

VARIAZIONI SPAZIO-TEMPORALI DEL REGIME E DELL'ESPOSIZIONE AGLI INCENDI IN SARDEGNA, ITALIA

Olga M. Lozano¹, Michele Salis^{1,2}, Alan A. Ager³, Fermin Alcasena Urdirroz^{2,6}, Bachisio Arca⁵,
Mark A. Finney⁴, Valentina Bacciu², Donatella Spano^{1,2}

¹University of Sassari, Department of Science for Nature and Environmental Resources (DIPNET), Sassari, Italy; mlozano@uniss.it

²Euro-Mediterranean Center on Climate Change (CMCC), IAFENT Division, Sassari, Italy

³USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Western Wildland Environmental Threat Assessment Center, USA

⁴USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fire Sciences Laboratory, Missoula, USA

⁵National Research Council (CNR), Institute of Biometeorology (IBIMET), Sassari, Italy

⁶University of Lleida, School of Agricultural Engineering (ETSEA), Lleida, Spain

Nelle ultime decadi numerosi studi hanno evidenziato un aumento del rischio di insorgenza di grandi incendi di elevata intensità, unitamente a variazioni significative nel *pattern* dei regime degli incendi. Nel Bacino del Mediterraneo, la Sardegna ha registrato una marcata riduzione dell'area bruciata media annua a partire dal 1980, con una evidente variazione a metà degli anni '90. Nonostante questo trend, gli incendi causano tutt'oggi perdite finanziarie considerevoli, danni agli ecosistemi naturali, incidenti e vittime. Pertanto, in un'ottica di ottimizzazione degli investimenti e di allocazione di risorse, è necessario migliorare l'accuratezza delle stime di esposizione e rischio degli incendi e attuare attività di prevenzione e mitigazione mirate. Da questo punto di vista, l'applicazione di modelli di propagazione degli incendi continua a crescere fra pianificatori e portatori di interesse che richiedono analisi di rischio integrate e di dettaglio. L'obiettivo di questo lavoro è quello di esaminare le variazioni di regime e esposizione agli incendi in Sardegna, per due periodi specifici: 1980-1994 e 1995-2009. Sono stati analizzati i cambiamenti nel regime degli incendi in relazione ai principali fattori causali ed è stato poi applicato un approccio modellistico, basato sull'algoritmo *minimum travel time*, per stimare i cambiamenti spazio-temporali nell'esposizione agli incendi. La comparazione ha evidenziato: (1) una riduzione significativa nella superficie annua mediamente bruciata; (2) un anticipo di 15 giorni nel picco della stagione degli incendi nel 1995-2009, unitamente ad un incremento nelle temperature primaverili; (3) un aumento dell'esposizione agli incendi nelle interfacce urbano rurali; (4) notevoli variazioni spaziali della *burn probability*, e cambiamenti limitati per l'intensità potenziale degli incendi. La metodologia proposta costituisce un valido processo analitico per quantificare il livello di esposizione e rischio incendi che le comunità e i beni ad alto valore devono affrontare, e per pianificare e gestire i combustibili e il paesaggio al fine di mitigare gli impatti potenziali degli incendi.

Parole chiave: regime ed esposizione agli incendi, rischio incendi, modellistica della propagazione degli incendi, algoritmo MTT, *burn probability*, aree mediterranee.

Keywords: wildfire regime and exposure, wildfire risk, wildfire spread modeling, MTT algorithm, burn probability, Mediterranean areas.

<http://dx.doi.org/10.4129/2cis-ol-var>

1. Introduzione

Diversi studi recenti hanno evidenziato che gli incendi sono un problema crescente in molte aree del mondo e, in particolare, che il rischio di incendio e la frequenza di mega-incendi sono aumentati (Moreira *et al.*, 2011; Viegas, 2004; Xanthopoulos, 2007). I fattori che spiegano questa situazione sono diversi, tra i quali l'aumento nella frequenza di condizioni meteorologiche estreme, l'allungamento della stagione degli incendi, l'esodo rurale con un aumento della pressione antropica su coste e città, l'invecchiamento della popolazione rurale, l'abbandono delle campagne, e l'accumulo di combustibili non

gestiti (Brotons *et al.*, 2013; Moreira *et al.*, 2011; Salis *et al.*, 2013, 2014).

L'obiettivo principale del presente lavoro è quello di esaminare le variazioni di regime e esposizione agli incendi in Sardegna dal 1980 al 2009. Il periodo studio è stato suddiviso in due sotto-periodi di 15 anni: il primo dal 1980 al 1994, il secondo dal 1995 al 2009.

Il lavoro è stato strutturato in due parti. Nella prima parte sono stati analizzati i cambiamenti nel regime degli incendi e dei principali fattori causali, ovvero le condizioni meteorologiche, l'uso del suolo, la capacità di soppressione, la distribuzione spaziale e temporale delle insorgenze degli incendi.

Nella seconda parte, è stato utilizzato un approccio modellistico per la simulazione di propagazione e comportamento di incendi, al fine di stimare a scala di dettaglio i cambiamenti spazio-temporali nell'esposizione agli incendi per l'intera isola e per definiti beni di interesse.

2. Metodologia

2.1 Area studio

La Sardegna si colloca nella zona centrale del bacino mediterraneo e ha una superficie di circa 24.000 km². È la seconda isola del Mediterraneo per grandezza e rappresenta bene le tipiche condizioni mediterranee.

La sua orografia è prevalentemente collinare, con una zona montuosa più elevata che raggiunge i 1850 m situata nella zona centro-orientale dell'isola, e due pianure più estese, nel sudovest e nel nordovest della regione.

L'isola è caratterizzata da un clima mediterraneo con precipitazioni medie annue che vanno dai 500 mm nelle zone costiere ai 1200 mm nelle zone montuose, con temperature massime che in estate superano spesso i 30 gradi. I venti più frequenti soffiano da ovest e nord-ovest (Chessa e Delitala, 1997). La vegetazione erbacea (50%) e arbustiva (25%) copre la maggior parte dell'isola; le foreste sono principalmente rappresentate da boschi di latifoglie, principalmente rappresentati da *Quercus ilex* L., *Quercus pubescens* Willd. e *Quercus suber* L. (Tab. 1).

2.2 Dati meteorologici

I dati giornalieri dal 1980 al 2009 relativi alle variabili meteorologiche sono stati raccolti da 11 stazioni meteorologiche (Salis *et al.*, 2014; Tutiempo, 2012); la direzione del vento associata a tutti gli incendi del periodo studio è stata integrata con le informazioni provenienti dal Corpo Forestale e di Vigilanza Ambientale (CFVA) della Sardegna.

2.3 Database storico delle insorgenze di incendio

Il database include, per ogni insorgenza di incendio avvenuta fra il 1980 e il 2009, la data, il comune, le coordinate del punto di insorgenza e la superficie percorsa dall'incendio.

2.4 Capacità di soppressione degli incendi

La capacità di soppressione degli incendi è stata valutata sulla base dei dati disponibili dal 1976 al 2009 (Boni, 2004; Regione Sardegna 1976; <http://www.sardegna-ambiente.it/>), anche se non è stato possibile raccogliere informazioni dal 1977 al 1993 in quanto non disponibili.

2.5 Uso del suolo e tipi di combustibili

Dalla riclassificazione della Corine Land Cover del 1990 e del 2000 (EEA, 2002) sono state ottenute le mappe di uso del suolo rispettivamente per il 1980-1994 e il 1995-2009. Le mappe di combustibile sono state prodotte associando alle macro-categorie della Corine una serie di modelli di combustibile, in parte standard, in parte derivati da misurazioni e campio-

namenti fatti in Sardegna (Tab. 1, Arca *et al.*, 2007, 2009; Pellizzaro *et al.*, 2007; Salis *et al.*, 2013, 2014).

2.6 Simulazioni

Come input spaziali per il simulatore sono state create le mappe topografiche di quota, pendenza ed esposizione e quelle relative alle tipologie di combustibile e alle caratteristiche della chioma (canopy cover, canopy height, crown base height and crown bulk density).

Altro input spaziale, derivato del database storico, è rappresentato dal grid storico di probabilità di insorgenza di incendio, necessario per localizzare spazialmente e temporalmente le insorgenze per le simulazioni seguendo un approccio probabilistico. Per l'umidità del combustibile, la direzione e l'intensità del vento sono stati utilizzati i valori associati alle giornate con gli eventi più rilevanti per i due periodi 1980-1994 e 1995-2009.

Il simulatore utilizzato si chiama RANDIG, ed è una versione a stringa di comando di FlamMap e utilizza il *Minimum Travel Time* (Finney, 2002; Finney, 2006) come algoritmo per la propagazione dell'incendio. Per ognuno dei due periodi sono stati simulati 100,000 incendi.

Gli outputs analizzati sono la *Burn Probability*, la *Conditional Flame Length* e la *Fire Size*. Tutti gli inputs e outputs spaziali sono stati prodotti a una risoluzione di 200 m.

3. Risultati

La Sardegna ha registrato una riduzione sia nel numero d'insorgenze sia nell'area bruciata, soprattutto dopo il 1995 (Fig. 1). Nel caso dell'area bruciata, la riduzione dal 1980-1994 al periodo successivo è stata notevole, passando da circa 60,000 ha annui a 20,000 ha.

Quando alla relazione tra l'area bruciata e il numero d'incendi per classi dimensionali, non ci sono state variazioni significative tra i due periodi per quanto riguarda gli incendi più estesi: il 2% circa degli incendi ha interessato circa il 60% del totale della superficie bruciata. Questi grandi incendi sono spesso guidati dal vento e da condizioni meteorologiche estreme, ovvero principalmente

da alte temperature e bassa umidità relativa. In tali condizioni anche le operazioni di lotta e soppressione degli incendi sono molto difficili e non sempre efficaci.

È stato inoltre osservato un anticipo nel picco della stagione degli incendi (dalla prima metà di agosto nel 1980-1994 alla seconda di luglio nel 1995-2009), soprattutto per quanto riguarda l'area bruciata (Fig. 2).

L'analisi dei trend delle precipitazioni e delle temperature ha permesso di evidenziare che non ci sono state variazioni statisticamente significative. D'altro canto, l'aumento nelle temperature medie, minime e massime di Aprile, Maggio e Giugno dal 1980-1994 al 1995-2009 è risultato statisticamente significativo. I cambiamenti nell'uso del suolo fra i due periodi studio sono stati poco rilevanti (Tab. 1). Nel 1995-2009 si è ridotta la superficie occupata da seminativi e aree agricole di circa 49,000 ettari, mentre la superficie a macchia mediterranea è aumentata quasi della stessa quantità (48,000 ettari). Anche le aree a pascolo erbaceo si sono ridotte di circa

11,000 ettari, controbilanciate da un incremento delle superfici ad aree urbane di 11,600 ettari. La capacità di soppressione degli incendi nell'isola è aumentata notevolmente dopo i drammatici eventi del 1983 (Tab. 2). L'incremento delle risorse utilizzate per la soppressione degli incendi è stato particolarmente rilevante nel secondo periodo 1995-2009, soprattutto dopo l'anno 2000. Riguardo al *pattern* delle insorgenze, si sono osservate notevoli variazioni, con un anticipo delle insorgenze di quindici giorni. Questo anticipo ha caratterizzato buona parte dell'isola, eccetto le zone più legate alle attività pastorali, come per esempio la parte nord-ovest dell'isola, dove gli incendi tardivi sono rimasti un elemento caratterizzante. I risultati relativi alla *Burn Probability* hanno mostrato un calo soprattutto in alcune zone collinari, mentre si è verificato un incremento nelle pianure e nelle aree costiere e urbane (Fig. 3).

Riguardo alla *Fire Size* e alla *Conditional Flame Length* non ci sono stati grandi cambiamenti: tale risultato non è sorprendente poiché questi outputs sono legati alle tipologie di combustibile e alla frequenza di giornate con condizioni estreme.

4. Discussione e Conclusioni

In generale, la comparazione fra 1980-1994 e 1995-2009 in Sardegna ha mostrato una riduzione significativa nell'area annua mediamente bruciata e nel numero di insorgenze (Fig. 1) e un anticipo di 15 giorni nel picco della stagione degli incendi nel secondo periodo in esame (Figura 2).

Questo lavoro ha evidenziato che le variazioni di uso del suolo e delle condizioni meteorologiche non avreb-

bero avuto effetti sulle variazioni nel regime degli incendi.

Il calo nell'area bruciata e nel numero d'insorgenze è stato probabilmente influenzato dal cambiamento nel *pattern* delle insorgenze di incendio e da una maggiore consapevolezza della popolazione sul pericolo del fuoco, insieme al forte miglioramento nella capacità di soppressione degli incendi. L'anticipo nel picco della stagione degli incendi nel 1995-2009 sembrerebbe legato all'incremento nelle temperature primaverili, unitamente alla riduzione degli incendi agro-pastorali che potrebbe essere anche una causa della riduzione nel numero di incendi, in particolare degli incendi tardivi.

Il lavoro ha evidenziato notevoli variazioni spaziali della *Burn Probability*, e cambiamenti limitati per l'intensità e la dimensione potenziale degli incendi. Sovrapponendo le mappe dei valori del 99° percentile della *Burn Probability* con le informazioni vettoriali relative alle interfacce urbano-rurali si è inoltre osservato un leggero spostamento a sud e una concentrazione in certe zone delle province di Oristano e Cagliari (Fig. 4).

La combinazione di analisi empiriche e di strumenti modellistici ha garantito un approccio solido per comprendere le dinamiche spazio-temporali degli incendi nell'isola (Salis *et al.*, 2013).

Questa metodologia permette inoltre di rispondere a diverse esigenze dei pianificatori e dei gestori territoriali, tra le quali lo sviluppo delle linee guida per mitigare gli impatti potenziali degli incendi, l'identificazione delle aree a più alta esposizione, la definizione di priorità di intervento o la valutazione dell'efficienza dei trattamenti del combustibile.

Tabella 1. Tipi di vegetazione derivati dalle mappe della Corine Land Cover del 1990 e del 2000, con incidenza relativa in percentuale e modelli di combustibile usati nelle simulazioni di incendi.

Table 1. Vegetation types derived from Corine Land Cover maps of 1990 and 2000, with the relative incidence in percentage and the associated fuel models used for the wildfire simulations.

<i>Vegetation Type</i>	<i>CLC1990 Incidence (%)</i>	<i>CLC2000 Incidence (%)</i>	<i>Fuel Model</i>
Broadleaf	12.6	12.7	TL3 (Scott and Burgan, 2005)
Conifer	2.8	2.8	TL6 (Scott and Burgan, 2005)
Broadleaf-Conifer Mix	0.6	0.6	TU1 (Scott and Burgan, 2005)
Mediterranean Maquis	26.4	28.3	CM28 (Arca <i>et al.</i> , 2009)
Garrigue	1.1	1.4	CM29 (Arca <i>et al.</i> , 2009)
Herbaceous Pastures	7.2	6.8	CM27 (Arca <i>et al.</i> , 2009)
Grass-Agricultural Lands	43.5	41.4	Mod 1 (Anderson, 1982)
Vineyards, Orchards and Olive Groves	2.2	2.1	Mod 2 (Anderson, 1982)
Sands and Rocks	0.4	0.1	Mod 1 (Anderson, 1982)
Urban Areas	2.3	2.8	NB1 (Scott and Burgan, 2005)
Water Bodies	1.1	1.1	NB8 (Scott and Burgan, 2005)

Tabella 2. Numero di persone e mezzi aerei disponibili durante le più recenti stagioni antincendio in Sardegna.
 Table 2. Number of people and aerial forces available during the most recent fire seasons in Sardinia.

YEAR	TERRESTRIAL FORCES			AERIAL FORCES			
	CFVA	ENTE FORESTE	TOTAL	SMALL HELICOPTERS	LARGE HELICOPTERS	CANADAIRS	OTHER AIRCRAFTS
1976	na	2164	2164*	4			
1990	970	1500	2470*	6		1	
1994	na	na	na	8		2	2
1996	1157	3558	4715	10		4	2
1997	1139	3370	4509	11		4	
1998	1116	3290	4406	12		na	
1999	1110	3390	4500	12		na	
2000	1183	3321	4504	11	2	2	
2001	1044	3555	4599	11	1	2	
2002	979	3535	4514	11	2	2	
2003	1360	3833	5193	12	2	2	
2004	1000	4000	5000	11	3	2	
2006	1041	3601	4642	14	2	2	2
2007	1250	3511	4761	12	2	4	
2008	1353	3344	4697	12	1	3	
2009	1482	3344	4826	13	1	3	

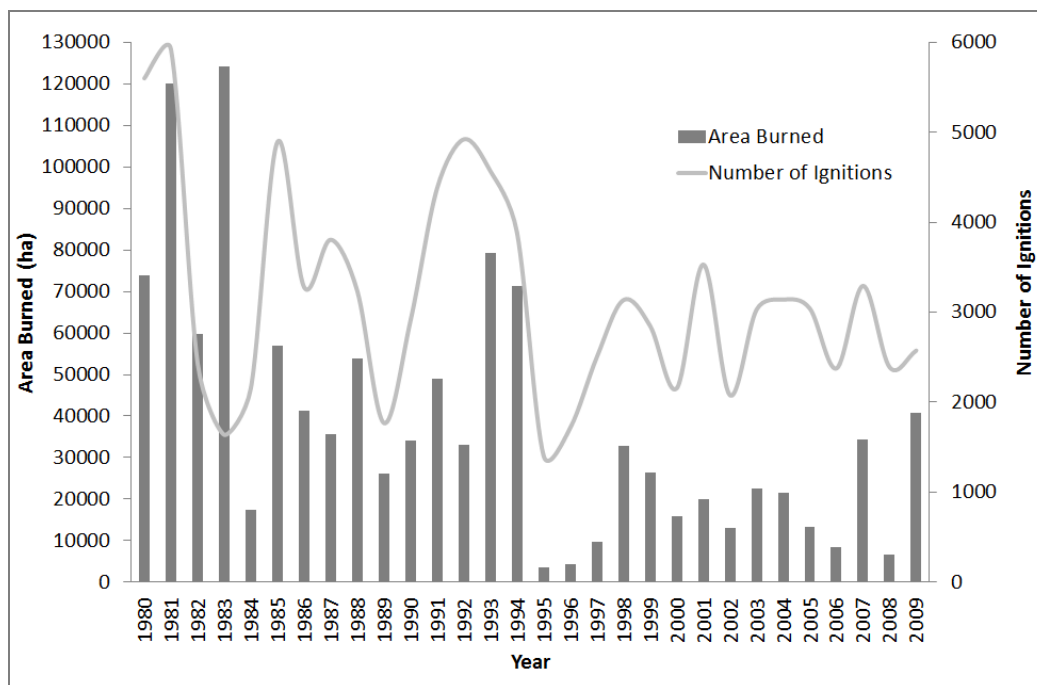


Figura 1. Numero di incendi e area bruciata in Sardegna nel periodo 1980-2009. Dati del Corpo Forestale e di Vigilanza Ambientale della Sardegna (2010).

Figure 1. Historical fire number and area burned in Sardinia for the period 1980-2009. Data from the Sardinia Forest Service (2010).

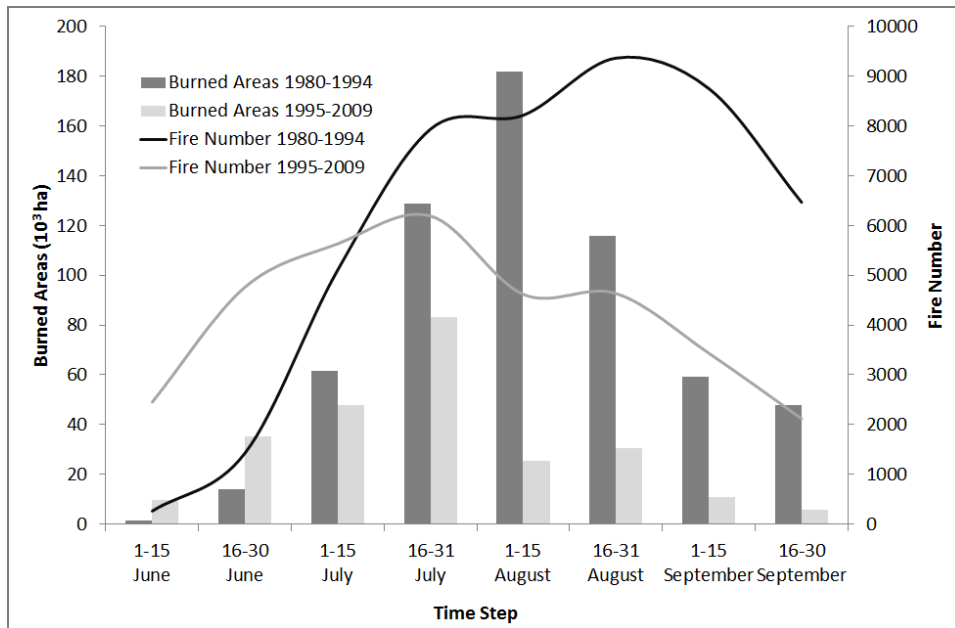


Figura 2. Distribuzione del numero di incendi e dell'area bruciata per time steps di quindici giorni in Sardegna, da Giugno a Settembre, per entrambi i periodi (Dati del Corpo Forestale e di Vigilanza Ambientale della Sardegna (2010).

Figure 2. Distribution of area burned and fire ignition percentage by time steps in Sardinia from June to September, for the two time frames (Sardinia Forest Service, 2010).

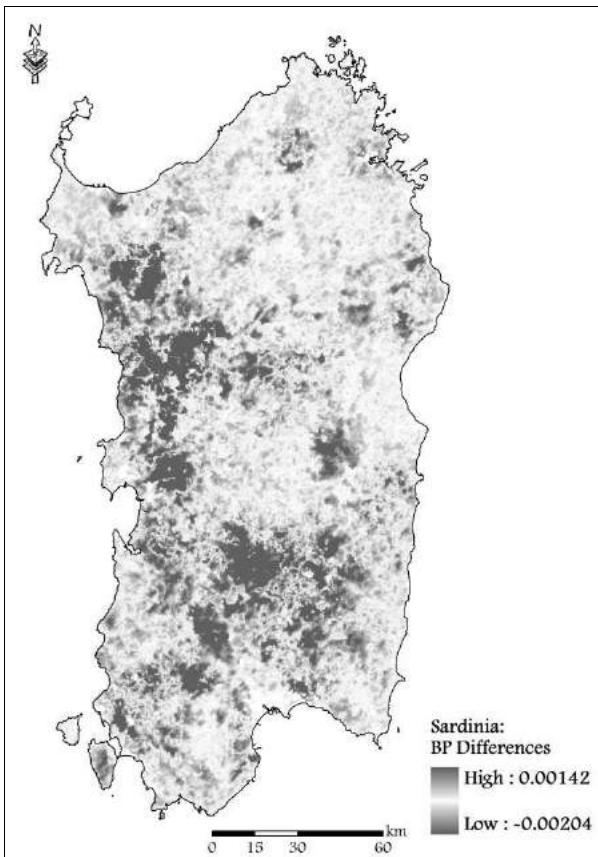


Figura 3. Mappa delle differenze di Burn Probability (BP) tra 1995-2009 e 1980-1994.

Figure 3. Map of difference in Burn Probability (BP) between 1995-2009 and 1980-1994

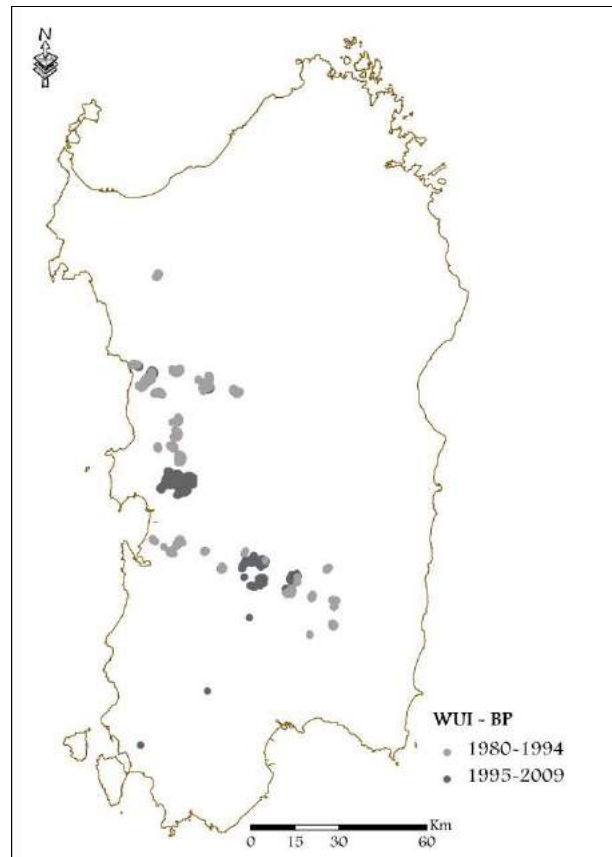


Figura 4. Variazioni nei valori del 99° percentile della Burn Probability (BP) tra 1995-2009 e 1980-1994 per le zone di interfaccia urbano-rurale.

Figure 4. Variations in 99th percentile of Burn Probability (BP) values between 1995-2009 and 1980-1994 for wildland urban interfaces.

SUMMARY

Spatiotemporal variations in wildfire regime and exposure for Sardinia, Italy

Over the past decades several studies highlighted the increasing risk in the occurrence of large and severe wildfires as well as significant variation in fire regime *pattern*. In the Mediterranean basin, Sardinia (Italy) has seen a marked reduction in the annual area burned since the 1980s, with a sharp variation in mid-'90s. Despite this downward trend wildfires still cause considerable financial losses, damages to natural ecosystems, accidents and fatalities. Therefore, efficient wildfire exposure and risk estimation as well as prevention and mitigation activities become essential, particularly in a perspective of investments optimization and resources allocation. From this point of view, application of fire spread modeling continues to grow among planners and researchers that require integrated and fine scale risk analyses. The goal of this work was to examine shifts in Sardinia wildfire regime and exposure for two specific periods: 1980-1994 vs 1995-2009. We first analyzed temporal changes in fire regime in relation to the major casual factors, namely weather, land uses and fuels, fire ignitions, and suppression capacity. We then applied mechanistic wildfire simulation modeling, based on the minimum travel time fire spread algorithm, to assess fine-scale spatiotemporal changes in wildfire exposure for the whole island and for selected features of interest. The combined empirical analyses and simulation modeling provided a robust approach for understanding the spatiotemporal wildfire dynamics on the island.

Overall, the comparison between 1980-1994 and 1995-2009 time periods in Sardinia showed: (1) a significant reduction in the average annual area burned; (2) an advance of 15 days for the fire season peak in 1995-2009, as well as an increase in spring temperatures; (3) an increase in wildfire exposure for WUI areas; (4) strong spatial variations in burn probability, and minor changes in potential fire intensity. The methodology proposed provides a consistent analytical process for quantifying the level of exposure and risk that communities and highly valued resources face from wildland fires, and for planning and managing fuels and landscapes to mitigate potential impacts from fire events.

BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO

Anderson, H.E., 1982 – *Aids to determining fuel models for estimating fire behavior*. General Technical Report INT-122. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 22 p.

Arca B., Duce P., Laconi M., Pellizzaro G., Salis M., Spano D., 2007 – *Evaluation of FARSITE simulator in Mediterranean maquis*. International Journal of Wildland Fire, 16: 563-572.

Arca B., Bacciu V., Pellizzaro G., Salis M., Ventura A., Duce P., Spano D., Brundu G., 2009 – *Fuel model mapping by IKONOS imagery to support spatially explicit fire simulators*. In '7th international workshop on advances in remote sensing and GIS applications in forest fire management towards an operational use of remote sensing in forest fire management.' (Matera, Italy), 4 p.

Boni C., 2004 – *Il fenomeno degli incendi in Sardegna*. In: Atti del Convegno Incendi boschivi e rurali in Sardegna – Dall'analisi delle cause alle proposte di intervento, pp. 9-17. Cagliari, 14-15 May 2004.

Brotans L., Aquilué N., de Cáceres M., Fortin M.-J., Fall A., 2013 – *How Fire History, Fire Suppression Practices and Climate Change Affect Wildfire Regimes in Mediterranean Landscapes*. PLoS ONE, 8(5): e62392. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0062392>

Chessa P.A., Delitala A., 1997 – *Il clima della Sardegna*. In: Collana Note Tecniche di Agrometeorologia per la Sardegna. Ed A Milella.

EEA, 2002 – *Corine land cover update 2000 – Technical guidelines*. European Environment Agency, Technical Report 89. (European Environment Agency: Copenhagen).

Finney M.A., 2002 – *Fire growth using minimum travel time methods*. Canadian Journal of Forest Research, 32: 1420-1424. <http://dx.doi.org/10.1139/x02-068>

Finney M.A., 2006 – *An overview of FlamMap fire modeling capabilities*. In: Fuels Management-How to Measure Success: Conference Proceedings. 28-30 March, Portland, OR. (Comp PL Andrews, BW Butler), USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station Proceedings RMRS-P-41, pp. 213-220

Moreira F., Viedma O., Arianoutsou M., Curt T., Koutsias N., Rigolot E., Barbati A., Corona P.M., Vaz P., Xanthopoulos G., Mouillot F., Bilgili E., 2011 – *Landscape – wildfire interactions in Southern Europe: implications for landscape management*. Journal of Environmental Management, 92: 2389-2402. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.028>

Pellizzaro G., Duce P., Ventura A., Zara P., 2007 – *Seasonal variations of live moisture content and ignitability in shrubs of the Mediterranean Basin*. International Journal of Wildland Fire, 16: 633-641. <http://dx.doi.org/10.1071/WF05088>

Regione Sardegna, 1976 – *Piano Regionale di Difesa Antincendi* (Legge 1-3-1975 n. 47).

Salis M., Ager A.A., Arca B., Finney M.A., Bacciu V., Duce P., Spano D., 2013 – *Assessing exposure of human and ecological values to wildfire in Sardinia, Italy*. International Journal of Wildland Fire, 22 (4), 549-565. <http://dx.doi.org/10.1071/WF11060>

Salis M., Ager A.A., Finney M.A., Arca B., Spano D., 2014 – *Analyzing spatiotemporal changes in wildfire regimes and exposure across a Mediterranean fire-prone area*. Natural Hazards, 71 (3): 1389-1418. <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-013-0951-0>

Scott J.H., Burgan R.E., 2005 – *Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model*. General Technical Re-

port RMRS-GTR-153. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 72 p.
Tutiempo Network S.L., 2012 – *Clima en Italia*.

<http://www.tutiempo.net/clima/Italia/IT.html>
Viegas D.X., 2004 – *High mortality*. *Wildfire*, 13: 22-26.
Xanthopoulos G., 2007 – *Olympic Flames*. *Wildfire*, 16: 10-18. <http://www.sardegnaambiente.it/>