia tracce che materiali pertinenti al paesaggio fossile della *polity*), si presume grossomodo una corrispondenza (o comunque una discreta verosimiglianza) tra i dati pedologici attuali e quelli antichi. Le mappe regionali sono integrate nel modello attraverso l'estensione *GIS* di NetLogo (fig. 2). Da questi dati vettoriali, al *setup*, vengono estrapolati per ogni patch un attributo relativo alla tessitura e dei valori (stabiliti in base a valori medi di riferimento per ciascuna classe tessiturale) relativi alle rispettive proprietà idrologiche (tab. 1):

- il *punto di appassimento*, ovvero la quantità d'acqua trattenuta dal terreno con una forza superiore alla capacità di assorbimento radicale (in altre parole, la quantità d'acqua non accessibile alla vegetazione presente);

TESSITURA	PESO SPECIFICO (g/cm ³)	PUNTO DI APPASSIMENTO (g/100g)	CAPACITÀ DI CAMPO (g/100g)	PUNTO DI SATURAZIONE (cm ³ /cm ³)	SPESSORE-FRANGIACA-PILLARE (m)
franca	1,32	11,52	24,42	0,47	0,375
franco-argillosa	1,27	13,68	28,62	0,5	0,469
franco-limosa	1,24	14,48	30,39	0,47	0,682
franco-limosa-argillosa	1,19	16,96	35,17	0,52	1,339
franco-sabbiosa	1,44	6,92	15,29	0,41	0,25
argillosa-limosa	1,15	18,63	38,4	0,54	1,92
sabbiosa	1,51	3,74	8,98	0,36	0,815
argillosa-limosa	1,17	18,44	37,81	0,56	0,1

Tab.1. Tabella riassuntiva dei parametri del suolo corrispondenti alle classi tessiturali presenti nell'ambiente del modello.

⁶ Per i dati del Veneto: <https://gaia.arpa.veneto.it/> (ultimo accesso marzo 2022); per la Lombardia: <https://www.geoportale.regione.lombardia.it/> (ultimo accesso marzo 2022).

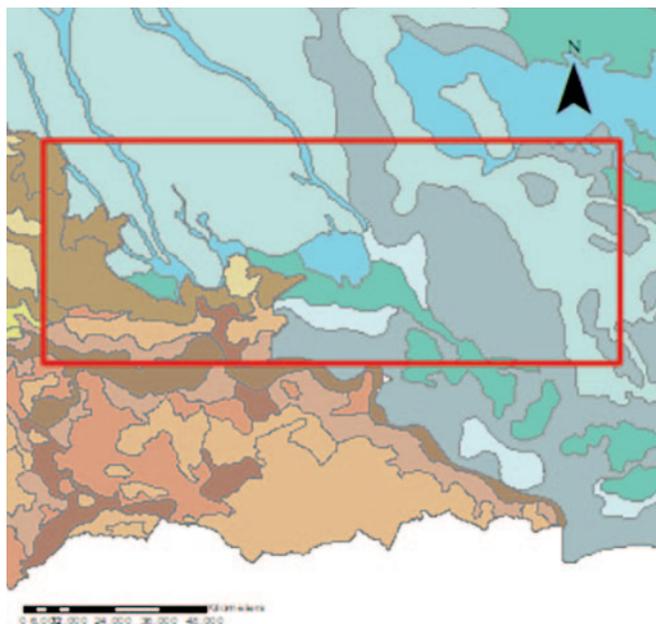


Fig. 2. Unione mappe pedologiche di Veneto e Lombardia. Con il riquadro rosso è indicata l'area di indagine.

- la *capacità di campo*, ovvero la concentrazione d'acqua, proporzionata al volume di terra di riferimento⁷, in uno stato di equilibrio in cui i meati minori sono colmi d'acqua e i meati maggiori contengono aria;
- il *punto di saturazione*, ovvero la quantità d'acqua presente nel volume di riferimento in totale assenza d'aria nel suolo;
- lo spessore della *frangia capillare*, ovvero la zona intermedia tra la fascia di terreno saturo (il cui limite superiore corrisponde al tetto di falda) e quella insatura (il cui limite superiore corrisponde al piano di campagna).

2.5. Calcolo dell'umidità del suolo

Il processo di aggiornamento dell'umidità dei suoli è concettualmente suddivisibile in due sezioni: nella prima viene calcolato un valore preciso di umidità in base ai parametri considerati, mentre nella seconda tale valore viene ricondotto entro una più generica suddivisione in "classi di umidità" correlate al fabbisogno idrico delle specie vegetali. Il calcolo dell'umidità del suolo svolge un ruolo fondamentale all'interno del modello, sia perché questo valore condiziona il comportamento degli agenti (che in base ad esso scelgono la specie da coltivare più

⁷ Nel nostro caso corrispondente a 1 m³.

adatta), sia perché descrive l'influenza sul sistema di due dei fattori ritenuti più determinanti per il successo della produzione: il clima e lo stato del terreno. Il contributo del clima deriva dalle variabili stagionali in corso ma anche, indirettamente, da quelle trascorse: è il caso dell'oscillazione (in positivo o in negativo) della falda freatica, la cui profondità minima dipende sia dalla stagionalità che dalle precipitazioni nei cicli precedenti. Nella prima sezione del processo, i valori idrologici derivati dalla classe tessiturale vengono impiegati per un calcolo della quantità d'acqua nel suolo (AS), nella presente analisi semplificato⁸ secondo l'equazione:

$$AS = (P + A_f) - PA$$

i cui termini sono:

- P precipitazioni giornaliere (mm)
- A_f , l'apporto di falda
- PA, punto di appassimento

La quantità di precipitazioni stagionale viene suddivisa per un numero indicativo di 90 giorni, ottenendo un valore giornaliero (P). L'apporto di falda (A_f) è dato dalla somma dell'acqua presente nella zona satura e quella nella frangia capillare.

$$A_f = ZS + FC$$

$$ZS = VOL_{ZS} * PS$$

$$FC = VOL_{FC} * ((PS + CC) / 2)$$

La quantità d'acqua nella zona satura (ZS) corrisponde al punto di saturazione (PS) moltiplicato per il suo volume⁹ (VOL_{ZS}). Per l'apporto dalla frangia capillare (FC) è stato considerato, in via approssimativa, un valore medio tra il punto di saturazione e la capacità di campo (CC). L'apporto di falda (A_f) così ottenuto, sommato alle precipitazioni giornaliere (P), consiste nell'apporto idrico complessivo. Come fattore "sottrattivo" nel bilancio idrico è stato invece preso in considerazione il punto di appassimento (PA).

Nella seconda sezione del processo i valori di idratazione del suolo ottenuti per ogni patch vengono riclassificati per determinare valori di riferimento più generici, corrispondenti a 7 classi di umidità del terreno comprese tra 0 e 6. Due valori considerati a tale scopo, oltre alla quantità d'acqua AS appena calcolata, sono il già menzionato punto di saturazione, che indica una totale assenza di aria nel terreno a scapito dell'acqua, e dunque una condizione inadatta alla coltivazione (inducendo l'asfissia radicale e quindi la potenziale morte della pianta), e l'evapotraspirazione potenziale (ET0), quantità che esprime il consumo idrico (quindi il fabbisogno) della vegetazione presente. Sono edite in letteratura diver-

⁸ Non sono infatti contemplati fattori ritenuti trascurabili per il caso specifico, come ad esempio il ruscellamento superficiale.

⁹ Il volume di riferimento considerato è, in questo caso, sempre di 1 m³.

se formule¹⁰ per determinare questo valore. Nel nostro caso, data la genericità e il grado di incertezza riguardo le condizioni meteorologiche, quelle pedologiche e la crescita stessa delle specie cerealicole prese in considerazione, si è scelto di utilizzare la formula di Hargreaves e Samani (Hargreaves, Samani 1982, 1985), di semplice applicazione in quanto necessitante di un limitato numero di dati di input:

$$ET_0 \text{ (mm d-1)} = 0,0023 R_0 (T+17,8) \Delta T 0,5$$

I termini dell'equazione sono:

- ET_0 : l'evapotraspirazione potenziale di riferimento (mm/d, ovvero millimetri al giorno, ovvero litri per m² al giorno);
- R_0 : l'evaporazione equivalente alla radiazione astronomica, o radiazione extraterrestre, dipendente dalla latitudine e dal periodo dell'anno in esame. È il valore indicativo, in sostanza, del contributo dell'irradiazione solare al bilancio ed è anch'essa espressa in mm/d;
- ΔT : l'escursione termica giornaliera (MaxT - MinT) in gradi centigradi (°C);
- T: la temperatura media dell'aria (°C) nel periodo di riferimento (quindi, nel nostro caso, la stagione in corso);
- il valore 0.0023 è il coefficiente colturale generico che può essere ricalibrato sulla base di dati empirici (a noi non disponibili, dunque per il computo è stato mantenuto questo valore come costante). Un'altra costante di calibrazione è il valore 17,8. Entrambe le costanti sono state proposte da Hargreaves e Samani (1985).

Il valore ET_0 risultante e il valore di saturazione fungono quindi da parametro di riferimento per la classificazione dell'umidità del suolo (US) secondo i seguenti criteri:

- con $2(ET_0/3) < AS \leq ET_0 + ((PS - ET_0)/3)$ → US = 3
- con $2(E_0/3) > AS \geq ET_0/3$ → US = 2
- con $E_0/3 > AS > 0$ → US = 1
- con $AS = 0$ → US = 0
- con $ET_0 + ((PS - ET_0)/3) < AS < 2((PS - ET_0)/3)$ → US = 4
- con $2((PS - ET_0)/3) < AS < PS$ → US = 5
- con $AS > PS$ → US = 6

In base alle caratteristiche della specie vegetale presente (resistenza al freddo, al caldo, a un eccesso o a una carenza di umidità) si avrà una maggiore o minore produzione in fase di raccolto. Classi di umidità intermedie (2 e 3) corrispondono ai valori più vicini all'*optimum* delle colture e i più distanti dai valori "critici" indicanti insufficienza (punto di appassimento o *wilting-point*) o eccesso di umidità (punto di saturazione o *saturation-point*), e sono pertanto da ritenersi

¹⁰ Cfr., ad esempio, con il metodo TURC (1961), il metodo BLANEY, CRIDDLE (1950), il metodo THORNTHWAITE (1948) o il più utilizzato metodo Penman-Monteith (PENMAN 1948; MONTEITH 1965; ALLEN *et al.* 1998).

quelli ottimali. Viceversa, classi di umidità estreme come 0 e 6 determinano invece, a prescindere dalla specie coltivata, un insuccesso nella produzione.

2.6. Predittività e pianificazione degli agenti

La gestione delle colture presenti in ogni unità territoriale spetta alle comunità locali ovvero, all'interno di AMPBV SIMULATOR, ai siti, le cui funzionalità includono una capacità di "predizione" di quello che sarà lo stato di umidità stagionale del suolo in base all'esperienza pregressa. Le competenze e il livello di complessità organizzativo raggiunto dalla società terramaricola al suo massimo sviluppo lasciano presumere una consapevolezza e una capacità di gestione delle risorse tali da adottare strategie differenziate in base alle condizioni del terreno; queste condizioni dovevano essere, ragionevolmente, ponderate da coloro che amministravano la produzione agraria. La predittività degli agenti in AMPBV SIMULATOR si basa sull'umidità riscontrata la stagione appena trascorsa (UTSP, Umidità del Terreno nella Stagione Precedente) e su quelle dell'anno precedente (UTAP, Umidità del Terreno nell'Anno Precedente): a partire da questi dati viene calcolata l'umidità del terreno stagionale (UTS):

$$UTS = (UTSP * UTAP2) / UTAP1$$

In cui UTAP1 e UTAP2 sono rispettivamente l'umidità del terreno l'anno precedente nella stagione appena trascorsa e l'umidità del terreno l'anno precedente nella stagione corrente. La stima dell'umidità condiziona la scelta, da parte degli agenti, delle specie da coltivare. Nel presente diagramma di flusso (fig. 3) sono illustrati i principali passaggi che costituiscono il processo ciclico di produzione in funzione allo stato del clima e (di conseguenza) del suolo (cfr. fig. 4 per una panoramica complessiva della sequenza di processi implementati nel modello).

3. Osservazioni e prospettive di ricerca

Come già menzionato il modello, allo stato attuale, è ancora ad uno stato preliminare di sviluppo. Nell'ambito dei primi test effettuati, ad ogni modo, si è riscontrata un'apprezzabile variabilità dei valori di umidità del suolo (e dunque, conseguentemente, della produttività delle patch) come effetto del clima sul sistema. Ciò risulta dovuto in particolare alla varietà delle tipologie di tessitura e dei livelli di falda. La tessitura del suolo influisce in maniera significativa sullo spessore della frangia capillare, da cui dipende il principale apporto idrico al terreno negli strati superiori al tetto di falda e dunque il grado di umidità (fig. 6); le oscillazioni del livello freatico di quest'ultima sono legate alla piovosità stagionale sia corrente che precedente in maniera pressoché diretta. Pur trattandosi di un territorio non estremamente variegato dal punto di vista geomorfologico, l'eterogeneità dei suoli presenti potrebbe aver costituito un fattore-chiave discrimi-

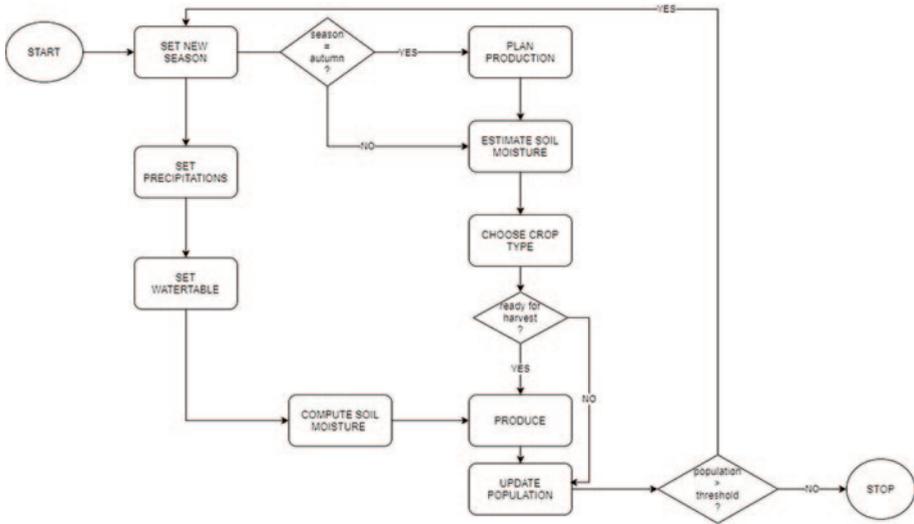


Fig.3. Diagramma di flusso del processo di produzione e di aggiornamento dello stato di umidità del suolo.

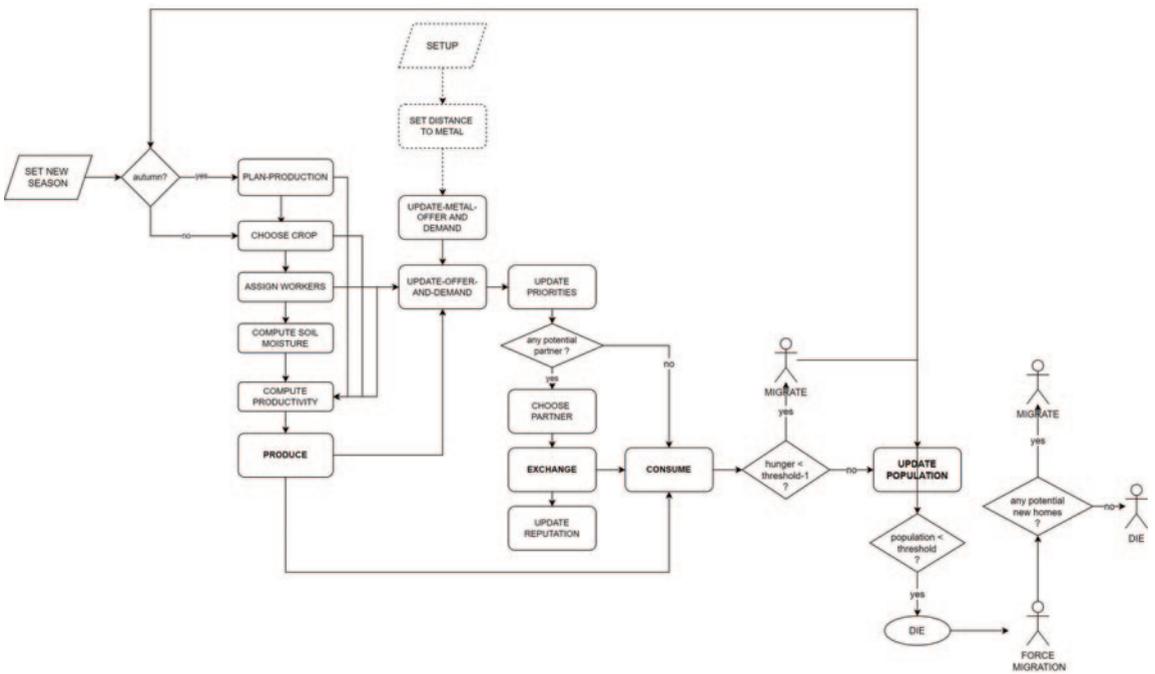


Fig. 4. Diagramma di flusso del processo ciclico generale (procedura "Go") di AMPBV SIMULATOR.



Fig. 5. Interfaccia del modello. Nella porzione di destra della schermata sono state predisposte le slider per la regolazione di alcuni valori di sistema, come la produttività media delle diverse tipologie culturali presenti (sezione "resources") le variabili climatiche di riferimento (sezione "climate").

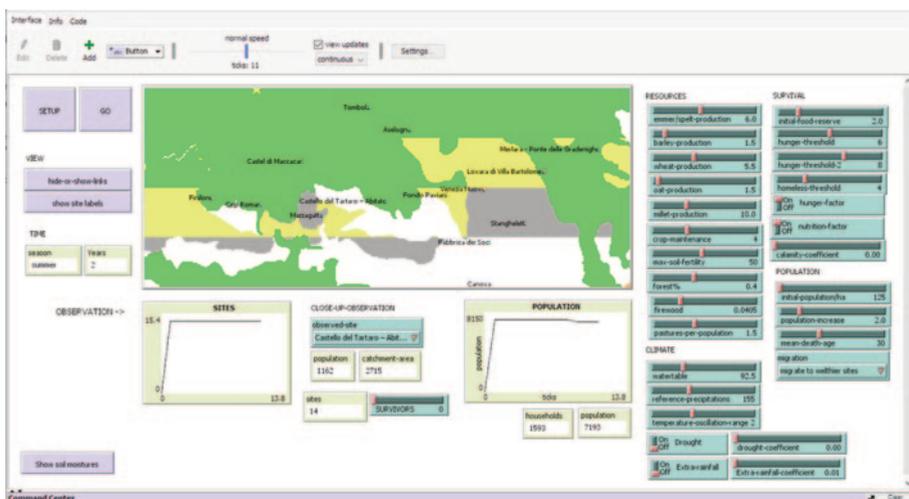


Fig. 6. Visualizzazione della distribuzione di umidità del terreno (entro il primo metro di profondità) in un test di simulazione (si scorge in alcuni casi una partizione rettilinea, dovuta alla maggior risoluzione spaziale delle mappe climatiche di riferimento). In verde sono rappresentate le celle con valore di umidità pari a 4, il giallo corrisponde a 3 mentre il grigio e il bianco definiscono rispettivamente le celle con umidità 2 e 1. Osservando questa rappresentazione si nota una certa eterogeneità soprattutto all'interno del comparto centrale dell'area in esame.

nante nell'economia locale dei siti e nella messa in opera di diverse soluzioni di *water-management*. Ciò porta a rivolgere una particolare attenzione all'ambiente come entità condizionante, e dunque all'importanza del fattore-spazio per il sistema. Al di là di un'attestata gerarchizzazione secondo rapporti di potere, la localizzazione degli insediamenti non solo rispetto alle idrografie attive in superficie, ma anche rispetto alle qualità del sottosuolo potrebbe aver avvantaggiato o svantaggiato significativamente il successo o la specializzazione produttiva di determinate comunità del Bronzo Recente, con effetti che potrebbero essersi manifestati in maniera evidente solo in una fase di crisi generalizzata. Fondamentale, in questo senso, è anche il comportamento delle comunità stesse che dipende, nel modello, dall'esperienza pregressa che può aver indotto a scelte rivelatesi, in presenza di oscillazioni climatiche drastiche anche di breve durata, inaspettatamente inadatte a garantire una produzione adeguata. Future analisi, ad uno stadio più avanzato di programmazione, permetteranno di esplorare ulteriori scenari e aspetti attraverso cui osservare fattori emergenti sia dal comportamento dell'ambiente, che da quello delle società terramaricole alla soglia del collasso. Se è ragionevole ritenere tale collasso come l'effetto di molteplici fenomeni concomitanti, le prime osservazioni effettuate sul nostro modello inducono ad ogni modo a prestare attenzione, nell'insorgenza di questi fenomeni, alla specificità del territorio a livello locale e alla capacità di gestione delle risorse idriche sotterranee da parte delle singole comunità.

Abstract

Il presente contributo descrive la concezione e lo sviluppo, all'interno di un modello basato sull'agente (ABM) del sistema terramaricolo nella bassa Veronese (AMPBV SIMULATOR), dei processi legati all'umidità del suolo come fattore critico per il comportamento, le scelte e in ultima istanza la sopravvivenza delle comunità insediate nella polity del Bronzo Recente. Oltre ad una relazione diretta tra il clima e l'idratazione del terreno, la simulazione prevede anche predittività e capacità di adattamento da parte degli agenti, che in base alle condizioni riscontrate e alla propria esperienza partecipano all'esito della produzione.

Parole chiave: Bassa Veronese, Agent-Based Modeling, umidità del suolo, terramare, collasso.

This paper presents the concept and development in AMPBV SIMULATOR, an Agent-Based Model (ABM) on the southern Verona Valleys terramare system, of soil moisturing processes as a critical factor for the behavior, the choices, and ultimately the survival of communities settled in the Recent Bronze Age polity. In addition to an evident relationship between climate and soil moisture, the simulation considers both a predictive and an adaptive behaviour on the part of the agents involved, who actively contribute to the outcoming production basing on the contingent conditions and their own experience.

Keywords: Verona low-plain, Agent-Based Modeling, soil humidity, terramare, collapse.

Bibliografia

- R.G. ALLEN, L.S. PEREIRA, D. RAES, M. SMITH (eds) 1998, *FAO Irrigation and Drainage. Paper 56*, Rome.
- C. BALISTA, H. BLAKE, A. DE GUIO, C. HOWARD DAVIS, P. HOWARD, R.D. WHITEHOUSE, J. WILKINS 1988, *Progetto Alto Polesine. Marzo-Aprile 1986. Relazione preliminare*, "Lancaster in Italy", 2, pp. 6-12.
- C. BALISTA, A. DE GUIO, A. VANZETTI, A. BETTO, G. DE ANGELI, F. SARTOR 2005, *Paleoidrografia, impianti terramaricoli e strade su argine: evoluzione paleoambientale, dinamiche insediative e organizzazione territoriale nelle Valli Grandi Veronesi alla fine dell'età del Bronzo*, "Padusa", XLI, pp. 97-151.
- C. BALISTA, F. BORTOLAMI, M. MARCHESINI, S. MARVELLI 2016, *Terrapieni a protezione dei campi dall'invasione delle Torbiere nelle Valli Grandi Veronesi nell'età del Bronzo Medio-Recente*, "IpoTESI di Preistoria", 12, pp. 53-102.
- M. BERNABÒ BREA, M. CREMASCHI 1997, *La terramara di S. Rosa di Poviglio: le strutture*, in M. BERNABÒ BREA, A. CARDARELLI, M. CREMASCHI (eds), *Le Terramare. La più antica civiltà padana*, Milano, pp. 196-212.
- A. BETTO 2013, *Le strade dell'età del Bronzo nelle Valli Grandi Veronesi Meridionali. Connettività e management idraulico nel quadro di un Paesaggio di Potere*, Tesi di Dottorato in Archeologia, Università degli Studi di Padova.
- L. BURIGANA, L. MAGNINI 2017, *Image Processing and Analysis of Radar and Lidar Data: New Discoveries in Southern Verona Lowland (Italy)*, "Science & Technology of Archaeological Research", 3(2), pp. 490-509.
- L. BURIGANA, A. DE GUIO, L. MAGNINI in press, *Roads or Embankments? The double function of the Terramare connective/hydraulic system in the Valli Grandi Veronesi*, in T. KALAYCI (ed), *Archaeologies of Roads*, Grand Forks.
- M. CALZOLARI 1991, *Alla ricerca del paesaggio antico: le divisioni agrarie di età romana nelle Valli Grandi Veronesi*, in A. SANDRINI, B. CHIAPPA (eds), *Cereia: storia di una Comunità attraverso i secoli*, Verona, pp. 31-40.
- C. CIOFFI REVILLA 2010, *Computational Social Science*, "Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics", 2(3), pp. 259-271.
- M. CREMASCHI 2009a, *Ambiente, clima ed uso del suolo nella crisi della cultura delle terramare*, in A. CAZZELLA, A. CARDARELLI, M. FRANGIPANE, R. PERONI (eds), *Le ragioni del cambiamento*, Roma, pp. 521-534.
- M. CREMASCHI 2009b, *Foreste, terre coltivate ed acque. L'originalità del progetto terramaricolo*, in M. BERNABÒ BREA, M. CREMASCHI (eds), *Acqua e civiltà nelle Terramare. La vasca votiva di Noceto*, Milano, pp. 34-45.
- M. CREMASCHI 2017, *Acque, campi e boschi nella civiltà delle terramare. Le ragioni di un collasso di civiltà nella Pianura Padana dell'età del Bronzo*, "Istituto Lombardo - Accademia di Scienze e Lettere - Incontri di Studio", online in <https://ilasl.org> (ultimo accesso: 20 marzo 2022).
- M. CREMASCHI, C. PIZZI 2006, *I pozzi perimetrali del Villaggio Grande di Santa Rosa di Poviglio (RE). Uso delle risorse idriche tra la fine del Bronzo Medio e il Bronzo Recente*, in A. CARDARELLI, M. PACCIARELLI, A. VANZETTI (eds), *Studi di Protostoria in onore di Renato Peroni*, Firenze, pp. 50-61.
- M. CREMASCHI, C. PIZZI, V. VALSECCHI 2007, *Gestion des eaux dans les terramares et un possible changement environnemental pendant la tarde age du Bronze de l'Italie du Nord. Le cas de la terramara de Santa Rosa (RE, Italie)*, in H. RICHARD, M. MAGNY, C. MORDANT (eds), *Actes du 129^e Congrès national des Sociétés historiques et scientifiques*, Besançon, pp. 327-342.
- A. DE GUIO 1985, *Archeologia di superficie ed archeologia superficiale*, "Quaderni di Archeologia del Veneto", 1, pp. 176-184.

- A. DE GUIO in press, *Frogs and grogs around the pond... Dalle Valli Grandi a Frattesi-na*, "Padusa", LVII.
- A. DE GUIO, A. BETTO, C. BALISTA 2011, *Per la tutela e la valorizzazione di un patrimonio paesaggistico-culturale unico nel suo genere: le tracce degli antichi campi, dei canali e delle strade su terrapieno di età preistorica e romana conservate nel sottosuolo delle Valli Grandi e Medio Veronese*, in M. SARACINO (ed), *Pianificazione territoriale, urbanistica e archeologia: una sintesi possibile*, Verona, pp. 79-124.
- A. DE GUIO, C. BALISTA, A. VANZETTI, A. BETTO, C. BOVOLATO 2015, *Progetto AMPBV e off-site power: linee di un percorso critico di complessità sociale*, in G. LEONARDI, V. TINÉ (eds), *Preistoria e protostoria del Veneto*, Firenze, pp. 507-514.
- J.M. EPSTEIN 2008, *Why Model?*, "Journal of Artificial Societies and Social Simulation", 11(4), pp. 1-12.
- N. GILBERT, K.G. TROITZSCH 2009, *Simulation for the Social Scientist*, Berkshire.
- G.H. HARGRAVES, Z.A. SAMANI 1982, *Estimating potential evapotranspiration*, "Journal of Irrigation and Drainage Engineering", 108, pp. 223-230.
- G.H. HARGRAVES, Z.A. SAMANI 1985, *Reference Crop Evapotranspiration from Temperature*, "Applied Engineering in Agriculture", 1(2), pp. 96-99.
- D. HARVEY 1969, *Explanation in Geography*, London.
- A.M. MERCURI, C.A. ACCORSI, M. BADINI MOZZANTI, G. BOSI, A. CARDARELLI, D. LABATE, M. MARCHESINI, G. TREVISAN GRANDI 2006, *Economy and environment of Bronze age settlements – Terramaras – on the Po plain (Northern Italy): first results from the archeobotanical research at the Terramara di Montale*, "Vegetation History and Archaeobotany", 16(1), pp. 43-60.
- J.L. MONTEITH 1965, *Evaporation and environment*, "Symposia of the Society for Experimental Biology", 19, pp. 205-234.
- H.L. PENMAN 1948, *Natural evaporation from open water, bare soil, and grass*, "Proceedings of the Royal Society in London", 193, pp. 120-145.
- C.W. THORNTON 1948, *An approach toward a rational classification of climate*, "The Geographical Review", 38(1), pp. 55-94.
- P. TOZZI, M. HARARI 1990, *Tempi di un territorio. Atlante aerofotografico delle Valli Grandi Veronesi*, Parma.
- L. TURC 1961, *Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climate formula evolved up to date*, "Annales Agronomiques", 12, pp. 13-49.
- U. WILENSKY, W. RAND 2015, *An Introduction to Agent-Based Modeling: Modeling Natural, Social, and Engineered Complex Systems with NetLogo*, Cambridge.

SITI WEB

<https://gaia.arpa.veneto.it/> (ultimo accesso: marzo 2022).

<https://www.geoportale.regione.lombardia.it/> (ultimo accesso: marzo 2022).

<https://ccl.northwestern.edu/> (ultimo accesso: agosto 2021).