

**IL PERMAFROST IN VENETO: DISTRIBUZIONE,
ANALISI E POSSIBILI EFFETTI AMBIENTALI
PROGETTO PERMANET - PROGRAMMA ALPINE SPACE**

**PERMAFROST IN THE VENETO REGION: DISTRIBUTION,
ANALYSIS AND POTENTIAL ENVIRONMENTAL EFFECTS
PERMANET PROJECT - ALPINE SPACE PROGRAMME**

Regione del Veneto

Presidente della Giunta Regionale

Luca Zaia

Assessore all'Ambiente

Maurizio Conte

Assessore all'Economia e Sviluppo, Ricerca e Innovazione

Marialuisa Coppola

Segreteria Regionale per l'Ambiente

Mariano Carraro

Dirigente Regionale Direzione Geologia e Georisorse

Marco Puiatti

Dirigente Servizio Geologico

Alberto Baglioni

Dirigente Unità di Progetto Cooperazione Transfrontaliera

Anna Flavia Zuccon

Responsabile Programma Interreg Alpine Space

Alvise Rossi

Project Manager Progetto PermaNET

Anna Galuppo

Autori

Andrea Crepaz², Valentina Defendi¹, Simone Frigerio³, Jacopo Gabrieli⁴, Anna Galuppo¹, Laura Magnabosco¹, Matteo Mantovani³, Alessandro Pasuto⁵

Contributi

Alberto Baglioni¹, Marco Baldo³, Carlo Barbante^{4,8}, Anselmo Cagnati², Alberto Carton⁷, Valentina de Toffol⁹, Ivan Frigerio⁶, Maria Angela Fontanive⁹, Mirco Meneghel⁷, Enrico Schiavon¹, Roberto Seppi¹⁰, Simone Sterlacchini⁶, Sebastiano Trevisani¹¹, Walter Steinkogler¹², Mathias Bavay¹², Michael Lehning¹², Lorenz Böckli¹³, Jeannette Nötzli¹³, Stephan Gruber¹³

¹ Regione del Veneto

² ARPAV- DRST, Centro Valanghe di Arabba

³ CNR-IRPI, Padova

⁴ CNR- IDPA, Venezia

⁵ CNR-IRPI, U.O.S. di Torino

⁶ CNR-IDPA Milano

⁷ Dipartimento di Geografia, Università di Padova

⁸ Dipartimento di Scienze Ambientali, Statistica ed Informatica, Università di Venezia

⁹ ARPAV – DAP, Belluno

¹⁰ Università di Pavia

¹¹ IUAV Venezia

¹² WSL – Institute for Snow and Avalanche Research SLF

¹³ Glaciology, Geomorphodynamics & Geochronology Department of Geography University of Zurich

Veneto Region

President of Regional Council

Luca Zaia

Regional Councillor for the Environment

Maurizio Conte

Regional Councillor for the Economy, Development, Research and Innovation

Marialuisa Coppola

Regional Secretariat for the Environment

Mariano Carraro

Geology and Geological Resources Department

Marco Puiatti

Geological Service Department

Alberto Baglioni

Head of Unit of the Trans-border Cooperation Project

Anna Flavia Zuccon

Contact Person for the Interregional Alpine Space Programme

Alvise Rossi

Project Manager of PermaNET Project

Anna Galuppo

Authors

Andrea Crepaz², Valentina Defendi¹, Simone Frigerio³, Jacopo Gabrieli⁴, Anna Galuppo¹, Laura Magnabosco¹, Matteo Mantovani³, Alessandro Pasuto⁵

With the contribution of:

Alberto Baglioni¹, Marco Baldo³, Carlo Barbante^{4,8}, Anselmo Cagnati², Alberto Carton⁷, Valentina de Toffol⁹, Ivan Frigerio⁶, Maria Angela Fontanive⁹, Mirco Meneghel⁷, Enrico Schiavon¹, Roberto Seppi¹⁰, Simone Sterlacchini⁶, Sebastiano Trevisani¹¹, Walter Steinkogler¹², Mathias Bavay¹², Michael Lehning¹², Lorenz Böckli¹³, Jeannette Nötzli¹³, Stephan Gruber¹³

¹ Veneto Region

² ARPAV- DRST, Arabba Avalanche Centre

³ CNR-IRPI, Padua

⁴ CNR- IDPA, Venice

⁵ CNR-IRPI, U.O.S. of Turin

⁶ CNR-IDPA Milan

⁷ Geography Department, University of Padua

⁸ Environmental Science, Statistics and IT Department, University of Venice

⁹ ARPAV – DAP, Belluno

¹⁰ University of Pavia

¹¹ IUAV Venice

¹² WSL – Institute for Snow and Avalanche Research SLF

¹³ Glaciology, Geomorphodynamics & Geochronology Department of Geography University of Zurich

INDICE

TABLE OF CONTENTS

Introduzione

Introduction

1. Il Progetto Permanet

1. *The permanet project*

Gli obiettivi

Objectives

Le attività principali

Main activities

2. Lo stato delle conoscenze

2. *Current knowledge*

Lo stato delle conoscenze sulla distribuzione del permafrost

Current knowledge on the distribution of permafrost

Lo stato delle conoscenze sui fenomeni di dissesto legati al permafrost

Current knowledge on permafrost-related geological instabilities

3. L'area di studio

3. *Area of study*

Inquadramento geografico

Geographical setting

Inquadramento geologico e geomorfologico

Geographical and geomorphological setting

4. La rete di monitoraggio del Permafrost

4. *Permafrost monitoring network*

5. Permafrost e cambiamenti climatici

5. *Permafrost and climate change*

Catasto dei rock glaciers e database delle evidenze del permafrost

Rock glacier register and database of permafrost occurrences

Mappatura del permafrost:

Carta regionale del permafrost potenziale: modello idrometeorologico

Carta regionale del permafrost potenziale: modello statistico

Permafrost mapping:

Regional map of potential permafrost: hydro-meteorological model

Regional map of potential permafrost: statistical model

-
6. Rischi naturali e Permafrost
 6. *Permafrost and natural dangers*
 - Metodi di indagine
 - Research methods*
 - Fotointerpretazione
 - Photo-interpretation*
 - Interferometria differenziale
 - Differential interferometry*
 - Laser scanner
 - Laser scanner*
 - Mappatura dei fenomeni di dissesto
 - Mapping of instabilities*
 - Inventario delle frane
 - List of landslides*
 - Analisi di suscettibilità
 - Susceptibility analysis*
 7. Sito di studio: il Piz Boè
 7. *Research area: the Piz Boè*
 - La stazione del Piz Boè:
 - The Piz Boè station:*
 - I primi risultati
 - First outcomes*
 - Le misure geofisiche
 - Geophysical data*
 - Rilievo Lidar
 - Lidar Survey*
 - Indagini idrologiche e idrochimiche
 - Hydrological and hydrochemical research*
 8. Conclusioni
 8. *Conclusions*
 9. Bibliografia
 9. *Bibliography*

Introduzione

Introduction

Il clima terrestre si sta modificando non solo per cause naturali, ma soprattutto per cause antropiche, i relativi effetti negativi di ciò costituiscono un motivo di preoccupazione per il genere umano.

La terza conferenza europea, tenutasi nel giugno 2010 alle Isole Svalbard (Norvegia), è stata dedicata ad un tema molto importante, ma per certi versi ancora da esplorare: l'effetto dei cambiamenti climatici sul permafrost.

Si definisce permafrost la porzione di terreno che per almeno due anni consecutivi presenta una temperatura media annua inferiore a 0°C; può comprendere rocce, detrito, sedimento o materiale organico e a volte ghiaccio. La parte più prossima alla superficie costituisce lo "strato attivo" dove avviene lo scioglimento legato alla stagionalità dei climi.

Le caratteristiche del permafrost variano sensibilmente in relazione alle peculiarità geografiche e climatiche in cui si collocano le aree interessate dal fenomeno; tuttavia, la connotazione saliente rimane la funzione di legante esercitata dall'acqua allo stato solido presente negli interstizi tra i materiali presenti.

Il permafrost, nelle regioni artiche o subartiche, è caratterizzato da spessori considerevoli (anche fino a 1.500 metri) e da un'estensione areale notevole, al contrario, si presenta molto frammentato e con spessori ridotti in quelle zone che, collocandosi a latitudini più basse, presentano le condizioni climatiche adatte soltanto a causa della quota. Questa seconda tipologia si riscontra sulle Alpi dove, più ancora che in altre situazioni simili, si presenta accentuata la frammentarietà e la variabilità di condizione proprio in ragione tanto dello spiccato dinamismo morfologico caratterizzante la catena, quanto del regime climatico presente.

Se la definizione di permafrost appare consolidata ed adeguatamente espressa, altrettanto non

The climate on Earth is constantly modifying and this is due not only to natural but also to anthropic factors. The negative effects of climate change are undoubtedly a cause of concern for the international community.

The third European Conference, held at Svalbard Islands (Norway) in June 2010, focused on a very important and yet unexplored subject: the effect of climate change on permafrost.

Permafrost is a portion of land that features an average annual temperature of 0°C for at least two consecutive years; it can be made of rocks, debris, sediment, organic material and sometimes ice. The "active layer" is its more superficial area, and this is where the melting process occurs as a consequence of weather conditions.

Permafrost changes considerably according to the geographical and climate conditions of the affected areas; however, its main feature is always solid water acting as a link in the gaps among the various materials.

In arctic and subarctic regions, permafrost is particularly thick (up to 1,500 meters) and stretches through pretty extended area whereas, due to the weather conditions, the areas of low altitude feature a very fragmented and thin permafrost. An example of this is the Alpine region, where the variable and fragmented nature of permafrost is particularly evident because of the morphological dynamism that characterises this mountain range, as well as the local weather conditions.

If the definition of permafrost appears quite clear and consolidated, the same does not apply to the knowledge of its distribution and the evolution patterns on the areas it affects. In the Alpine region, permafrost can be found at altitudes over 2,600 meters a.s.l., but its distribution patterns, its recent depth and width

si può dire delle conoscenze relative alla sua distribuzione e alle dinamiche di evoluzione che i terreni interessati da permafrost subiscono. Nel particolare caso delle Alpi il permafrost si trova a partire da quote di circa 2.600 metri s.l.m., ma vi sono limitate informazioni sulla sua distribuzione, sulle variazioni recenti di spessore ed estensione e, conseguentemente, sul suo contributo a titolo di riserva idrica.

La necessità di acquisire dati ed elaborare modelli deriva soprattutto dalla considerazione che il permafrost, proprio per il ruolo chiave giocato dall'acqua, si rivela estremamente sensibile alle variazioni climatiche che possono indurre variazioni di spessore ed estensione degli strati interessati. Tali variazioni possono generare fenomeni di diverso genere in rapporto alla tipologia di territorio interessato; alle alte latitudini alcuni studi ipotizzano l'aumento dell'effetto serra a causa dello scioglimento del permafrost con rilascio in atmosfera di metano, altri prevedono l'arresto della corrente del Golfo a causa dell'apporto, nei mari artici, delle acque di fusione del permafrost. Nel caso della catena alpina, si evidenziano le possibili conseguenze sulle dinamiche gravitative e più in generale sulla stabilità dei versanti.

Infatti, il cambiamento delle caratteristiche geotecniche dei terreni, interessati dal passaggio allo stato liquido dell'acqua interstiziale, può generare instabilità di masse anche rilevanti specialmente se si considera la possibile combinazione con altre conseguenze del riscaldamento come l'aumento della piovosità e lo scioglimento dei ghiacciai.

In tale contesto si colloca il Progetto PermaNET, cofinanziato dal Fondo Europeo per lo Sviluppo Regionale e parte del programma di cooperazione territoriale transnazionale "Spazio Alpino" 2007-2013. Il Progetto è nato proprio dall'esigenza di monitorare attentamente il permafrost alpino, con l'obiettivo principale di creare una rete transnazionale per il monitoraggio lungo tutto l'arco alpino.

A tale progetto la Regione Veneto, in qualità di partner, ha partecipato ritenendo lo studio del permafrost e delle problematiche ad esso connesse di vitale importanza per la fruibilità e la gestione dell'ambiente montano. Infatti, attraverso la caratterizzazione ed il rilevamento della distribuzione del permafrost in area montana, si può arrivare ad evidenziarne gli aspetti che lega-

variations and, consequently, its potential contribution to water supply are still unknown.

The collection of data and the elaboration of models are particularly relevant in view of the fact that permafrost, due to the key role played by water, is extremely sensible to climate change, which may lead to considerable variations in the depth and width of its layers. Such variations may cause different reactions according to the type of land: some researchers point out that at higher altitudes the greenhouse effect may increase as a result of the permafrost melting and releasing methane into the atmosphere; some others forecast the interruption of the Gulf Stream as a result of the permafrost meltwaters flowing into the arctic seas. In the context of the Alpine range, the main effects are linked to variations of gravity movements and, more in general, of the stability of the slopes.

This is because the variations of the geotechnical features of the land affected by the passage of meltwaters may lead to considerable instabilities, especially if combined with other effects of the global warming such as the increase of rainfall and the melting of glaciers.

This is the research area where PermaNET Project has been conceived, also thanks to the funds allocated by the European Fund for Regional Development. The project is part of the 2007-2013 Alpine Space Transnational Cooperation Programme, and it originates from the need to focus special attention on the Alpine permafrost, with the aim of creating a transnational network for monitoring its evolution throughout the whole Alpine region.

The Veneto Region was involved in this project as a partner, recognising the crucial role that permafrost and its related issues play for the management and viability of the mountain environment. The characterisation and the analysis of the evolution of permafrost in mountain areas can in fact help highlighting its connection with climate change, elaborating its future evolution patterns and its impact on land and resources. The study of these aspects has therefore led to a better knowledge of the mountain areas planning methods, with the aim of identifying and preventing dangers, thus ensuring better safety of the area, also from the point of view of tourist facilities.

no la sua evoluzione al cambiamento climatico ed elaborare scenari evolutivi ed impatti sul territorio e sulle sue risorse. Studiare questi aspetti ha significato dunque accrescere la conoscenza finalizzata alla pianificazione del territorio montano, con lo scopo di individuare le situazioni a rischio e di prevenirle, rendendo così più sicuro lo stesso territorio, anche sotto l'aspetto della fruibilità turistica.

La diffusione delle conoscenze sul permafrost, attraverso la realizzazione di questo libro, ha la presunzione di aiutare non solo a sensibilizzare i cittadini riguardo queste problematiche, ma anche fornire agli amministratori locali delle linee guida per lo sviluppo di una strategia comune di gestione ed intervento.

This book is aimed at sharing the available knowledge on permafrost in order to raise public awareness on these issues and to provide some guidelines to the local administrations to help them develop a common management and intervention strategy.

1. Il Progetto PermaNET

The PermaNET Project

GLI OBIETTIVI

L'obiettivo generale del Progetto PermaNET (*Permafrost Long-term Monitoring Network*), inserito nel Programma di Cooperazione Transnazionale Spazio Alpino 2007-2013, è stato quello di contribuire allo sviluppo sostenibile del territorio ed all'implementazione di buone pratiche di governo, nelle aree montane dello Spazio Alpino interessate da permafrost. Il permafrost e le sue possibili variazioni a seguito dei cambiamenti climatici sono tematiche di grande attualità ed interesse, non soltanto per la comunità scientifica internazionale, ma anche per coloro che si occupano del governo del territorio e che operano nel settore della gestione del rischio. Negli Stati Uniti, per esempio, esiste un programma di ricerca sul cambiamento globale (*global change*), che ha posto fra le questioni politicamente più rilevanti l'indagine sulla risposta al riscaldamento globale delle aree a permafrost dell'Emisfero Settentrionale.

È facile comprendere come per affrontare, gestire e mitigare i rischi naturali connessi alla degradazione del permafrost montano, sia necessario aumentare le nostre conoscenze sulla distribuzione spaziale del permafrost. In questo contesto, spesso caratterizzato dalla disponibilità di dati insufficienti o, comunque, disomogenei da un punto di vista spaziale, il Progetto PermaNET ha dato un contributo determinante, raggiungendo i propri obiettivi attraverso la creazione di una rete di monitoraggio del permafrost lungo l'arco alpino e la proposta di una strategia comune, per affrontare i rischi naturali derivanti dal permafrost, con particolare attenzione per i possibili effetti, indotti dai cambiamenti climatici (Mair et al., 2011). Grazie all'applicazione di metodi di indagine all'avanguardia, è stato possibile ricavare, per l'intero arco alpino, una mappa di distribuzione del permafrost, che rappresenta lo strumento di base per fornire agli amministratori a livello loca-

OBJECTIVES

The main purpose of the PermaNET Project (Permafrost Long-term Monitoring Network), part of the 2007-2013 Alpine Space Transnational Cooperation Programme, is that of contributing to the sustainable development of the territory and to the implementation of good governmental practices in the mountain areas of the Alpine Space that contain permafrost. The topic of permafrost and its variations resulting from climate change is extremely interesting and important at the present day, not just for the international community but also for the people in charge of local government and risk management policies. The United States, for instance, have created a research programme on global change that focuses on the political relevance of the research on the global warming affecting the permafrost areas of the Northern Hemisphere.

It is easy to see how the natural dangers resulting from the degradation of mountain permafrost can be dealt with, managed and mitigated only by improving our knowledge of the spatial distribution of permafrost. In a context that is often characterized by the lack of information or by the lack of spatial homogeneity in the available data, the PermaNET Project has played a fundamental role. One of its first targets was the creation of a permafrost monitoring network in the Alpine area, followed by a proposal to draw a common strategy to face the natural dangers arising from permafrost, focusing particularly on the effects of climate change (Mair et al., 2011). Thanks to the use of cutting edge research methods, a map of the distribution of permafrost in the Alpine area has been drawn up. This map gives local, regional and national administrators a series of guidelines that allow them to sustainably manage the natural

le, regionale e nazionale delle linee guida, che consentano di gestire, in modo sostenibile, i rischi naturali associati al permafrost e di implementare strategie di adattamento ai cambiamenti climatici nei territori dello Spazio Alpino.

LE ATTIVITÀ PRINCIPALI

Il progetto, partito a luglio 2008 e conclusosi a settembre 2011, ha coinvolto 14 partner, di cui 5 italiani e 9 stranieri. Oltre alla Provincia Autonoma di Bolzano, capofila di progetto, le altre istituzioni italiane coinvolte sono state: l'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale del Piemonte, la Regione Autonoma Valle d'Aosta, la Regione del Veneto e la Provincia Autonoma di Trento. I partner stranieri, provenienti da Austria, Germania, Svizzera e Francia, sono stati: l'Agenzia per l'Ambiente della Baviera, il Ministero Federale Austriaco dell'Agricoltura, delle Foreste, dell'Ambiente e della Gestione dell'Acqua, l'Università di Innsbruck, l'Università di Graz, l'Istituto Centrale per la Meteorologia e la Geodinamica – Ufficio Regionale per Salisburgo e l'Oberösterreich, l'Università Joseph Fourier di Grenoble, il Centro Nazionale per la Ricerca Scientifica – Laboratorio EDYTEM di Grenoble, l'Istituto di Tecnologia di Grenoble e l'Ufficio Federale Svizzero per l'Ambiente. Inoltre, sono stati coinvolti numerosi osservatori e *stakeholders*, fra cui organizzazioni non governative, enti di ricerca, enti/istituzioni regionali e nazionali, operatori del settore turistico (gestori di comprensori sciistici ed impianti di risalita, associazioni di guide alpine, ecc.), che hanno contribuito alla costruzione di un approccio interdisciplinare ed al raggiungimento degli obiettivi del progetto.

Le attività svolte sono state suddivise in sette *work package* (WP), di cui i primi due dedicati alla preparazione ("*Project Preparation*") e gestione ("*Project Management*") del progetto. Questi primi due WP di tipo amministrativo, insieme al terzo ("*Information & publicity*"), relativo alla diffusione dei risultati e dei prodotti del progetto, hanno svolto una funzione di supporto per i successivi quattro WP a carattere tecnico. Il primo WP tecnico (WP4 - "*Permafrost monitoring network*") comprende quattro azioni: la raccolta e standardizzazione delle informazioni sulle attività di monitoraggio del permafrost già esistenti lungo l'arco

dangers associated with permafrost and to implement adequate strategies to face climate change in the Alpine Space.

MAIN ACTIVITIES

The project ran from July 2008 to September 2011, and it involved 14 partners, of which 5 were Italian and 9 were foreign. Along with the Autonomous Province of Bolzano, leader of the project, the following Italian institutions were involved: the Regional Agency for Environmental Protection of Piedmont, the Autonomous Region of Valle d'Aosta, the Veneto Region and the Autonomous Province of Trento. The foreign partners involved in the project, from Austria, Germany, Switzerland and France were: the Bavarian Environmental Agency, the Austrian Federal Ministry of Agriculture, Forestry and Water Management, Innsbruck University, Graz University, the Central Institute of Meteorology and Geodynamics – Regional Office for Salzburg and Oberösterreich, Joseph Fourier University of Grenoble, the National Centre for Scientific Research – Laboratory EDYTEM of Grenoble, Grenoble Institute of Technology and the Swiss Federal Office for the Environment. In addition, several observatories and stakeholders have been involved, such as non governmental organizations, research institutions, regional and national institutions, tour operators (ski resorts managers, associations of Alpine guides, etc.) that helped creating a cross-discipline approach and reaching the targets of the project.

*The activities of the project were divided into seven work packages (WP), of which the first two dealt with its preparation ("*Project Preparation*") and management ("*Project Management*"). The first two administrative WPs, together with the third one ("*Information & publicity*"), aimed at spreading the results and the products of the project, and had the function of supporting the following four technical WPs. The first technical WP (WP4 - "*Permafrost monitoring network*") features four actions: the collection and standardisation of the existing information on permafrost monitoring in the Alpine area; the creation of a permafrost monitoring network in the Alpine Space; the installation of key monitoring sites in*

alpino; la creazione di una rete di monitoraggio del permafrost nello Spazio Alpino; l'installazione di siti chiave di monitoraggio del permafrost nello Spazio Alpino; la stesura di un manuale per l'installazione ed il mantenimento di una rete di monitoraggio del permafrost lungo l'arco alpino, basata su opportuni standard. La raccolta dei dati sul permafrost ha consentito di colmare le lacune esistenti e ha fornito un valido supporto per la costituzione della rete di monitoraggio, che è andata ad integrare le stazioni già presenti, attraverso la creazione di nuovi siti di monitoraggio.

Le azioni del quinto WP (WP5 - "*Permafrost and climate change*") si sono, invece, focalizzate sull'indagine della distribuzione del permafrost nello Spazio Alpino. Le azioni previste comprendevano: la compilazione di un inventario delle evidenze della presenza di permafrost; l'elaborazione di una mappa di distribuzione del permafrost, estesa a tutto l'arco alpino; l'analisi, attraverso casi studio nello Spazio Alpino, della risposta termica e dinamica del permafrost ai cambiamenti climatici attuali e futuri nelle Alpi; e la stesura di un manuale sulle metodologie e tecniche per individuare e mappare il permafrost. La creazione della mappa di distribuzione del permafrost ha fornito un importante strumento di partenza per valutare l'impatto dei cambiamenti climatici sullo "stato di salute" del permafrost.

Il principale obiettivo del WP6 ("*Related natural hazards*") è stato la definizione di strategie per affrontare i rischi naturali, che potrebbero derivare da fenomeni di degradazione del permafrost, dovuti alla variazione dei fattori climatici. Le azioni individuate sono state finalizzate, rispettivamente, alla sperimentazione, in aree test, potenzialmente soggette a permafrost, di metodi di indagine idonei all'identificazione ed al monitoraggio dei movimenti di versante; alla stesura di un rapporto sullo stato dell'arte degli approcci per la valutazione dei rischi naturali, derivanti dalla fusione del permafrost e; all'elaborazione di raccomandazioni per la gestione del rischio, associato alla degradazione del permafrost.

L'ultimo WP tecnico (WP7 - "*Water resources*") è stato, invece, dedicato ad una tematica, su cui non sono disponibili molte informazioni, cioè la valutazione delle potenzialità delle acque di fusione del permafrost come risorse idriche ad uso potabile. In particolare, lo scopo principale era quello di elaborare delle raccomandazioni, destinate alle agenzie regionali per l'ambiente, sulle migliori

the Alpine Space; the creation of an installation and maintenance manual for the permafrost monitoring network in the Alpine area on the basis of the relevant standards. The data collected on permafrost allowed to fill the existing gaps and provided a valid support for the creation of a monitoring network, which integrated the previous stations through the installation of new monitoring sites.

The fifth WP (WP5 - "Permafrost and climate change") was focused on the research of the distribution of permafrost in the Alpine Space. It featured the following actions: the creation of a list of signs of the presence of permafrost; the creation of a map of the distribution of permafrost covering the whole Alpine area; the case study analysis of the dynamic and thermal reaction of permafrost to the present and future climate changes in the Alps; the drawing up of a manual of methods and techniques for the detection and mapping of permafrost. The creation of a map of the distribution of permafrost was an important starting point for the evaluation of the effects of climate changes on the condition of permafrost.

WP6 ("Related natural hazards") was mainly aimed at finding strategies against natural dangers that may arise from permafrost degradation, especially as a result of climate variations. The above actions were respectively focused on the experimenting, on certain test areas that may be affected by permafrost, of research methods that may help identifying and monitoring the slope movements; on the drawing up of a report on the state of the art of the evaluation approaches of natural dangers arising from permafrost melting and; on the elaboration of recommendations for the management of risk associated with permafrost.

The last technical WP (WP7 - "Water resources") was focused on quite an unknown subject such as the evaluation of the potential of permafrost meltwaters as drinkable water supplies. In particular, the main purpose was the elaboration of recommendations for the regional environmental agencies on the best methods of analysing the quality of these waters, especially with regard to the identification of any heavy metals. These recommendations originated from the results of geochemical analysis that were made on ice and water samples taken in permafrost

tecniche di analisi della qualità di queste acque, specialmente per quanto concerne la determinazione della presenza di metalli pesanti. Queste raccomandazioni sono state derivate dai risultati delle analisi geochimiche, effettuate su campioni di acqua e ghiaccio, prelevati in aree test a permafrost, e delle simulazioni modellistiche, eseguite per valutare gli effetti sul regime idrologico della fusione del permafrost.

Per una descrizione più estesa delle attività complessive del progetto si può fare riferimento al rapporto di sintesi (Mair et al., 2011), presentato nel corso della conferenza finale del Progetto PermaNET, svoltasi dal 28 giugno al 1 luglio 2011 a Chamonix in Francia.

La Regione del Veneto ha partecipato al Progetto PermaNET attraverso il Servizio Geologico della Direzione Geologia e Georisorse. Le attività di progetto sono state concentrate nell'area di studio della provincia di Belluno, in cui, rispetto al resto del territorio regionale, la presenza di permafrost era maggiormente probabile, come evidenziato da uno studio precedente sull'individuazione delle potenziali aree a permafrost nel bacino del Torrente Cordevole (Cagnati et al., 2006).

Nell'ambito di PermaNET la Regione del Veneto ha fornito il proprio supporto al capofila nella gestione nazionale e transnazionale del progetto ed ha contribuito al conseguimento dei risultati scientifici, previsti nei quattro *work package* tecnici.

Le attività a carattere tecnico sono state svolte, avvalendosi della consulenza di tre esperti esterni: il Dipartimento Regionale per la Sicurezza del Territorio - Centro Valanghe di Arabba dell'Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto (ARPAV); l'Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-IRPI sede di Padova); l'Istituto per la Dinamica dei Processi Ambientali del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-IDPA sede di Venezia). Nell'ambito della costituzione della rete di monitoraggio del permafrost nello Spazio Alpino (WP4), è stata installata, ad una quota di 2.950 metri, una centralina sul Piz Boè, la vetta più elevata (3.152 metri) del Gruppo del Sella, situata al confine fra la Provincia Autonoma di Trento, la Provincia Autonoma di Bolzano e la Provincia di Belluno. L'area del Piz Boè è stata, inoltre, oggetto di uno studio di dettaglio, attraverso l'applicazione di diverse metodologie di

test areas and those of simulations aimed at evaluating the effects of the melting of permafrost on the hydrological regime.

For a more detailed description of the activities of the project, please see the summary report (Mair et al., 2011) presented during the final conference of PermaNET Project, which took place in Chamonix, France, from the 28th of June to the 1st of July, 2011.

The Veneto Region took part to the PermaNET Project through the Geological Service of the Department of Geology and Geological Resources. The activities of the project have been implemented in the area of study of the Province of Belluno, where permafrost was likely to be present to a higher degree than in the rest of its territory, as highlighted by a past study on the detection of potential permafrost areas in the basin of Torrent Cordevole (Cagnati et al., 2006).

Veneto Region supported the leader of the PermaNET Project by collaborating to its national and transnational management, and it helped reach the scientific results defined in the four technical work packages.

The technical activities have been carried out thanks to the support of three external experts: the Regional Department for the Safety of the Territory - the Avalanche Centre of the Regional Agency for Environmental Prevention and Protection of Veneto (ARPAV); the Research Institute for the Hydrogeological Protection of the National Committee of Research (CNR-IRPI, Padua headquarters); the Institute of the Dynamics of Environmental Processes of the National Committee of Research (CNR-IDPA, Venice headquarters). During the creation of a permafrost monitoring network in the Alpine Area (WP4), a local plant has been installed at an altitude of 2,950 meters on the Piz Boè, the highest peak (3,152 meters) of the Sella Mountain Group, located at the border between the Autonomous Province of Trento, the Autonomous Province of Bolzano and the Province of Belluno. Furthermore, the Piz Boè area has been studied in detail through the application of different cutting edge research methods, such as the laser scanner and radar interferometry. With regard to the actions dealing with the permafrost distribution mapping (WP5), a register of rock glaciers has

indagine all'avanguardia, tra cui il laser scanner e l'interferometria radar. Per quanto concerne le azioni volte alla mappatura della distribuzione del permafrost (WP5), è stato compilato il catasto dei *rock glaciers* ("ghiacciai di roccia"), considerati un'evidenza indiretta della presenza di permafrost, e sono state elaborate, sulla base di due diversi modelli, due carte del permafrost, commissionate, l'una, all'Università di Zurigo e, l'altra, all'Istituto Federale Svizzero per lo Studio della Neve e delle Valanghe. Le due mappe rappresentano uno strumento di base fondamentale, per valutare gli effetti dei cambiamenti climatici sulle variazioni della distribuzione spaziale del permafrost.

Nell'ambito delle attività finalizzate alla valutazione dei rischi naturali, potenzialmente connessi alla fusione del permafrost (WP6), è stata elaborata una carta inventario dei fenomeni franosi per l'intera provincia di Belluno al di sopra dei 2000 m di quota, individuando i movimenti di versante mediante fotointerpretazione e l'applicazione del metodo interferometrico all'analisi di immagini radar da satellite. Sono state, inoltre, eseguite misure per mezzo del laser scanner terrestre, per valutare eventuali deformazioni superficiali del *rock glacier* nei pressi della stazione del Piz Boè. È stata elaborata una mappa di suscettibilità in funzione della predisposizione al dissesto del territorio con lo scopo di individuare le eventuali connessioni con i processi di degradazione del permafrost.

Per quanto riguarda le azioni di progetto finalizzate alla raccolta di informazioni sulla qualità delle acque di fusione del permafrost e sulla loro potenzialità come risorse idriche, è stata effettuata una caratterizzazione geochemica delle acque superficiali e meteoriche presso l'area del *rock glacier* del Piz Boè. Inoltre, è stato realizzato un monitoraggio della temperatura e della portata del Lech Dlacè (Lago Gelato), cioè il piccolo laghetto alpino, posizionato a valle del *rock glacier*, al fine di verificare l'ipotesi che il laghetto sia in parte alimentato dall'area soggetta a permafrost.

La Regione del Veneto ha, inoltre, contribuito alle azioni di informazione e pubblicità previste dal progetto, realizzando un *toolkit* educativo per le scuole, rivolto a studenti di età compresa fra i 10 ed i 18 anni e finalizzato, attraverso una sorta di percorso di apprendimento, alla comprensione del fenomeno del permafrost, dei processi ad esso connessi e dei possibili effetti derivanti dai cambiamenti climatici.

been created. Rock glaciers are considered an indirect indicator of the presence of permafrost and, on the basis of two different models, two permafrost maps have been drawn up: one has been commissioned to the University of Zurich, and the other one to the Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research. These two maps are a very important tool for the evaluation of the effects of climate change on the spatial variations of permafrost.

With regard to the activities dealing with the evaluation of natural dangers that are potentially connected with the melting of the permafrost (WP6), a map has been created of the landslides of the areas of the Province of Belluno with an altitude of more than 2000 m, also detecting the slope movements through the use of photointerpretation and the application of the interferometric method to the analysis of satellite radar images. In addition, the terrestrial laser scanner has been used to take further measurements aimed at determining any superficial deformations of the Piz Boè rock glacier. A susceptibility map has also been drawn up in order to evaluate the territory's predisposition to instability, with the aim of finding its potential connection with the permafrost degradation processes.

With regard to the actions that dealt with collecting information on the quality of permafrost meltwaters and on their potential as water supplies, a geochemical characterization of the meteoric and surface waters of the Piz Boè rock glacier has been carried out. Furthermore, the temperature and the volume of Lech Dlacè (Frozen Lake), a small alpine lake located downstream of the rock glacier, have been monitored with the aim of evaluating whether the lake is partly fed by the neighbouring permafrost.

In addition, the Veneto Region has taken part in the promotion and information activities of the project through the creation of an educational toolkit for school students between the age of 10 and 18 that aimed, through a learning process, at explaining them the permafrost phenomenon as well as its connected processes and the potential effects of climate change.

2. Lo stato delle conoscenze

Current knowledge

LO STATO DELLE CONOSCENZE SULLA DISTRIBUZIONE DEL PERMAFROST

Lo studio degli ambienti periglaciali in ambito alpino è iniziato attorno agli anni '30, ma solamente negli anni '80 e poi negli anni '90 si è sviluppato in ambito italiano grazie soprattutto a Guglielmin e Smiraglia, con particolare attenzione al settore alpino centro occidentale, caratterizzato da altitudini più elevate e da una criosfera molto più estesa. Per quanto riguarda l'ambiente alpino orientale ed in particolare quello veneto, gli studi sono stati poco numerosi.

Uno dei rari riferimenti espliciti al permafrost, si ha nello studio sui suoli poligonali attorno al Massiccio del Sella effettuato da Nangeroni (1938). Successivi studi individuano, senza una trattazione organica dell'argomento, la sporadica presenza dei rock glaciers, che rappresentano una chiara evidenza indiretta del permafrost. Si ritiene infatti che la principale genesi degli stessi sia dovuta a deformazione per creep da permafrost.

Nel 1960 Bianchi, Castiglioni cartografano, pur riconoscendolo, il rock glacier di Val Tegosa, come cordone morenico. Il maggior impulso allo studio del permafrost in ambiente veneto si può attribuire soprattutto ai lavori di Carton (1988 e 1998).

Successivamente ad un evento di colata detritica avvenuto nel Settembre del 1994, lungo la Val d'Arcia, alle pendici del Pelmo, è affiorato del ghiaccio sepolto, che è stato indagato da Del Longo e alii (2001) con rilievi georadar e misure di resistività.

Più recentemente, attorno al 2004 e 2005, ARPAV ha deciso di occuparsi più approfonditamente degli ambienti periglaciali, con un progetto a livello regionale sul monitoraggio del permafrost. In particolare è stato realizzato un catasto dei rock glaciers ricadenti nel bacino del Cordevole;

CURRENT KNOWLEDGE ON THE DISTRIBUTION OF PERMAFROST

Studies of periglacial sites in Alpine research began in the 1930's, but only developed in the 1980's and 90's thanks to the work of Guglielmin and Smiraglia, particularly on the centre-westerly Alpine sector, which features higher altitudes and a more intense criosphere. The centre-oriental sector, particularly the area that falls into the Veneto region, has been the subject of fewer studies.

A rare explicit mention of permafrost is recorded in the research on polygonal grounds around the Sella mountain, undertaken by Nangeroni in 1938. Later studies demonstrated the occasional presence of rock glaciers without further researching the topic. However, they represent clear indirect evidence of the presence of permafrost, as it is generally recognised that their origin is caused by deformation through permafrost creep.

Even though they recognised it, in 1960 Bianchi and Castiglioni classified the rock glacier in Val Tegosa on a map as a morenic formation. The most significant development in the study of permafrost is in the works of Carton (1988 and 1998).

After an important debris flow in the Val d'Arcia, at the bottom of the Pelmo in September 1994, some buried ice resurfaced, which was researched by Del Longo et al. (2001) with georadar and resistivity tests. More recently, around 2004 and 2005, ARPAV took a keener interest in periglacial environments starting a regional research project on permafrost monitoring. More significantly, every rock glacier in the Cordevole basin was listed; a measuring campaign was put in place underneath the peak of the Piz Boè, consisting in GPS topographic research and

è stata programmata una campagna di misure nella zona antistante la cima del Piz Boè, consistente in un rilievo topografico effettuato con il GPS e in rilievi geofisici (rilievo sismico e geoelettrico), su una sezione del debris covered glacier (ghiaccio sepolto che non ha ancora assunto del tutto i connotati di rock glacier), che aveva rilevato la probabile presenza di ghiaccio sepolto al di sotto dei detriti. Nell'ambito dello stesso progetto è stata commissionata a WSL Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research SLF di Davos la realizzazione, mediante il modello Alpine 3D, di una simulazione sulla possibile presenza di permafrost nel bacino del Cordevole con lo scopo di stabilire la distribuzione potenziale del permafrost nei precedenti 15 anni. Il modello ha individuato zone a permafrost probabile e possibile. Negli anni considerati nell'elaborazione relativa al bacino del Cordevole (area complessiva di 1652 km²), solamente 4.72 km² hanno dimostrato di essere probabilmente interessati da permafrost, mentre ben 27 km² sono risultati con permafrost possibile. Il modello ha riconosciuto come fondamentale per la distribuzione del permafrost il riscaldamento avvenuto nell'estate 2003, ipotizzando una rapida diminuzione della sua superficie in caso di mantenimento delle condizioni verificatesi in quell'anno.

Più recentemente è stato effettuato uno studio sul rock glacier dolomitico della Croda Rossa (Krainer, 2010), che però si trova al di fuori del confine veneto.

LO STATO DELLE CONOSCENZE SUI FENOMENI DI DISSESTO LEGATI AL PERMAFROST

Permafrost can influence debris flow activity in terms of sediment availability, runoff (frozen ground), subsurface water pockets, pore pressure, thickness of active layer, impermeable layers (by subsurface ice), infiltration and over steepened debris slopes (permafrost thawing).

In the Dolomites debris flows phenomena generally take place during summer season in coincidence with heavy and short duration rains. These rains are often due to very localized stormy cells that can cause different amount of precipitation in relation with orographic constraints.

The Pelmo event was triggered by intense rain-

geophysical research (seismic and geoelectric), on a section of the debris covered glacier that manifested a possible presence of buried ice. As a part of the same project, the WSL Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research SLF, was commissioned to make a simulation, through the Alpine 3D model, to map the possible presence of permafrost and its distribution in the Cordevole basin in the previous 15 years.

The model showed areas of probable or possible permafrost presence. In the said time window, in the Cordevole basin (an area of 1652 km²), only 4.72 km² have shown the probability of containing permafrost, whereas 27 km² contain possible presence. The model indicated the hot 2003 summer season as a fundamental element affecting the distribution of permafrost, predicting that its surface would quickly decrease should the conditions of that particular season present themselves again.

More recently, a research was carried out on the Croda Rossa rock glacier in the Dolomites (Krainer, 2010), which is positioned outside of the Veneto region border.

CURRENT KNOWLEDGE ON PERMAFROST/ RELATED GEOLOGICAL INSTABILITIES

Permafrost can influence debris flow activity in terms of sediment availability, runoff (frozen ground), subsurface water pockets, pore pressure, thickness of active layer, impermeable layers (by subsurface ice), infiltration and over steepened debris slopes (permafrost thawing).

In the Dolomites, debris flows phenomena generally take place during summer season in coincidence with heavy and short duration rains. These rains are often due to very localized stormy cells that can cause different amounts of precipitation in relation with orographic constraints.

The Pelmo event was triggered by intense rainfall (more than 115 mm in two days) and high temperature. As for short-term rainfall, 10 mm in 15 minutes were recorded just before the event. The mobilized volume was estimated at about 200000 m³, the materials moved for about 1650 m and reached the SS 251 connecting Zoldo and Fiorentina Valleys.

With regard to the role of the temperature as

fall (more than 115 mm in two days) and high temperature. As for short term rainfall 10 mm in 15 minutes were recorded just before the event. The mobilized volume was estimated in about 200000 m³, the materials moved for about 1650 m and reached the SS 251 connecting Zoldo and Fiorentina Valleys.

As concerning the role of the temperature as triggering processes this is not easy to define. An analysis of the variations of the monthly average temperature in 1994, in comparison with the average monthly values of the previous decade, related to a nearby meteorological station, highlighted an increase in the summer temperatures in this area. So an influence of the permafrost melting in the triggering process can be supposed although not confirmed by direct measurements. Further geophysical investigation led some researchers to conclude that this is not a rock glacier. Therefore we can suppose that the presence of buried ice close to melting temperature keeps the debris in a quasi-saturated condition, in other words, make the debris cover prone to flow even if not heavy precipitations occur. Anyway this aspect can be a topic to investigate in detail in the future by means of instrumentation and field survey.

The description of this phenomenon are mostly derived by Del Longo et al. 2001.

triggering processes, this is not easy to define. An analysis of the variations of the monthly average temperature in 1994, in comparison with the average monthly values of the previous decade, related to a nearby meteorological station, highlighted an increase in the summer temperatures in this area. Therefore, an influence of the permafrost melting in the triggering process can be supposed although not confirmed by direct measurements. Further geophysical investigation led some researchers to conclude that this is not a rock glacier. We can therefore suppose that the presence of buried ice close to melting temperature keeps the debris in a quasi-saturated condition, in other words, make the debris cover prone to flow even if no heavy precipitations occur. In any event, this aspect can be a topic to investigate in detail in the future by means of instrumentation and field survey. The descriptions of this phenomenon are mostly derived by Del Longo et al. 2001.

3. L'area di studio

Area of study

INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DELL'AREA DI STUDIO

La Provincia di Belluno confina a nord con l'Austria (Tirolo e Carinzia), a est con il Friuli-Venezia Giulia (Province di Udine e Pordenone), a sud con le Province di Treviso e Vicenza, a ovest con le Province Autonome di Trento e Bolzano. È la provincia più estesa del Veneto con i suoi 3.678 km², in gran parte montuosi, suddivisi nelle seguenti regioni geografiche: Cadore, Feltrino, Alpago, Val di Zoldo, Agordino, Comelico, Ampezzano, Valbelluna.

Il corso d'acqua principale è il fiume Piave, il cui bacino pari a circa 3.505 km², occupa quasi per intero il territorio provinciale. Il Piave nasce alle pendici meridionali del gruppo del Peralba (2.694 m) e taglia la provincia di Belluno in direzione NE-SO. Il suo maggiore affluente è il Cordevole, il cui bacino idrografico si estende quasi completamente nell'agordino. Il Cordevole è considerato il corso d'acqua principale, fra quelli che scorrono interamente nel bellunese.

La Provincia di Belluno è ricca di laghi, fra cui molti di alta quota, che nel 70% dei casi hanno una superficie inferiore all'ettaro. I tre laghi di origine naturale più importanti sono: il Lago di Santa Croce, il Lago di Alleghe ed il Lago di Misurina. Vi sono, inoltre, diversi laghi artificiali, che si sono formati in seguito a sbarramenti, creati per lo sfruttamento idroelettrico. I più significativi sono: il Lago del Mis (Comune di Sospirolo), il Lago del Corlo (Comuni di Arsìe e Cison del Grappa), il Lago di Centro Cadore ed il Lago di Santa Caterina (Comune di Auronzo di Cadore). Il territorio della Provincia di Belluno è classificato come interamente montano, tranne la media Valle del Piave (Valbelluna), che presenta le caratteristiche di un paesaggio di fondovalle e pedemontano collinare. Si possono distinguere una fascia prealpina, che attraversa la provincia in senso

GEOGRAPHICAL SETTING OF THE AREA OF STUDY

The Belluno Province borders with Austria (Tyrol and Carinthia) to the north, Friuli-Venezia Giulia (Provinces of Udine and Pordenone) to the east, the Provinces of Treviso and Vicenza to the south, the independent Provinces of Trento and Bolzano to the west. With its 3,678 km², Belluno is the biggest province in Veneto. It is mostly characterised by mountainous areas and it's divided into the following territories: Cadore, Feltrino, Alpago, Val di Zoldo, Agordino, Comelico, Ampezzano, Valbelluna.

Its main river is the Piave, which with its 3,505 km² basin flows through almost the whole territory of the province. The Piave river originates in the southern Peralba mountainside (2,694 m) and flows northeast-southwesterly through the province of Belluno. Its main tributary is the Cordevole, which almost entirely flows within the Agordino area. The Cordevole represents the main watercourse in the Belluno area.

The Province of Belluno is also characterised by the presence of numerous lakes, many of which are located at a high altitude and 70% of which reach a maximum size of one hectare. The three most important natural lakes are: the Lake of Santa Croce, the Lake of Alleghe and the Lake of Misurina. Furthermore, the province features a number of artificial lakes that have originated as a result of barrage works for hydro-electric power generation. The most important artificial lakes are: the Lake of Mis (Municipality of Sospirolo), the Lake of (Municipalities of Arsìe and Cison del Grappa), the Lake of Centro Cadore and the Lake of Santa Caterina (Municipality of Auronzo di Cadore). The Province of Belluno is mostly a mountainous area, with the exception of the middle Piave Valley (Valbelluna), which has the features of a bottom of the valley and pied-

NE-SO nella parte inferiore e le Dolomiti, nella parte centrale e nord, che rappresentano la peculiarità più significativa di questo territorio. La cima più elevata della catena prealpina è il Col Visentin (1.763 m). Le Dolomiti, nominate Patrimonio dell'Unesco il 26 giugno del 2009, comprendono numerose vette che superano i 3000 metri. Fra queste vi sono: il massiccio della Marmolada, che comprende la cima più alta delle Dolomiti (3.343 m) ed il ghiacciaio più importante; l'Antelao, la seconda cima (3.264 m) delle Dolomiti; il gruppo del Cristallo, la cui vetta più alta raggiunge i 3.221 metri; il gruppo del Sorapiss con Punta Sorapiss (3.205 m); il Civetta (3.220 m); il massiccio delle Tofane, la cui vetta più alta si erge per 3.244 metri; le Tre Cime di Lavaredo (3.000 m), il Piz Boè, la vetta più alta (3.152 m) del Gruppo del Sella; il Pelmo (3.168 m).

Data l'unicità e l'elevato pregio del contesto ambientale, il sistema delle aree protette in Provincia di Belluno copre oltre il 50% del territorio. Le realtà più importanti sono il Parco Nazionale delle Dolomiti Bellunesi ed il Parco Regionale delle Dolomiti d'Ampezzo. A queste aree protette si affiancano le Riserve Naturali Statali (per la maggior parte comprese nel territorio del Parco Nazionale), le Riserve Naturali Regionali, le Zone di Protezione Speciale (ZPS) ed i Siti di Importanza Comunitaria (SIC), individuati dalla Rete Natura 2000 del Veneto.

INQUADRAMENTO GEOLOGICO DELL'AREA DI STUDIO

Il territorio della provincia di Belluno si trova all'interno delle Alpi Meridionali; la parte più settentrionale ricade all'interno delle Dolomiti mentre, nel settore a sud della Linea della Valsugana sono presenti gruppi montuosi che, non essendo caratterizzati dall'associazione di rocce dolomitiche e vulcaniche, sono esclusi dalle Dolomiti vere e proprie; si tratta delle Vette Feltrine, dei Monti del Sole, dalla Schiara e del Talvena. Nonostante le formazioni più antiche affioranti nell'area risalgano a circa 600 milioni di anni fa, i principali complessi rocciosi che affiorano all'interno della provincia si sono formati, prevalentemente, tra i 200 e 250 milioni di anni fa (Triassico) e si sono accumulati sul fondo del mare; sono stati deformati e sollevati soltanto negli ul-

mont hill landscape. It can be divided into the prealpine area, running northeast-southwesterly through the southern part of the province, and the Dolomites in its central and northern parts, which represent the most typical aspect of this territory. The highest peak of the prealpine chain is the Col Visentin (1,763 m). The Dolomites, which have become a Unesco Heritage Site on 26th June 2009, feature a number of peaks over 3000 meters. Some of these are: the mountain of Marmolada, comprising the highest peak of the Dolomites (3,343 m), along with their most important glacier; the Antelao, the second highest peak (3,264 m) of the Dolomites; the Cristallo mountain group, with its highest peak of 3,221 meters; the Sorapiss mountain group, featuring the Sorapiss Peak (3,205 m); the Civetta (3,220 m); the Tofane mountains, with their highest peak of 3,244 meters; the Three Peaks of Lavaredo (3,000 m), the Piz Boè, the highest peak (3,152 m) of the Sella mountain group; the Pelmo (3,168 m).

Due to its uniqueness and to the remarkable environmental context, the protected areas of the Province of Belluno cover more than 50% of the local territory. The most important natural protected areas are the Dolomiti Bellunesi National Park and the Dolomiti d'Ampezzo Regional Park. Alongside these protected areas, the National Natural Reserves (mostly located within the territory of the National Park), the Regional Natural Reserves, the Special Protection Areas (SPA) and the Sites of Community Importance (SCI), identified by Rete Natura 2000 of Veneto also deserve mentioning.

GEOLOGICAL SETTING OF THE AREA OF STUDY

The Belluno Province is located within the Southern Alps territory; its northernmost part falls inside the Dolomites and the southern part of the Valsugana Line features numerous mountain groups that are not considered part of the Dolomites, due to the combination of Dolomite's and volcanic rocks. These are the Feltrine Peaks, the Sole mountains, the Schiara and the Talvena. Even though the oldest formations of the area date back to approximately 600 million years ago, the main rocky mountains of the prov-

timi 10-20 milioni di anni mentre l'erosione e lo smantellamento, responsabili di avere profondamente intaccato l'originaria continuità degli strati rocciosi (processo morfogenetico), risalgono agli ultimi 2-3 milioni d'anni.

Le rocce più antiche affioranti all'interno della provincia, di età Siluriana-Devoniana, sono rappresentate dal Basamento metamorfico che viene messo a giorno dalla Linea della Valsugana. Si tratta di rocce sedimentarie (arenarie, argille) ed eruttive (porfidi) che hanno subito, nel corso dell'Orogenesi Ercinica (350-300 milioni di anni fa) un'evoluzione geologica complessa, con ricristallizzazioni metamorfiche e molteplici deformazioni.

Nel Paleozoico Superiore l'area montuosa, emersa a seguito dell'Orogenesi Ercinica, ha subito un'intensa degradazione i cui prodotti, trasportati dai corsi d'acqua, si sono depositati nelle zone più depresse a costituire il Conglomerato di Ponte Gardena,

Nel Permiano, nel settore occidentale, è iniziata un'attività vulcanica intensa con formazione di alcuni rilievi la cui erosione ha costituito le Arenarie di Val Gardena. Queste sono state, quindi, sostituite superiormente e lateralmente dalla Formazione a Bellerophon caratterizzata da depositi carbonatico-evaporitici (alternanza di gessi e dolomie con uno strato superiore di calcari neri riccamente fossiliferi) tipici di una fascia lagunare e di un'area costiera soggetta a forte evaporazione che testimoniano la prima trasgressione marina verificatasi nel Permiano Superiore in tutta la regione dolomitica.

All'inizio dell'era Mesozoica, e più in particolare all'inizio del Trias, durante lo Scitico (250 milioni di anni fa) si è verificata una successiva grande trasgressione marina che nella provincia di Belluno ha portato condizioni di mare basso e costiero con depositi di sabbie, argille e calcari che ora costituiscono la Formazione di Werfen.

Nell'Anisico (240 – 234 milioni di anni fa) alcune zone dolomitiche si sono sollevate e, emergendo dalle acque, sono andate a formare delle isole rocciose sottoposte ad erosione che ha intaccato i materiali precedentemente depositati sino alla Formazione a Bellerophon. I detriti, trasportati dai corsi d'acqua, si sono depositati lungo strette spiagge a costituire l'attuale Conglomerato di Richthofen (bancate ciottolose alternate ad arenarie fini di colore rossastro).

ince originated between 200 and 250 million years ago (Triassic era) and accumulated at the bottom of the sea; they have re-shaped and emerged only in the last 10-20 million years, whereas the erosion and dismantling process, which led to a radical change of the original continuity of the rocky layers (morphogenetic process), dates back to the last 2-3 million years.

The oldest rocks of the province, dating back to the Silurian and Devonian periods, are represented by the metamorphic Basement that emerges through the Valsugana Line. These are mostly sedimentary rocks (sandstone, clay) and eruptive rocks (porphyries) that have experienced a complex geological evolution during the Ercinic Orogenesis (350-300 million years ago), featuring metamorphic recrystallizations and numerous deformations.

At the end of the Paleozoic Era, the mountain area that emerged during the Ercinic Orogenesis went through a remarkable degradation process, the products of which were carried by the watercourses and laid in the most depressed areas to form the Ponte Gardena Conglomerate.

In the western area, an intense volcanic activity began during the Permian Period, leading to the creation of a number of reliefs, the erosion of which constituted the Arenarie of Val Gardena. These were later replaced in their northern and lateral part with the Bellerophon Formation, characterized by carbonate and evaporite deposits (a combination of chalk and dolomite, with an upper layer of highly fossiliferous black limestone), typical of a lagoon and coastal area with a high level of evaporation, thus indicating the very first marine transgression of the late Permian period that took place in the Dolomitic region.

At the start of the Mesozoic era, and especially at the beginning of the Trias, during the Scythian (250 million years ago) a big marine transgression took place, leading, in the Province of Belluno, to the presence of a shallow and coastal sea and leaving deposits of sand, clay and limestone that today constitute the Werfen Formation.

In the Anisic era (240 – 234 million years ago) some areas of the Dolomites lifted and emerged through the water, thus creating a number of rocky islands that were later eroded, with a consequent modification of the materials that were

Nell'Anisico superiore si è verificata una marcata differenziazione geografico-ambientale: nelle Dolomiti occidentali si è formata una vasta area emersa, mentre, nelle Dolomiti orientali (Agordino, Zoldano, Cadore, Comelico) si sono instaurate condizioni marine dapprima di acqua bassa e poi sempre più profonde. La variabilità di condizioni ambientali ha determinato il depositarsi di formazioni conglomeratiche, calcaree, dolomitiche e marnose (Conglomerato di Voltago, Formazione di Agordo, Formazione dell'Ambata, Dolomia del Serla Superiore, Formazione di Contrin).

Dopo i sollevamenti anisici, all'inizio del Ladinico (235 – 236 milioni di anni fa), nell'area si sono verificati considerevoli fenomeni di subsidenza che, nell'intervallo di 3-4 milioni di anni, hanno determinato un abbassamento generale di circa 1000 metri. La piattaforma tropicale esistente, fratturandosi in blocchi è stata sommersa dal mare. Alcuni di questi blocchi sprofondando si sono inclinati e nella loro parte più sollevata ed emersa si sono formate comunità organogene (alghe, spugne e coralli) che hanno costruito scogliere cristalline il cui accrescimento è riuscito a compensare il tasso della subsidenza, accrescendosi verticalmente (aggradazione), e a superarlo permettendo, anche, un accrescimento laterale (progradazione). La testimonianza dell'accrescimento orizzontale delle scogliere anisico-ladiniche è documentato dalle stratificazioni orizzontali presenti nelle porzioni centrali (Marmolada), mentre l'espansione laterale è testimoniata dagli strati inclinati che rappresentano le superfici del pendio sottomarino di collegamento del margine della scogliera con l'antistante bacino marino. Queste scogliere ladiniche sono ora rappresentate da rocce dolomitiche calcaree che costituiscono la Dolomia dello Sciliar o il Calcarea della Marmolada nel caso in cui non siano state interessate da processi di dolomitizzazione.

Attorno alle scogliere ladiniche, in situazioni di mare profondo, si sono depositati sottili strati calcareo-silicei neri e calcari grigio verdi spesso intercalati da livelli di tufi e ceneri vulcaniche (Pietra verde) che costituiscono l'attuale Formazione di Livinallongo, quest'ultima è spesso situata al di sotto della Dolomia dello Sciliar in quanto la progradazione laterale dello Sciliar si è sovrapposta ai sedimenti di bacino (Livinallongo). Nello stesso periodo, nelle Dolomiti orientali (Cadore, Comelico, Zoldano) e nell'Agordino, in una situa-

earlier deposited in the Bellerophon Formation. The debris were carried by the watercourses and later deposited on narrow beaches, constituting the present Richthofen Conglomerate (a combination of pebbly banks and red thin sandstone).

At the end of the Anisic period, a clear geographical and environmental differentiation took place: the western Dolomites were characterised by a wide surface area, whereas the eastern Dolomites (Agordino, Zoldano, Cadore, Comelico) featured a shallow sea at the beginning and deep waters at a later moment. The varied environmental conditions led to the deposit of conglomerate, calcareous, dolomite and marble formations (Voltago Conglomerate, Agordo Formation, Ambata Formation, Dolomia of Upper Serla, Contrin Formation).

Following the Anisic upheavals, at the beginning of the Ladinic period (235 – 236 million years ago) the area experienced a remarkable subsidence that led, within the next 3-4 million years, to a general lowering of about 1000 meters. The existing tropical platform split into different blocks and was drowned by the sea. While drowning, some of these blocks bent to one side, and a development of organogenic communities (such as seaweeds, sponges and corals) accumulated on their upper surface that later built coral reefs. The development of the coral reefs managed to compensate the subsidence rate through vertical growth (aggradation), and to overcome it, thus allowing a lateral growth as well (progradation). The horizontal growth of the Anisic and Ladinic cliffs is confirmed by the horizontal stratifications located in the central areas, (Marmolada), whereas the lateral expansion is documented by the bended layers representing the surfaces of the underwater slope, linking the cliff margin to the opposite sea basin. Nowadays, these Ladinic cliffs are dolomite rocks constituting the Dolomite of Sciliar or the Marmolada Limestone when they haven't been affected by a dolomite process.

In the deep sea, the Ladinic cliffs are surrounded by thin layers of black silicone limestone and grey-green limestone, often combined with traces of tuffs and volcanic ashes (Green stone), currently constituting the Livinallongo Formation. This is mostly located below the Sciliar Dolomite, as the lateral progradation of the Sciliar over-

zione di mare ampio, si è depositata una grossa massa di sabbia, proveniente dallo smantellamento di un'area meridionale precedentemente sollevatasi, che ora è rappresentata dalle Arenarie di Zoppè.

Nel Trias nella Regione Dolomitica si è verificata un'intensa attività vulcanica accompagnata anche da intrusioni di rocce plutoniche.

Verso la fine del Ladinico (232 milioni di anni fa) si sono formati due apparati vulcanici che sono emersi dalla acque, uno nei pressi di Predazzo (Val di Fiemme) l'altro vicino all'attuale gruppo dei Monzoni (Val di Fassa). I prodotti di questa intensa attività vulcanica, perlopiù di composizione basaltica andesitica (lave, ialoclastiti, tufi e ceneri), si sono riversati sopra le piattaforme ladiniche seppellendole e lungo i ripidi pendii delle piattaforme andando a colmare, in parte, i bacini marini dove, in precedenza, si erano accumulati i sedimenti della Formazione di Livinallongo (es. Pale di S. Lucano e Pala dei Balconi a ovest di Agordo). Mentre le fasi più attive del parossismo vulcanico si andavano attenuando e l'attività tettonica era ormai cessata, i rilievi vulcanici della Val di Fassa hanno subito un processo di smantellamento ed i prodotti di tale erosione si sono riversati in mare riempiendo parzialmente i bacini circostanti: in prossimità delle zone vulcaniche in erosione (Val di Fassa, Val di Livinallongo, Val Cordevole) si sono depositati i prodotti più grossolani e ciottolosi (Conglomerato della Marmolada), mentre nelle zone più lontane (Val Gardena, Val Badia, Conca di Cortina e Cadore) si sono depositati i materiali più fini quali arenarie e argille (Strati di La Valle).

All'inizio del Carnico (230 – 231 milioni di anni fa) il livello marino, ritornato gradualmente alla posizione originaria, ha permesso lo svilupparsi di una nuova generazione di scogliere e piattaforme carbonatiche rappresentate dalla Dolomia Cassiana (Sciliar, Sassolungo, Sella, Pale di San Martino/Civetta Settsass/Nuvolao, Lagazuoi, Cadini di Misurina). Negli antistanti bacini si sono accumulati, invece, gli ultimi e i più fini prodotti dell'erosione vulcanica mescolati a particelle calcaree che hanno costituito la Formazione di San Cassiano. Quest'ultima, di tipico colore giallastro ricca di fossili e facilmente degradabile, costituisce i dolci pendii prativi presenti in moltissime zone dolomitiche (Passo Giau, Passo Pordoi, Conca Ampezzana e l'area di Misurina). Verso

lapped the basin sediments (Livinallongo). In the same period, in the eastern Dolomites (Cadore, Comelico, Zoldano) and in the Agordino area, in the wide sea, a big portion of sand deposited, which originated from the dismantling of a southern area that had previously lifted and that today constitutes the Arenarie of Zoppè.

During the Triassic Period, the Dolomites area experienced an intense volcanic activity, combined with the intrusion of plutonic rocks.

Towards the end of the Ladinic Period (232 million years ago), two volcanic complexes emerged from the water: one in proximity of Predazzo (Val di Fiemme), and the other near the present Monzoni mountain group (Val di Fassa). The materials originating from this intense volcanic activity, which were mainly basaltic and andesitic (lavas, hyaloclastites, tuffs and ashes), invaded and buried the Ladinic platforms and spread through their stiff slopes, partially filling the basins that previously contained the sediments of the Livinallongo Formation (for instance, Pale di S. Lucano and Pala dei Balconi, west of Agordo). As the most intense volcanic activity was slowly decreasing and the tectonic activity had come to an end, the volcanic reliefs of the Val di Fassa dismantled and the materials arising from this erosion reached the sea, partially filling the surrounding basins. Near the eroded volcanic areas (Val di Fassa, Val di Livinallongo, Val Cordevole) there was a deposit of thick and pebbly materials (Conglomerato della Marmolada), whereas the more distant areas (Val Gardena, Val Badia, Conca di Cortina and Cadore) received a deposit of thinner materials, such as sandstone and clay (La Valle Layers).

At the beginning of the Carnian Period (230 – 231 million years ago) the sea level, which had gradually gone back to its initial position, allowed the development of a new generation of cliffs and carbonate platforms such as the Cassiana Dolomite (Sciliar, Sassolungo, Sella, Pale di San Martino/Civetta Settsass/Nuvolao, Lagazuoi, Cadini di Misurina). The last and thinnest materials originating from the volcanic erosion, combined with calcareous traces, accumulated in the opposite basins, constituting the San Cassiano Formation. This formation, of a typical yellow colour, full of fossils and easily degradable, is characterised by the sweet green slopes that are common in most areas of the Dolomites

la fine del Carnico un sensibile abbassamento del livello del mare ha bloccato l'evoluzione delle scogliere carniche, provocando vaste emersioni ma mantenendo, anche, alcuni bacini poco profondi ed isolati (Dolomiti Orientali) dove si è depositata la Dolomia del Durrenstein con evidente stratificazione orizzontale (Lastoni di Formin).

Alla fine del Carnico il quadro paleogeografico della Regione Dolomitica è quello di una vasta piana marina costiera passante verso sud (Feltrino e Bellunese) ad una pianura fluviale sulla quale si è depositata la Formazione di Raibl costituita da calcari, marne, argille arenarie e conglomerati con qualche livello di dolomia e di gesso dai vivaci colori rossi verdastrì (Passo Falzarego, Cinque Torri, Lastoni Formin, Pelmo, Antelao, ecc).

All'inizio del Norico (223 milioni di anni fa), a causa di una trasgressione marina, la vasta piana costiera presente nella regione viene gradualmente invasa dal mare, tale invasione è stata soggetta ad una serie di oscillazioni eustatiche, in questa particolare situazione di piane tidali passanti, nello spazio e nel tempo, a lagune, stagni e bassissimi fondali marini, perdurando per svariati milioni di anni, ha permesso l'accumulo di un'imponente successione di sedimenti tidali che sono andati a costituire la Dolomia Principale (tre Cime di Lavaredo, Cristallo, Sorapis, Tofane, parte dell'Antelao del Pelmo e del Civetta, parte superiore del Sella, Cime di san Sebastiano, Sasso del Bosconero, Valle del Cordevole) caratterizzata da bancate omogenee di dolomia cristallina con impronte e modelli di bivalvi alternate ciclicamente a livelli di dolomia lamellare.

Verso la fine del Triassico (210 – 215 milioni di anni fa) si è verificato un approfondimento degli ambienti marini con trasformazione della Regione Dolomitica in un banco tropicale poco profondo ma completamente sommerso: la Piattaforma Trentina. Il clima da caldo arido, legato alla continentalità di molte aree, come dimostrato dalla presenza di sedimenti rossi, evaporiti e dolomie, si è trasformato in caldo umido di tipo marino con deposizione prevalente di calcari. Su questo banco tropicale si sono depositati il Calcarea di Dachstein, formazione calcarea in potenti banchi (Piz Boè, Altipiani Ampezzani, Croda Rossa, Tofane, Antelao, Pelmo) ed i Calcari Grigi, talora ricchi di fossili (Antelao, Pelmo e Civetta).

Durante il Giurassico inferiore (220 – 174 milioni di anni fa), a seguito dei complessi eventi

(Passo Giau, Passo Pordoi, Conca Ampezzana and the area of Misurina). Towards the end of the Carnian Period, the greatly receding sea level stopped the evolution of the Carnian cliffs and caused materials to surface. It also preserved some isolated basins (Eastern Dolomites) where deposits of Durrenstein Dolomite accumulated, leading to a clear horizontal stratification (Lastoni di Formin).

From a paleo-geographic point of view, at the end of the Carnian Period the Dolomites area presents itself as a wide sea coastal land, leading towards the south (towards Feltre and the Belluno Province) to a river valley, containing deposits of the Raibl Formation, made of limestone, sandstone clays and conglomerates with a certain level of dolomite and chalk, coloured in bright red and green (Passo Falzarego, Cinque Torri, Lastoni Formin, Pelmo, Antelao, ecc).

At the beginning of the Noric Period (223 million years ago), as a result of marine transgression, the wide coastal land of the region was gradually invaded by the sea. This brought on a series of eustatic changes, and the varied tidal movements through space and time into lagoons and shallow seabeds, accounted for the gathering of masses of tidal sediments which later constituted the main Dolomite (tre Cime di Lavaredo, Cristallo, Sorapis, Tofane, part of the Antelao of the Pelmo and the Civetta, the upper part of the Sella, Cime di san Sebastiano, Sasso del Bosconero, Cordevole Valley). These are all made of homogeneous layers of crystalline dolomite with prints and bivalves alternating with layers of lamellar dolomite. Towards the end of the Triassic Period (210 – 215 million years ago), the marine environment deepened and the Dolomite area was transformed into a shallow, underwater tropical bank: the Piattaforma Trentina. The dry, hot weather, caused by the proximity to the continent of some areas which is testified by the presence of red sediments, evaporites and dolomites, was replaced by a humid, sealike climate, with a deposition of calcareous materials. The Dachstein Limestone, a thick calcareous formation (Piz Boè, Ampezzani Plateaux, Croda Rossa, Tofane, Antelao, Pelmo) and the Grey Limestones, sometimes full of fossils (Antelao, Pelmo and Civetta) deposited on this tropical bank.

As a result of the intense tectonic activity that happened during the early Jurassic Period (220

tettonici, nell'area si è instaurato un sistema di alti strutturali e bacini: nella piattaforma trentina la sedimentazione di mare poco profondo è stata di tipo carbonatico (Calcarei Grigi di Noriglio e Gruppo di S. Vigilio), mentre nel bacino Bellunese si sono depositati dolomia e calcari ben stratificati con lenti di selce e a tratti marnosi (dolomia dello Schiara, formazione di Soverzene, Formazione di Igne)

Alla fine del Dogger il Bacino Bellunese viene colmato da una coltre di torbiditi oolitiche (Calcare del Vajont), mentre nella Piattaforma Trentina, soggetta a subsidenza, si sono depositati calcari nodulari rossastri di ambienti pelagici (Rosso ammonitico).

Con la fine del Giurassico (130 – 65 milioni di anni fa) e per tutto il Cretaceo nella Piattaforma Trentina e nel Bacino Bellunese, entrambi in una condizione di mare profondo, si sono sedimentati di calcari ben stratificati spesso selciferi da nodulari a lastriformi (Formazione di Fonzaso, Biancone, Calcarei del Cellina, Calcare di Monte Cavallo e Scaglia Rossa).

Con l'inizio del terziario si ha la deposizione di potenti sequenze di tipo clastico in facies di scaglia, di flysch (Flysch Bellunese) e di molassa, tutti materiali che nell'area dolomitica non esistono più in quanto erosi a seguito del suo sollevamento determinato dall'orogenesi alpina, mentre risultano ben presenti in zone meno soggette a tali processi quali l'Alpago e il Feltrino.

Nel Quaternario la regione, sottoposta ad un lentissimo sollevamento, ha subito processi di erosione da parte dei corsi d'acqua e, successivamente, anche dei ghiacciai che hanno determinato un modellamento del paesaggio: le dure e resistenti dolomie sono rimaste sempre più isolate, mentre, le tenere rocce vulcaniche con i loro derivati sedimentari (Strati di La Valle, Formazione di S. Cassiano, ecc) sono state spianate dando luogo a valli ed altopiani. Le quattro fasi glaciali verificatesi negli ultimi 2 milioni di anni hanno lasciato tracce della loro presenza: circhi glaciali, rocce levigate e striate, valli dai fianchi smussati e liscati, valli sospese, accumuli morenici. Nell'ultima fase post glaciale (ultimi 10-15 mila anni) si sono formati ingenti spessori di materiali incoerenti, specialmente nei fondovalle, dovuti principalmente al trasporto fluviale. Dal punto di vista geomorfologico il paesaggio bellunese è il risultato di più fattori: l'assetto strutturale

– 174 million years ago), the area saw the creation of structurally elevated areas and basins: in the platform of the Trentino region, the shallow sediments are mostly carbonatic (Calcarei Grigi di Noriglio and Gruppo di S. Vigilio), whereas in the basin of Belluno there was a deposit of dolomites and limestone combined with firestones and parts of marble (Schiara dolomite, Soverzene Formation, Igne Formation)

Towards the end of the Middle Jurassic, the basin of Belluno was filled by oolitic limestone (Vajont Limestone), while calcareous oozes composed of sea ammonite reds accumulated towards the subsiding Trentino region.

Towards the end of the Jurassic Period (130 – 65 million years ago) and throughout the whole of the Cretaceous Period, the Trentino region platform and the province of Belluno basin saw the deposit of layered limestone, often containing flint in nodules or layered (Fonzaso Formation, Biancone, Cellina Limestones, Monte Cavallo Limestone and Scaglia Rossa).

The beginning of the Tertiary Period registers heavy deposits of clastic sedimentary rocks in flakes and flysch (Flysch Bellunese). These materials are no longer present in the Dolomites as they were later eroded during its rising through alpine orogenesis. They are still present in areas less subject to this phenomenon, such as the Alpago and the Feltre area.

During the Quaternary Period, the region experienced a gradual lifting process, thus being eroded by the watercourses and later by the glaciers. This has led to a re-shaping of the landscape: the hard and resistant dolomites have been slowly isolated, whereas the softer volcanic rocks and their sediments (La Valle Layers, S. Cassiano Formation, etc.) have been flattened, leading to the creation of valleys and plateaux. The four ice ages that took place in the last 2 million years undoubtedly left a mark: glacial circles, levelled and striated rocks, smooth sided valleys, moraine complexes

The final post-glacial phase (last 10-15 thousand years) saw the accumulation of considerable layers of diverse materials, especially at the bottom of valleys, brought by the rivers flowing. From a geomorphological point of view, the landscape of the Belluno area is the combination of several factors: the structural asset (bends, faults, layers' inclination), a series of dif-

(pieghe, faglie, inclinazioni degli strati), la presenza di litologie differenti con comportamenti diversi rispetto alla degradazione atmosferica (versanti scoscesi nelle rocce più tenaci e compatte, forme più dolci nelle rocce più tenere) e l'azione dei ghiacciai quaternari. A questi fattori dominanti si associano, poi, altri processi attivi a quote medio-alte che hanno contribuito al modellamento del paesaggio bellunese, quali: i processi periglaciali (nivomorene, rock glacier, coni di valanga, accumuli detritici), i processi gravitativi (frane, crolli e ribaltamenti in roccia, colate di detrito) e i processi carsici (crepacci, inghiottitoi, campi solcati).

ferent lithologies, which are discordant to the degradation of the atmosphere (steep sides on compact and heavy rocks, and rounder shapes on mellow rocks) and the action of quaternary glaciers. The above dominant factors are then accompanied by other active processes that take place at medium-high latitudes and that contributed to the shaping of the local landscape, such as: periglacial processes (nivomorene, rock glacier, avalanche cones, accumulating detritus), processes related to gravitation (landslides, rumbling rocks, falling detritus) and karstic processes (clefs, rifts, slits).

4. La rete di monitoraggio del permafrost

Permafrost monitoring network

Uno dei principali obiettivi del Progetto PermaNET è stato quello di costituire una rete di monitoraggio del permafrost, attraverso la raccolta dei metadati dei più importanti siti di monitoraggio già esistenti in ambito alpino e il loro inserimento in un database comune, e l'installazione di nuovi siti di monitoraggio in zone precedentemente non studiate.

Alla chiusura del progetto la rete di stazioni distribuita sull'arco alpino è risultata essere costituita da circa 40 siti chiave, strumentati per il monitoraggio di diversi parametri del permafrost sia in roccia che su detrito.

Sulla base delle esperienze condotte in Svizzera, con la rete PERMOS, l'intenzione è stata quella di creare delle reti nazionali, cosa già avvenuta in Francia, con PermaFRANCE e ancora in fase embrionale in Austria e Italia.

Al fine di garantire una certa compatibilità dei dati sono state formulate delle linee guida per l'installazione e la manutenzione dei siti di monitoraggio.

Sostanzialmente, il monitoraggio del permafrost è stato sviluppato con le seguenti modalità:

- monitoraggio del permafrost attraverso perforazioni a diverse profondità, effettuate sia su roccia che su detrito (ad esempio rock glacier). Le perforazioni possono essere verticali oppure, nel caso di pareti molto inclinate, orizzontali.
- monitoraggio dello strato attivo (su roccia o sedimento) con perforazioni di limitate profondità.

Inoltre, con lo scopo di studiare la distribuzione spaziale del permafrost, sono state posizionate delle sonde termometriche ad una profondità di circa 2 cm che hanno permesso di misurare la temperatura superficiale del terreno (Ground Surface Temperature). Sulla base di questi metadati, è stato compilato un elenco di stazioni ed è stata costruita una mappa per l'individuazione delle stesse sul territorio (vedi tabella xx e Fig. XX).

One of the main objectives of the PermaNET Project was the creation of a permafrost monitoring network by collecting the metadata of the main Alpine research sites and adding them to a database, and by later creating new research sites in areas that had never been studied before.

At the end of the project, the overall network of Alpine stations included approximately 40 key sites, all equipped for monitoring the different permafrost features, both on rocky soil and on debris.

Following the experience gained with the Swiss network PERMOS, the main purpose was that of creating a national network, in the same way as the French network PermaFRANCE, which in Italy and Austria is still in the embryonic stages.

In order to ensure the compatibility of data, all the research sites have been provided with a series of guidelines for their installation and maintenance.

Essentially, the permafrost monitoring process has taken place in the following way:

- *permafrost monitoring through drilling at different depths, both on rocky soil and on debris (for instance, rock glacier). Drilling can take place both vertically or horizontally in the case of sloped faces.*
- *active layer monitoring (on rocky soil or sediment) through drilling at medium depths.*

Furthermore, with the purpose of researching the spatial distribution of permafrost, a number of thermometric probes located at 2 cm depth allowed measuring the Ground Surface Temperature. On the basis of the above metadata, a list of stations has been drawn up, and a map has been created to locate them within the area (see table xx and picture XX).

In the Veneto region, a new research site has been activated in proximity of the Piz Boè mountain, at an altitude of approximately 2,900 m.

Per quanto riguarda il territorio veneto è stato implementato un nuovo sito di monitoraggio limetrofo al Piz Boè, a quota 2900 m circa, per la cui descrizione si rimanda alla sezione dedicata (Cap.....).

For a detailed description, please see the relevant section (Chapter ...).

Tab.x.x Elenco delle stazioni di monitoraggio del permafrost sulle Alpi
Table x.x List of permafrost monitoring stations on the Alps

ID	Location	Elevation	Permafrost		Active layer		GST	Other and Notes
			Bedrock	Rock Glacier	Rock Face	Sediment		
AUSTRIA								
Istitution: University of Innsbruck, Institute of Geography								
A-1	Hinteres Langtal Hohe Tauern	2500- 2770	X	X	X	X	X	
A-2	Weissen Cirque, Hohe Tauern	2670	X	X	X	X	X	
A-3	Dösen Valley, Hohe Tauern	2500- 2630	X	X	X	X	X	
Istitution: Central Inst. For Meteorology and Geodynamics (Salzburg)								
A-4	Hoher Sonnblick	3105	X (a)					
A-5	Goldbergspitze	2400- 2800					X	
FRANCE								
Istitution: PERMAFrance (J. Fourier University, CNRS and Grenoble Institute of Technology)								
F-1	Orelle	2780 -3050					X	
F-2	Laurichard	2450 -2630		X			X	
F-3	Deux Alpes	3178	X (a)				X	
F-4	Aiguille de Midi	3820			X			in collaboration with Arpa Valle d'Aosta
F-5	Les Drus	3280			X			in collaboration with Arpa Valle d'Aosta
GERMANY								
Istitution: Bavarian Environment Agency, Geological Survey								
D-1	Zugspitze	2940	X (b)					

ITALY								
Istitution: Autonomous Province of Bolzano, Office for Geology and Building Materials Testing								
I-1	Senales - Grawand (BZ)	3140	X (b)					
I-2	Senales - Lazaun (BZ)	2570		X (c)			X	Georadar, GPS, discharge
I-3	Ultimo - Rossbänk (BZ)	2550		X (c)			X	Georadar, GPS, discharge
I-4	Riva di Tures - Napfen (BZ)	2600						BTS, GPS, discharge
I-5	Braies - Croda Rossa "Cadin del Ghiacciaio" (BZ)	2350					X	Georadar, GPS, spring temperature, temperature profile (0-150cm) on the rockglacier
I-6	Braies - Croda Rossa "Cadin di Croda Rossa" (BZ)	2460					X	Georadar, spring temperature, temperature profile (0-150cm) on the rockglacier
I-7	Passo Gardena - Lech del Dragon (BZ)	2670					X	Georadar, spring temperature, temperature profile (0-150cm) on the rockglacier
I-8	Solda - Madritsch (BZ)	2900					X	BTS since 1992
Istitution: Autonomous Province of Trento, Civil and Territory Protection department, Geological Survey								
I-9	Cavaion (TN)	2890	X					
I-10	Cavaion (TN)	2865					X	
I-11	Lobbie (TN)	3050	X					
I-12	Presena (TN)	2650					X	
I-13	Cima Uomo (TN)	2460					X	

Istitution: Aosta Valley Region and Arpa Valle d'Aosta, www. arpa.vda.it								
I-14	Matterhorn Carrel South (AO)	3820			X			
I-15	Matterhorn Carrel North (AO)	3815			X			
I-16	Matterhorn Cheminee - new (AO)	3750			X			
I-17	Matterhorn Cheminee - old (AO)	3750			X			
I-18	Matterhorn Oriondè - fractured (AO)	2995			X			
I-19	Matterhorn Oriondè - not fractured (AO)	2992			X			
I-20	Col d'Entreves South (AO)	3510			X			
I-21	Col d'Entreves North (AO)	3535			X			
I-22	Grandes Jorasses South - right (AO)	4100			X			
I-23	Grandes Jorasses South - left (AO)	4100			X			
I-24	Col Peuterey North (AO)	3965			X			
I-25	Aiguille Marbree (AO)	3250			X			
I-26	Cime Bianche Pass - shallow (AO)	3100				X		
I-27	Cime Bianche Pass - deep (AO)	3100	X					
Istitution: Region of Veneto, Geological Survey and Arpa Veneto								
I-28	Piz Boè (BL)	2908	X (a)					
Istitution: Arpa Piemonte, Regional Center for Geological Researches, www. arpa.piemonte.it								
I-29	Mt. Moro Pass (VB)	2870	X (a)				X	

I-30	Salati Pass - Mosso Inst. (VC)	2950			X		X	
I-31	Salati Pass - Corno dei Camosci (VC)	3020	X (a)					
I-32	Sommeiller Pass (TO)	2985	X (a)		X		X	
I-33	La Coletta Pass (CN)	2850	X (a)				X	
I-34	Gardetta Pass (CN)	2490	X (a)				X	
SWITZERLAND								
Institution: BAFU and Zurich University								
CH-1	Muot da Barba Peider, Pontresina	2980			X		X	
CH-2	Hörnligrat, Matterhorn	3260			X			

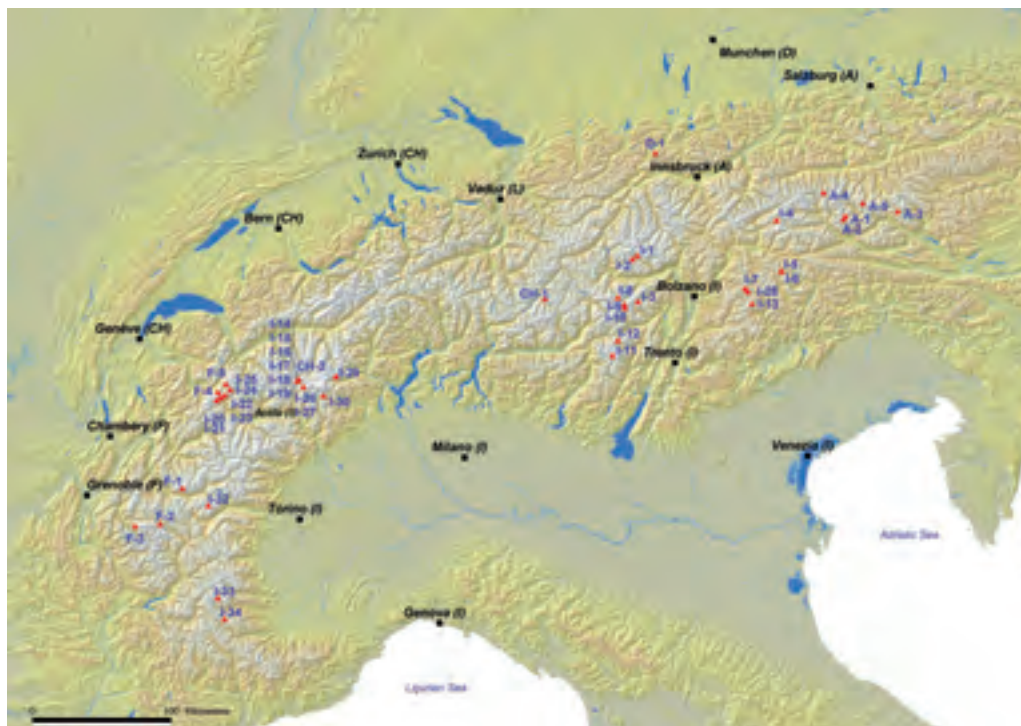


Figura 1. Mappa delle stazioni di monitoraggio del Permafrost.

Figure 1. xxxxx

5. Permafrost e cambiamenti climatici

Permafrost and climate change

Fra gli scopi principali del progetto PermaNET vi è quello di individuare la distribuzione del permafrost in ambito alpino. Nell'ambito del progetto è stato creato un inventario delle evidenze del permafrost e anche dei rock glaciers, nonché una carta del permafrost per l'intera area alpina. La mappa di distribuzione del permafrost permette una stima della risposta dello stesso in relazione ai cambiamenti climatici e costituisce la base per lo studio di misure per l'adattamento per alcune attività svolte in alta montagna ad eventuali futuri cambiamenti.

CATASTO DEI ROCK GLACIER E DATABASE DELLE EVIDENZE CLIMATICHE

Il catasto delle evidenze di permafrost costituisce uno dei capisaldi del Progetto PermaNET. Esso è stato dotato di una struttura molto semplice e comprende un limitato numero di parametri, così da rendere piuttosto semplice l'inserimento di dati già esistenti in uno schema standardizzato (Cremonese et al, 2011).

Esso contiene le seguenti tipi di evidenze: temperature in foro, misure di temperature superficiale, segnali nei distacchi di roccia, siti con trincee o costruzioni (non stagionali e a profondità superiore a 5 m), movimenti superficiali, prospezioni geofisiche (geoelettriche, sismiche georadar e elettromagnetiche), altre evidenze indirette (depressione thermokarst) e rock glaciers.

L'inventario dei rock glaciers¹ è stato gestito separatamente ed è risultato dall'unione di tutti i

One of the main objectives of the PermaNET Project is that of identifying the distribution of permafrost in the Alpine area. A list of permafrost occurrences and rock glaciers has been created as part of the project, as well as a map of permafrost for the entire Alpine area. The map of permafrost distribution is useful to understand the permafrost reaction to climate change, and represents the starting point for further studies on the adaptation of high mountain activities to potential future variations.

ROCK GLACIER REGISTER AND DATABASE OF CLIMATE EVIDENCE

The register of permafrost occurrences is a cornerstone of PermaNET Project. It has a very simple structure and it contains a limited number of parameters to make it easier inserting the existing information into a standardised scheme (Cremonese et al, 2011)

The register contains the following elements: measurements in bore hole, measuring of surface temperatures, signs on rock displacements, sites presenting trenches or built up (non seasonal, deeper than 5 m), superficial movements, geophysical prospects (geo-electric, geo-radar seismic and electromagnetic), other indirect evidence (thermokarst depression) and rock glaciers.

The rock glacier register¹ is a separate tool that originated from the combination on all rock gla-

1. I rock glacier (o "ghiacciai di roccia") sono corpi detritici costituiti da clasti spigolosi, hanno forma lobata o linguoide e sono caratterizzati da una superficie ricca di strutture di flusso e da fianchi e fronti molto ripidi.

In base alle caratteristiche dinamiche i rock glaciers si distinguono in attivi, inattivi e relict.

1. *Rock glaciers are lobate or tongue-shaped bodies of angular rock debris and are characterized by a surface full of flow structures and by very steep front slopes and edges.*

According to their dynamical characteristics, rock glaciers can be distinguished into active, inactive and relict.

Active rock glaciers move downvalley with a velocity of several centimetres a year, and they normally contain massive or

catasti di rock glacier delle regioni coinvolte nel progetto. Le informazioni riguardo ai rock glaciers sono state inserite in un database anch'esso a struttura molto semplificata. La stima dell'attività è stata basata su indagini in campo o interpretazione di immagini (foto aeree o immagini satellitari) di tipiche caratteristiche morfologiche (ripidezza della fronte, assenza di vegetazione), giungendo a una classificazione di rock glacier "intatto" (forma attiva o inattiva con permafrost) o "relict" (senza permafrost).

Anche per la Regione Veneto si è proceduto all'esecuzione del catasto dei rock glaciers e all'individuazione di alcune evidenze di permafrost.

Metodologia

La fonte documentale principale nella digitalizzazione dei rock glaciers del Veneto è costituita dalle ortofoto del 2003 e del 2006. Si è proceduto all'analisi di tutte le ortofoto relative alla montagna veneta ed in particolare del territorio al di sopra dei 1800/2000 m di quota. In aggiunta sono state anche consultate le carte di pendenza con risoluzione 10 m, per individuare cambi repentini in corrispondenza delle scarpate dei rock glacier e le carte di esposizione (10 m), al fine di individuare l'esposizione prevalente dei rock glacier e cambi di esposizione nelle varie parti delle strutture. Dopo una fase di verifica (condotta con la collaborazione dei Prof Carton e Meneghel dell'Università di Padova), si è proceduto all'analisi di alcuni potenziali rock glaciers mediante stereoscopia, che ha permesso di dirimere dubbi sulla loro effettiva presenza.

Si è inoltre tentato di suddividere i rock glaciers intatti in due sottoclassi (attivi o inattivi), in funzione del fatto che essi siano in movimento gravitativo oppure no, anche se risulta molto difficile dalla sola analisi delle foto aeree stabilire con

I rock glacier attivi presentano movimenti verso valle dell'ordine dei centimetri all'anno e in genere contengono ghiaccio massivo o interstiziale; quelli inattivi non sono più in movimento, anche se possono ancora contenere del ghiaccio al loro interno, a causa della profondità del ghiaccio contenuto o della morfologia del substrato su cui sono posti.

I rock glacier inattivi che non contengono più ghiaccio al loro interno sono invece definiti relict e possono essere di difficile riconoscimento.

Vista la difficoltà di distinguere i rock glacier attivi da quelli inattivi, contenenti ancora ghiaccio, vengono spesso considerati assieme e definiti intatti.



Figura 1. Mappa dei rock glacier in Veneto
Picture 1. Map of Veneto rock glaciers

ciat registers of the regions that were involved in the project. All the available data on rock glaciers were added to a very simple database. The estimate of activity was based on field studies or the photo interpretation (aerial or satellite images) of typical morphological features (face steepness, lack of vegetation), thus distinguishing between "intact" (active or inactive with permafrost) or "relict" rock glacier (without permafrost).

All the rock glaciers in the Veneto region have been classified and inserted into a register, and some occurrences of permafrost have been identified.

Methodology

The main documental source used for the digitalisation of rock glaciers in the Veneto region are the 2003 and 2006 orthoimages. All the orthoimages of the Veneto mountains, and in par-

interstitial ice; inactive rock glaciers are not moving, but they may still contain traces of ice because of their depth or the features of the substrate where they are located.

Inactive rock glaciers that do not contain ice are defined relict and may be very difficult to recognize.

As it is very difficult to distinguish active rock glaciers from inactive rock glaciers that still contain ice, they are normally classified together as intact rock glaciers.

certezza la loro effettiva natura, tanto che in alcuni casi solamente l'indagine in campo potrebbe stabilire la loro attività.

Risultati

Al termine dell'analisi sono stati individuati 12 rock glacier intatti, fra i quali 7 presumibilmente attivi, di cui due, quello del Piz Boè e anche quello della Val d'Arcia, ancora nello stadio iniziale di passaggio fra debris covered glacier (ghiacciai ricoperti da detrito) e rock glacier, 5 rock glacier inattivi e 22 relitti.

Si è poi proceduto alla classificazione, in base a lunghezza e larghezza (lobato o tongue shape), e alla caratterizzazione, in funzione della collocazione (versante o circo) di ogni rock glacier. Mediante l'utilizzo del GIS per tutti i rock glaciers sono stati forniti alcuni dati morfologici aggiuntivi, quali ad esempio quota massima e minima, lunghezza, larghezza, pendenza ed esposizione.

MAPPATURA DEL PERMAFROST

Uno degli obiettivi principali del Progetto PermaNET era la realizzazione della mappa di distribuzione del permafrost per fornire uno strumento utile alle pubbliche amministrazioni per la gestione del territorio e ai privati implicati nella costruzione e manutenzione di strutture in aree montane.

Per la montagna veneta sono state realizzate due mappe del permafrost potenziale utilizzando rispettivamente:

1. il modello idrometeorologico sviluppato dal WSL - Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research SLF di Davos;
2. il modello statistico sviluppato dall'Università di Zurigo.

CARTA REGIONALE DEL PERMAFROST POTENZIALE: MODELLO IDROMETEOROLOGICO

Introduzione

Nel passato WSL - Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research SLF di Davos, e ARPAV hanno collaborato per la modellizzazione della distribuzione del permafrost nel bacino del Cordevole per un'area di 1652 km² (Völksch and

ticular of territories above 1800/2000 m. of altitude, have been analysed. In addition, the slope maps with a 10 m resolution have also been researched in order to detect potential sudden variations at the rock glacier escarpment, as well as the exposure maps (10 m.) in order to define the rock glaciers' main exposure and potential exposure variations. After a verification stage (carried out with the collaboration of Professor Carton and Professor Meneghel of the University of Padua), a number of potential rock glaciers have been analysed through stereoscopy, a method that made it possible to confirm their presence.

Rock glaciers have then been distinguished between active and inactive rock glaciers, depending on whether they were moving downwards or not. However, the mere analysis of the pictures does not allow to precisely establish the real nature of the rock glaciers, and in some cases only a field study could define their condition.

Outcomes

The study detected the presence of 12 intact rock glaciers, 7 of which were probably active, 2 of which (the one on the Piz Boè and the one of Val d'Arcia) were still in the process of transforming from debris covered glaciers to rock glaciers; 5 inactive rock glaciers and 22 relict rock glaciers.

The rock glaciers have then been distinguished between lobate and tongue-shaped glaciers, and they have been characterised according to their location (side or cirque). Furthermore, the use of GIS has provided some additional morphological features for each rock glacier, such as their highest and lowest altitude, length, width, steepness and exposure.

PERMAFROST MAPPING

One of the main objectives of the PermaNET Project was the creation of a permafrost distribution map in order to provide a useful tool to the local administrations managing the territory and to the private institutions responsible for the construction and maintenance of mountain facilities. Two maps of the distribution of permafrost in the Veneto mountains have been drawn up by using respectively:

Tabella 1. Elenco dei rock glacier con le principali caratteristiche
 Table 1. List of rock glaciers and main features

Nome Name	GB Est xxxx	GB Nord xxxx	Lungh/ xxxx (m)	Largh/ xxxx (m)	Attività 1 xxxx	Morfologia xxxx	Sito xxxx	Forma xxxx
Forca Rossa	1719142.75	5142774.36	565	320	Relitto	Tongue shape	Versante xxxxx	Complessa xxxxx
Val Franzedas	1720277.07	5142367.90	220	112	Relitto	Tongue shape	Versante xxxxx	Semplice xxxxx
Piz Boè	1717202.30	5154698.56	220	180	Attivo	Tongue shape	Versante xxxxx	Semplice xxxxx
Pian de Carpacia	1719411.40	5151723.54	660	270	Relitto	Tongue shape	Versante xxxxx	Semplice xxxxx
Selegaccia	1723899.95	5150016.84	203	675	Relitto	Lobato	Versante xxxxx	Complessa xxxxx
Agnerezze	1725386.70	5148139.28	137	100	Relitto	Tongue shape	Versante xxxxx	Semplice xxxxx
Val Miniera	1723205.05	5142748.09	146	91	Relitto	Tongue shape	Versante xxxxx	Semplice xxxxx
Forcella Valbona	1726150.16	5142619.61	140	370	Inattivo	Lobato	Circo xxxxx	Semplice xxxxx
Val Focobon	1718492.85	5134079.81	270	160	Relitto	Tongue shape	Circo xxxxx	Semplice xxxxx
Montesela	1738436.59	5169624.51	307	318	Relitto	Lobato	Circo xxxxx	Complessa xxxxx
Cadin Fanes	1731695.57	5159763.76	465	181	Attivo	Tongue shape	Circo xxxxx	Semplice xxxxx
Passo Silvella	1765375.28	5174349.91	456	162	Relitto	Tongue shape	Versante xxxxx	Complessa xxxxx
Valgranda	1769526.60	5174397.96	340	85	Relitto	Tongue shape	Versante xxxxx	Complessa xxxxx
Cadin Vallona1	1772014.82	5173027.55	202	180	Relitto	Lobato	Circo xxxxx	Complessa xxxxx
Cadin Vallona2	1772111.96	5172791.03	80	233	Relitto	Lobato	Versante xxxxx	Semplice xxxxx
Cresta ferro	1781765.63	5166948.39	550	220	Relitto	Tongue shape	Circo xxxxx	Complessa xxxxx
Ciadin nevai	1751924.78	5163922.30	466	118	Inattivo	Tongue shape	Circo xxxxx	Semplice xxxxx
Froppa Dentro 1	1755819.55	5155866.97	575	180	Attivo	Tongue shape	Circo xxxxx	Complessa xxxxx
Froppa Dentro 2	1755871.52	5155930.12	375	113	Inattivo	Tongue shape	Circo xxxxx	Semplice xxxxx
Casera Razzo 1	1777092.14	5152730.59	645	250	Relitto	Tongue shape	Versante xxxxx	Semplice xxxxx
Casera Razzo 2	1776435.82	5153322.98	508	330	Relitto	Tongue shape	Versante xxxxx	Semplice xxxxx
Cadin Montanel	1765347.38	5147973.60	155	742	Relitto	Lobato	Versante xxxxx	Semplice xxxxx

Tipo superficie xxxx	Origine xxxx	Area (ha) xxxx	Quota min xxxx (m)	Quota max xxxx (m)	Quota media xxxx (m)	Pendenza media (°) xxxx	Esposizione media (°) xxxx
Creste e solchi xxxx	Talus derived	19.72	2274	2481	2350.55	15.4708	187.119
Corpo depressivo xxxx	Talus derived	2.07	2276	2385	2329.06	27.9293	32.426
Corpo rigonfio xxxx	Debris	0.47	2917	2965	2940.21	24.1407	86.044
Corpo rigonfio xxxx	Talus derived	13.18	1943	2210	2042.12	22.0214	63.348
Creste e solchi xxxx	Talus derived	9.72	2045	2243	2155.60	16.1842	55.729
Corpo depressivo xxxx	Talus derived	0.98	2179	2239	2206.57	24.4477	178.443
Corpo depressivo xxxx	Talus derived	0.99	2141	2198	2165.77	24.5473	83.333
Corpo rigonfio xxxx	Talus derived	3.94	2148	2227	2182.17	18.4350	266.233
Corpo rigonfio xxxx	Talus derived	3.33	2125	2211	2171.73	20.1441	75.519
Creste e solchi xxxx	Talus derived	7.56	2214	2265	2253.07	7.4725	184.106
Corpo depressivo xxxx	Debris	6.59	2458	2665	2572.15	22.6537	100.105
Creste e solchi xxxx	Talus derived	3.59	2213	2401	2300.80	21.3061	322.709
Creste e solchi xxxx	Talus derived	2.28	2181	2290	2231.94	18.5033	148.350
Creste e solchi xxxx	Talus derived	2.78	2267	2326	2293.74	16.2042	200.560
Corpo rigonfio xxxx	Debris	1.20	2209	2280	2244.73	18.6186	248.683
Creste e solchi xxxx	Debris	7.25	2023	2222	2123.35	18.6489	195.086
Corpo depressivo xxxx	Debris	3.86	2360	2561	2453.09	22.2716	168.753
Creste e solchi xxxx	Debris	5.85	2472	2688	2585.45	20.9454	254.657
Creste e solchi xxxx	Debris	2.63	2500	2651	2582.80	26.7302	276.375
Creste e solchi xxxx	Talus derived	15.52	1812	1975	1901.42	13.8156	89.983
Corpo depressivo xxxx	Talus derived	14.90	1688	1855	1792.76	20.4793	171.322
Corpo depressivo xxxx	Talus derived	7.73	1939	2084	2032.28	14.6450	248.262

Cadin d'Arade	1768170.42	5145899.94	255	135	Relitto	Tongue shape	Circo xxxxx	Semplice xxxxx
Meduce Dentro	1751894.59	5155515.76	183	113	Attivo	Tongue shape	Circo xxxxx	Semplice xxxxx
Mondeval	1738152.07	5151029.82	371	170	Relitto	Tongue shape	Versante xxxxx	Complessa xxxxx
Prendera	1739745.40	5149707.91	490	280	Relitto	Tongue shape	Versante xxxxx	Complessa xxxxx
Val San Vito	1748155.98	5153847.18	236	240	Inattivo	Lobato	Versante xxxxx	Semplice xxxxx
Vald'Arcia	1740797.23	5146047.32	105	600	Attivo	Lobato	Circo xxxxx	Semplice xxxxx
Vant	1741327.38	5145432.26	274	327	Attivo	Lobato	Circo xxxxx	Semplice xxxxx
Vant Moiazza	1736044.93	5136211.46	405	317	Inattivo	Tongue shape	Circo xxxxx	Semplice xxxxx
Sass Duram	1736739.99	5135670.67	240	120	Attivo	Tongue shape	Versante xxxxx	Semplice xxxxx
Valdritta	1643279.19	5064841.85	152	187	Relitto	Lobato	Circo xxxxx	Semplice xxxxx
Remeda Rossa	1737452.32	5170124.09	370	431	Relitto	Lobato	Versante xxxxx	Complesso xxxxx
Geralbes	1737725.10	5169682.46	320	180	Relitto	Tongue shape	Versante xxxxx	Semplice xxxxx

Lehning, 2005, Cagnati et al., 2006). Data tale esperienza pregressa, si è deciso di estendere l'analisi a tutto il territorio veneto.

A questo scopo è stato utilizzato il modello idro-meteorologico Alpine 3D, spazialmente distribuito, tridimensionale, che analizza e predice le dinamiche dei processi legati alla presenza della neve in ambito montano (Lehning, et al, 2006). Esso include più moduli che simulano il manto nevoso, il suolo e la vegetazione, il trasporto della neve da parte del vento, i flussi radiativi e deflussi; in particolare esso effettua un bilancio radiativo usando un approccio "view factor" per il calcolo della radiazione a onde corte e onde lunghe, considerando anche la riflessione dell'onda corta e l'emissione in onda lunga su terreni complessi (Fierz, et al., 2003), e utilizza un modello di trasporto della neve adatto a terreni impervi per il calcolo della redistribuzione del manto nevoso. Il modello Alpine 3D negli anni ha subito un'evoluzione, le condizioni iniziali sono state modificate rispetto all'elaborazione del 2005, i dati di input hanno una base più ampia, determinando conseguentemente una differenza di risultati, in alcune parti anche significative.

1. *the hydro-meteorological method developed by WSL - Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research SLF di Davos;*
2. *the statistical model developed by the University of Zurich.*

REGIONAL MAP OF POTENTIAL PERMAFROST: HYDRO-METEOROLOGICAL MODEL

Introduction

In the past, the WSL - Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research SLF of Davos and ARPAV have cooperated in the modelling of the distribution of permafrost in the Cordevole basin on an area of 1652 km² (Völsch and Lehning, 2005, Cagnati et al., 2006). On the basis of this experience, the analysis has been extended on the entire Veneto territory.

To this end, the spatial distributed, three-dimensional Alpine 3D hydro-meteorological model has been used, for its ability to analyse and predict the dynamics of the processes connected to the presence of snow in mountain ar-

Creste e solchi xxxxx	Talus derived	2.80	1983	2041	2019.75	14.6885	225.127
Corpo depressivo xxxxx	Debris	1.47	2197	2243	2218.31	16.2094	268.830
Creste e solchi xxxxx	Talus derived	4.45	2211	2259	2228.12	8.5255	207.130
Corpo depressivo xxxxx	Talus derived	8.05	2076	2150	2114.14	8.4411	136.075
Corpo depressivo xxxxx	Talus derived	4.09	2156	2245	2192.39	21.1986	273.962
Corpo rigonfio xxxxx	Debris	4.83	2206	2309	2269.61	18.3904	306.518
Corpo rigonfio xxxxx	Debris	7.66	2764	2931	2858.23	20.5663	125.552
Creste e solchi xxxxx	Talus derived	9.12	2301	2442	2364.45	17.9315	91.759
Corpo rigonfio xxxxx	Talus derived	2.31	2327	2469	2414.39	28.2357	185.293
Corpo depressivo xxxxx	Talus derived	2.53	2002	2076	2038.36	23.2731	324.103
Creste e solchi xxxxx	Talus derived	14.17	2118	2294	2179.29	21.1473	257.450
Corpo depressivo xxxxx	Talus derived	4.83	2126	2212	2165.36	15.2499	222.053

Fonte dei dati

Il modello Alpine 3D utilizza dati meteorologici, carta di uso del suolo e corrispondente tipologia di suolo e Modello Digitale del Terreno (DEM). Come input esso necessita di dati di precipitazione, temperature dell'aria, umidità, velocità del vento, radiazione visibile incidente e riflessa e radiazione a onde lunghe incidente (o copertura nuvolosa), che sono stati ricavati da una selezione di 44 stazioni presenti sul territorio veneto e gestite da ARPAV. L'inizializzazione del modello è implementata tramite file di input relativi ai parametri del suolo e della neve, contenenti tutte le costanti (ad es. la potenza degli strati sottosuperficiali, il tipo di vegetazione) e le variabili (ad es. il contenuto in acqua e ghiaccio, la temperatura dei diversi strati del suolo) per caratterizzarli. Per l'elaborazione il sottosuolo è stato diviso in 18 strati fino a 25 m di profondità (con vari spessori, da 0.1 m in superficie, a 3.0 m in profondità), simulando i seguenti parametri: temperatura iniziale, contenuto iniziale dei diversi componenti in volume (ghiaccio, acqua, vuoti e suolo), densità, conduttività termica, capacità termica e granulometria. Per la parametrizzazione della superficie

eas (Lehning, et al, 2006). It comprises several modules that simulate the snow carpet, the soil and vegetation, the movement of snow with the wind, radiative flows and outflows; in particular, it develops a radiative balance by applying a view factor approach to the calculation of short-wave and long-wave radiation, also taking into account the short-wave reflection and the long-wave emission on complex soils (Fierz, et al, 2003), and it uses a model of snow transport on impervious grounds for the calculation of the snow carpet redistribution.

The Alpine 3D model has been modified throughout the years; its original 2005 features have been changed, the input data have acquired a wider basis, which sometimes resulted in considerable variation of the results.

Sources of information

The 3D Alpine Model is based on meteorological information, land use map and the corresponding land type and the Digital Terrain Model (DTM).

The necessary input data are: rainfall, air temperature, humidity, wind speed, reflected and

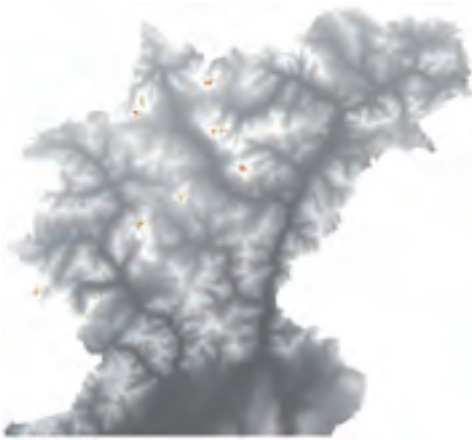


Figura 2. Regione Veneto - Permafrost probabile (rosso) e possibile (verde) per l'intero periodo di calcolo dal 2000 al 2009. *Picture 2. Veneto Region Caption - Probable (red) and possible (green) permafrost for the whole calculation period running from 2000 to 2009.*

sono stati considerati l'altezza della chioma, l'indice di area fogliare (Leaf Area Index - LAI) delle chiome, la frazione di precipitazione che giunge al suolo dopo aver attraversato le chiome degli alberi (throughfall), l'albedo superficiale. Nel bacino del Cordevole, alle quote dove è possibile avere presenza di permafrost, le categorie di uso del suolo più rappresentate sono la roccia e le praterie di alta quota; ciò significa che alcuni processi quali l'intercettazione non sono stati considerati. Per tale motivo i primi 3 parametri sono stati posti rispettivamente pari a 0 (altezza chioma) o 1 (LAI e throughfall). L'albedo, importante per il bilancio radiativo, varia con la categoria di uso del suolo. Queste informazioni necessarie per l'inizializzazione del modello sono state prese dalla mappa di uso del suolo e dalla carta geologica (cella 150 m); infine è stato utilizzato il DEM per la regione con cella a 25 m e ricampionato a 150 m.

Analisi e risultati

La simulazione è stata condotta considerando gli ultimi 11 anni, dal 1998 al 2009. In questo lavoro solamente il parametro di temperatura del suolo è stato utilizzato come indicatore di permafrost. La temperatura di inizializzazione degli strati di suolo è stata posta pari a -1°C . Sostanzialmente è stato ipotizzato che all'inizio della simulazio-

incident visible radiation and long-wave incident radiation (or cloudiness). These data have been taken from a 44 stations selected in the Veneto region, which are managed by ARPAV. The model has been initialised through input files on snow and land parameters that contain all the constants (such as the strength of the underground layers, the type of vegetation) and variables (such as the volume of water and ice, the temperature of the various land layers) in order to characterise them. For the purpose of elaboration, the substratum has been divided into 18 layers of up to 25 m. depth (featuring various levels of depth, from 0.1 to 3.0 m.) and the following parameters have been simulated: initial temperature, initial volume of the different components (ice, water, spaces and land), density, thermal conductivity, thermal capacity and granulometry. For the parameterisation of the surface, the following elements have been taken into account: height of the foliage, Leaf Area Index (LAI) of the foliage, the portion of rainfall reaching the ground after passing through the foliage (throughfall), superficial pith. In the Cord-evole basin areas, where a presence of permafrost is likely, the main land use categories are rock and high-altitude prairies; consequently, a certain type of processes such as interception have not been considered. For this reason, the first three parameters have been respectively set at 0 (foliage height) or 1 (LAI and throughfall). The pith, which plays an important role for the radiative balance, varies according to the land use category. These important data for the initialisation of the model have been taken from the land use map and from the geological map (cell 150 m.); finally, the DEM has been used for the region with cell at 25 m, and it has been later re-sampled at 150 m.

Analysis and results

The simulation has taken into account the last 11 years, from 1998 to 2009. During the study, the only permafrost indicator has been the land temperature parameter. The initialisation temperature of the land layers has been set at -1°C . Essentially, the hypothesis has been that of a land fully covered in permafrost at the beginning of the simulation; gradually, weather conditions have affected the distribution of permafrost by reducing its extension. Had the thermal values

ne tutto il territorio fosse coperto da permafrost; progressivamente, le condizioni meteorologiche hanno influenzato la distribuzione del permafrost con la riduzione della sua estensione. Con valori termici più bassi la superficie a permafrost sarebbe rimasta invariata.

Questo approccio è basato sul fatto che il permafrost esisteva già in alcune zone prima dell'inizio della simulazione.

L'output giornaliero del modello che contiene le temperature del suolo a 9 m (lo strato attivo sulle Alpi varia fra 0.5 e 9 m) è stato analizzato applicando i seguenti criteri.

Le celle, poste a 9 metri, sono state classificate come:

- permafrost probabile, quando presentavano temperature minori o uguali a -1°C per l'intero periodo di calcolo di 11 anni, oppure per un anno idrologico. (specificare cosa si intende per anno idrologico);
- permafrost possibile, quando presentavano temperature minori o uguali a -1°C per una durata pari al 50% del periodo in analisi, partendo dal presupposto che un breve periodo di riscaldamento non è in grado di rimuovere il permafrost esistente, specie in presenza di ghiaccio;
- permafrost probabilmente non esistente, quando le celle non presentavano queste caratteristiche termiche.

La soglia di -1°C è stata scelta per cautelarsi da eventuali fluttuazioni dovute al modello o a interpolazioni e per garantire che il regime termico analizzato sia proprio dovuto a presenza di permafrost. Dai risultati delle prime simulazioni, non è emersa presenza di permafrost nella zona sud-occidentale della regione, quindi l'area di analisi è stata ridimensionata, considerando solamente la zona montana settentrionale, corrispondente sostanzialmente alla zona dolomitica e riducendo a 32 le stazioni analizzate, diminuendo, in questo modo, i tempi di calcolo.

Come si evidenzia dalla tabella allegata (FIG:XX), su una superficie complessiva di 3027.5 km^2 , comprendente la parte settentrionale della Regione Veneto, un'area totale di 2.2 km^2 è risultata essere coperta da permafrost probabile per l'intero periodo della simulazione (Ottobre 1998-Settembre 2009), a cui si sommano 5.3 km^2 di superficie con valori termici inferiori o uguali a -1°C per il 50% del periodo (perma-

been lower, the permafrost surface would have remained unchanged.

This approach is based on the fact that permafrost already existed in some areas before the simulation.

The daily output of by the model presented temperatures at 9 m. (the active layer on the Alps is in the range between 0.5 and 9 m.) and has been analysed according to the following criteria:

The cells, located at 9 m, have been classified as follows:

- *probable permafrost, if they returned temperature values of -1°C or lower for the entire 11-year research season or for a hydrological year. (please define hydrological year)*
- *possible permafrost, with a temperature of -1°C or lower for at least half of the duration of the research period, on the basis of the fact that a short heating period cannot remove the existing permafrost, especially in presence of ice;*
- *probable non existing permafrost, when the cells did not present the above technical features.*

The -1°C threshold was chosen in view of the potential model variations or interpolations and in order to ensure that the analysed thermal conditions are directly linked to the presence of permafrost. The first simulations have not shown any presence of permafrost in the southwestern part of the region. Consequently, the area of study has been modified to focus on the northern mountain region (essentially, the Dolomites area); the number of analysed stations has been decreased to 32 with a consequent reduction of the calculation time.

As illustrated in the annexed table (PICTURE: XX), within the northern part of the Veneto region, with a total surface of 3027.5 km^2 , the area covered with probable permafrost amounted to 2.2 km^2 during the simulation period (October 1998-September 2009), with a further surface of 5.3 km^2 that featured a temperature of up to -1°C for half of the simulation period (possible permafrost). Table XX illustrates the results related to the single hydrological years that have also been analysed. The first year was considered as a preparatory stage and was therefore not included in the results, on the basis of the supposition that the initial temperature of the

frost possibile). L'analisi è stata effettuata anche per i singoli anni idrologici e i risultati sono riportati in tabella XX. Non è stato considerato il primo anno a causa della fase di spin-up del modello, poiché si è presunto che tutto il territorio avesse una temperatura iniziale inferiore a -1°C . Dalla fine del secondo anno, sono stati raggiunti dei valori di superficie a permafrost, rimasti abbastanza stabili fino all'estate torrida del 2003, quando si nota una diminuzione dell'area a permafrost probabile (4.0 km^2) e possibile (0.9 km^2). In seguito non si sono osservate ulteriori significative perdite e anzi si è visto un incremento dell'area a permafrost fino a stabilizzarsi negli ultimi anni intorno a valori pari a $4\text{-}5\text{ km}^2$ per il permafrost probabile e $2\text{-}4\text{ km}^2$ per quello possibile. Queste aree sono confinate alle quote più elevate dei settori dolomiti (vedi fig. 4.3).

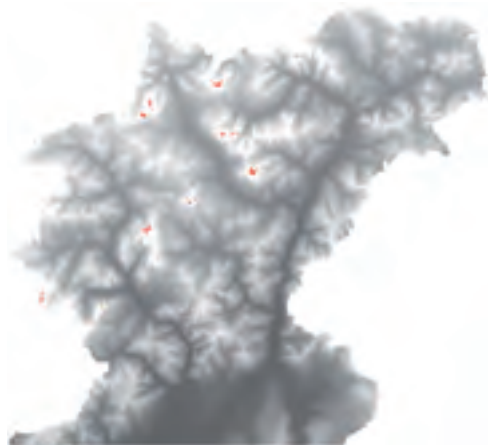


Figura xx. Permafrost probabile (rosso) e possibile (verde) per l'anno idrologico 2003/04.
Picture xx. Probable (red) and possible (green) permafrost for hydrological year 2003/04

Tabella x.x: Distribuzione annuale del permafrost nella Regione Veneto
Table x.x: Yearly distribution of permafrost in Veneto Region

Anno Year	Permafrost probabile Possible permafrost	Permafrost possibile Probable permafrost
10.2008 - 09.2009	4.3 km ² (192 celle)	3.9 km ² (177 celle)
10.2007 - 09.2008	4.6 km ² (205 celle)	2.8 km ² (125 celle)
10.2006 - 09.2007	5.2 km ² (229 celle)	1.9 km ² (84 celle)
10.2005 - 09.2006	5.2 km ² (229 celle)	4.7 km ² (211 celle)
10.2004 - 09.2005	3.9 km ² (176 celle)	2.4 km ² (106 celle)
10.2003 - 09.2004	4.0 km ² (178 celle)	0.9 km ² (40 celle)
10.2002 - 09.2003	6.1 km ² (271 celle)	4.1 km ² (184 celle)
10.2001 - 09.2002	7.4 km ² (330 celle)	4.6 km ² (206 celle)
10.2000 - 09.2001	8.3 km ² (367 celle)	2.7 km ² (118 celle)
10.1999 - 09.2000	9.9 km ² (438 celle)	22.3 km ² (993 celle)
10.1998 - 09.1999	10.0 km ² (448 celle)	760.7 km ² (33809 celle) spin-up
10.2000 - 09.2009	2.2 km² (99 celle)	5.3 km² (234 celle)

CARTA REGIONALE DEL PERMAFROST POTENZIALE: MODELLO STATISTICO

Introduzione

I ricercatori dell'Università di Zurigo, partendo dall'inventario delle evidenze del permafrost, hanno prodotto una Mappa del Permafrost alpino (APM) applicando il modello statistico APMOD (Alpine Permafrost Model) (Boeckli et al., 2011). In assoluta coerenza con questa, è stato prodotto un GIS-layer della distribuzione stimata del permafrost nella Regione Veneto.

Il modello APMOD

La base per il funzionamento di APMOD sono le evidenze della presenza o assenza di permafrost sul territorio, già brevemente descritte in questa pubblicazione (Par.x.x). Il modello APMOD comprende due sub-modelli: uno per le aree a detrito (debris model) e uno per le aree estreme in roccia (rock model). Il debris model utilizza un modello lineare misto per predire la probabilità di rock glacier intatti rispetto a quelli relitti, utilizzando l'inventario dei rock glacier. Il rock model si basa sulla regressione lineare e simula la probabilità di temperatura media annuale superficiale della roccia (MARST) al suolo inferiore a 0°C per roccia madre scoscesa. Le variabili esplicative potenziali sono: la radiazione solare incidente potenziale, la temperatura media annuale e la precipitazione media annuale, derivate rispettivamente dal modello digitale del terreno dall'archivio dello ZAMG (Central Institute for Meteorology and Geodynamics) e dalla bibliografia esistente (Efthymiadis et al, 2006). I sub-modelli necessitano di ulteriori informazioni per riconoscere le aree a detrito, che non sono rock glacier, e le pareti in roccia sub-verticali. Per questo è stato applicato un offset termico (correzione di temperatura), derivato da pubblicazioni esistenti che descrivono quanto più caldi o freddi sono certi tipi di suolo rispetto a quanto stima il modello (Hasler et al., 2011). Poiché l'introduzione di questo offset ha un certo grado di soggettività, il risultato del modello non è una probabilità, ma un indice di permafrost (I) che fornisce un'informazione potenzialmente utile a chi si occupa della gestione del territorio del tipo "dove ho necessità di prendere in considerazione che ci sia permafrost", in base alle condizioni termiche. Rispettivamente con colori blu/viola sono state

entire land was lower than -1°C. Starting from the end of the second year, some permafrost surface values were obtained, which remained unvaried up until the hot summer of 2003, when the probable permafrost area decreased to 4.0 km² and the possible permafrost area to 0.9 km². No other significant reduction was observed; on the contrary, the area affected by permafrost increased and reached a steady level in the last few years, with a probable permafrost surface of 4-5 km² and a possible permafrost surface of 2-4 km². These values are merely referred to the highest altitude areas of the Dolomites (see Picture 4.3).

REGIONAL MAP OF POTENTIAL PERMAFROST: STATISTICAL MODEL

Introduction

Starting from the register of permafrost occurrences, the researchers of Zurich University have created an Alpine Permafrost Map (APM) by applying the APMOD (Alpine Permafrost Model) (Boeckli et al., 2011). A GIS-layer of the estimated permafrost distribution in Veneto Region has also been created in connection with the above map.

The APMOD Model

The main principle of the APMOD model is based on the evidence of presence or absence of permafrost on the territory, as already described herein (Par.x.x). The APMOD model comprises two sub-models: one for debris areas (debris model) and one for steep rock faces (rock model). For the debris model, a generalised linear mixed-effect model was used to predict the probability of a rock glacier being intact as opposed to relict through the use of the rock glacier register. The rock model is based on the linear regression and simulates the probability of mean annual rock surface temperature (MARST) lower than 0°C on the steep source rock. The potential explanatory variables are: potential incoming solar radiation (PISR), the average annual temperature and the average annual rainfall, as derived from the terrain's digital mode from the ZAMG archive (Central Institute for Meteorology and Geodynamics) and existent bibliography (Efthymiadis et al, 2006). In order to identify the debris-covered areas, which are not rock

indicate in fig. 4.4 le aree che il modello ha reputato essere caratterizzate da permafrost in tutte le condizioni ($I > 0.9$), quelle magenta solo in condizioni fredde ($I > 0.5$), mentre il giallo copre le zone in cui il permafrost è probabile solo in condizioni molto fredde ($I > 0.1$).

Fattori locali come la composizione del materiale sottosuperficiale e la presenza o assenza di neve, sono stati solo parzialmente considerati nel modello e hanno potuto determinare notevoli variazioni delle condizioni termiche nel suolo a parità di condizioni topografiche. A questo proposito una guida interpretativa basata sulle diverse caratteristiche del suolo (granulometria del detrito, porosità, posizione lungo il versante, omogeneità e compattezza della roccia) e della componente vegetazionale è stata fornita unitamente ai risultati del modello al fine di rifinire la stima derivante dalla mappa.

I risultati

L'Università di Zurigo ha fornito due mappe con l'indice del permafrost, la prima derivante da un DEM a 25 m e da Immagini Landsat, la seconda utilizzando una mappa di uso del suolo fornita dalla Regione Veneto. Le due mappe differiscono solo in minima parte e soprattutto perché in quella derivante dalla mappa di uso del suolo veneta l'estensione dei ghiacciai (considerate non a permafrost) è maggiore, a causa della diversa origine della digitalizzazione delle mappe.

Nella tabella sottostante sono riportate le aree per rispettivi valori dell'indice di permafrost, nonché l'area relativa, riferita all'area totale della Regione Veneto (di circa 18413 km²) e il limite altitudinale inferiore.

Tabella x.x: Indice di permafrost; area e limite altitudinale
Table x.x: Permafrost index; area and altitude limit

Indice di permafrost <i>Permafrost index</i>	Area (km ²) <i>Area</i>	Area relativa (%) <i>Relative area</i>	Quota minima (m) <i>Lowest altitude</i>
≥ 0.1	112.08	0.61	1932
≥ 0.5	29.63	0.16	2188
≥ 0.9	4.96	0.03	2508

glacier, and the near-vertical rock faces, the sub-models need more information. For this reason, a thermal offset was employed (temperature correction), as derived from existing publications describing how colder or warmer some kind of terrains are in respect to the model's estimate (Hasler et al., 2011). As the introduction of such an offset has a degree of subjectivity, the result of the model does not represent a probability, but an index of permafrost presence (I) supplying some potentially useful information to whoever operates in the territory and needs an answer to the question: "where do I need to take into account the presence of permafrost?" according to the temperature. According to the model, areas in blue/purple in picture 4.4 present permafrost in nearly all conditions ($I > 0.9$), areas in magenta present permafrost only in cold conditions ($I > 0.5$), whereas in yellow areas the presence of permafrost is only possible when conditions are very cold ($I > 0.1$).

Local factors, such as composition of the sub-surface terrain and presence or absence of snow, have only been partially considered by the model and could only bring on significant thermal variations on the soil in the presence of identical topographic conditions. Taking this into account, and with a view to permit a better evaluation of the estimates in the map, a guide was drafted to allow interpretation of the results in relation to different soil specifications (debris granulometry, porosity, position of the soil, rock homogeneity and compactness) and the vegetation.

Outcomes

Zurich University issued two maps featuring permafrost index. The first is based on a 25m. resolution DEM. and Landsat pictures, the second is based on a land use map supplied by Veneto region. The slight difference between the two maps is related to the fact that in the land use map of Veneto the non permafrost glaciers surface is wider because of the different digitalization process of the map itself.

The table below illustrates the areas according to their permafrost index and the relative areas in relation to the total surface of Veneto Region (approximately 18413 km²) and the lowest altitude.

It is clear how the area presumably interested by the presence of permafrost in all conditions

Si nota come l'area presumibilmente interessata da permafrost a tutte le condizioni termiche si avvicini a 5 km^2 , che costituisce meno del 0.03% del territorio regionale, valore molto vicino all'estensione trovata anche dal modello idrometeorologico Alpine 3D per il permafrost probabile. Naturalmente il permafrost è confinato alle quote elevate, prevalentemente sopra i 2500 m, soprattutto sulle alte creste dolomitiche, come si nota dalla mappa fig.4.4.

Potrebbe essere oggetto di futura ricerca in un prossimo futuro un confronto fra i due modelli, per valutare eventuali similitudini o discordanze in termini di localizzazione delle aree interessate da permafrost, soprattutto in funzione di altitudine ed esposizione, magari anche procedendo alla verifica in campo dei risultati forniti dai due modelli.

nears 5 km^2 , which makes up for less than 0.03% of the Veneto region. This figure is very similar to the figure calculated by the Alpine 3D hydro-meteorology model for the possible permafrost presence. Obviously, the presence of permafrost is confined to higher altitudes, mainly over 2500 m., particularly on the Dolomites' peaks (see picture 4.4.)

A comparison between the two models could be the subject of future research, in order to investigate matches or discordances in the localisation of the areas interested by the presence of permafrost, particularly according to altitude and exposure, perhaps carrying out a practical check of the results arising from both models.

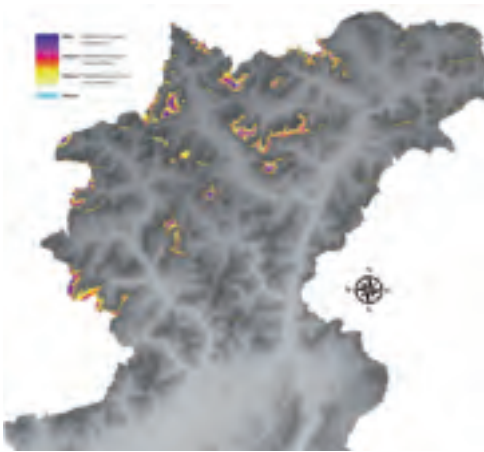


Fig. 4.4- Mappa dell'indice del permafrost per la Regione Veneto.

Picture 4.4- Map of the permafrost index of Veneto Region.

6. Rischi naturali e Permafrost

Permafrost and natural dangers

METODI DI INGAGINE

Fotointerpretazione

La fotointerpretazione è una tecnica basata sull'elaborazione di immagini aeree o terrestri, nata mediante analisi con tecniche fotografiche classiche ed ora completamente digitalizzata (Brabb 1984, Mantovani et al 1996). Un'immagine terrestre è composta dalla sovrapposizione di diversi strati informativi. L'individuazione, la classificazione e la mappatura erano originariamente gestite tramite doppi strumenti oculari di fotorilevamento. La stereoscopia oculare era prettamente visiva e manuale. Ora la tecnica digitale ha individuato e automatizzato algoritmi con cui impostare la sincronizzazione stereoscopica e la visione tridimensionale dell'oggetto (foto_tecniche.tif).

La fotointerpretazione è la raccolta sistematica di informazioni georiferite secondo degli obiettivi e dei criteri predeterminati, attraverso l'utilizzo di immagini prese a distanza, in genere aeree o satellitari. L'attività richiede un'esperienza tecnica preliminare e una conoscenza del contesto scientifico in analisi (nel caso di studio l'individuazione di eventi franosi), degli elementi geometrici che compongono il territorio in osservazione, a partire dalle immagini a disposizione.

La prima fase dell'attività prevede una iniziale ricognizione del territorio da interpretare, sfruttando le informazioni contenute nei dati, utilizzando fattori di zoom che consentano di ottenere una visione di insieme dell'area in esame. In tal caso la risoluzione e la scala di indagine svolgono un ruolo fondamentale. Dopo aver preso familiarità dal punto di vista morfologico con il territorio di indagine, si può passare a un'indagine dettagliata dei vari elementi. La procedura è dunque riassumibile in tre fasi:

- Fotolettura: riconoscimento degli oggetti visibili sul quadrante fotografico (scala e oggetto visi-

RESEARCH METHODS

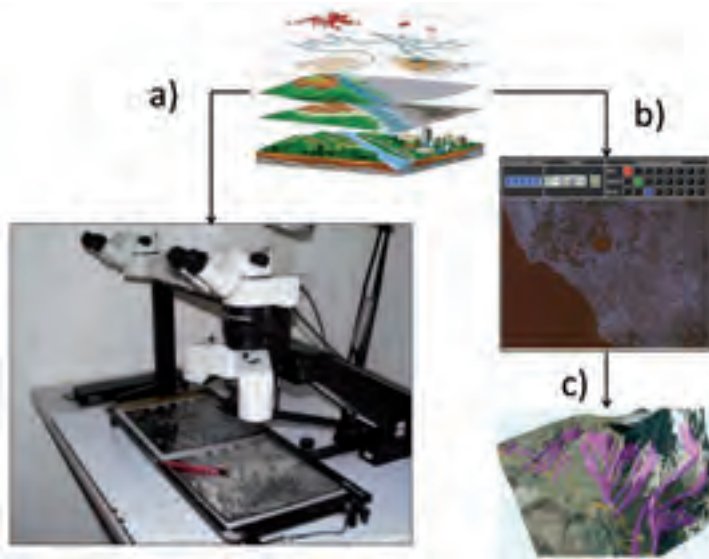
Photointerpretation

Photo-interpretation is a technique based on the elaboration of terrestrial and aerial images. Originally, it was based on traditional photographic techniques, whereas today it has become entirely digital. (Brabb 1984, Mantovani et al 1996). A terrestrial image is made of several superimposed layers. In the past, the identification, classification and mapping were carried out through the use of double ocular photo-sensing instruments. Ocular stereoscopy was entirely visual and manual. Nowadays, new digital techniques allow the creation and automation of algorithms aimed at setting a stereoscopic synchronisation and three-dimensional vision of the object (foto_tecniche.tif).

Photo-interpretation involves the systematic collection of data georeferenced according to predefined objectives and criteria, through the use of images taken from a distance, normally aerial or satellite images. This activity requires a previous technical experience as well as an adequate knowledge of the research context (in the present case of study, the detection of landslides) and of the geometrical elements characterising the research territory, starting from the available images.

The first stage involves an initial analysis of the research territory through the study of the available data and the use of zooming techniques that provide an overview of the research area. In this stage, the resolution and the research scale play a crucial role. After familiarising with the morphological aspects of the research territory, the following stage involves a more detailed analysis of its particular features. The procedure therefore consists in three stages:

- *Photo-reading: the identification of visible ob-*



foto_tecniche.tif. Un'immagine terrestre è composta dalla sovrapposizione di diversi strati informativi. a) La tecnica stereoscopica originale, b) la tecnica interpretativa digitale, c) le forme individuate vengono automaticamente immagazzinate come elementi digitali, dotati di geometrie e attributi informativi.

foto_tecniche.tif. A terrestrial image is made of several superimposed layers. a) The traditional stereoscopic technique, b) the digital interpretation technique, c) the detected images are automatically stored as digital elements, with their own particular geometries and features.

bile dipendono dai fini interpretativi)

- **Analisi:** determinazione dei parametri geometrici e delle caratteristiche fisiche degli oggetti analizzati
- **Interpretazione:** definizione dei rapporti tra i singoli oggetti analizzati e conseguentemente ricostruzioni delle geometrie non direttamente visibili

Il processo di interpretazione ed analisi comporta una successiva geometrizzazione e mappatura degli oggetti acquisiti. La digitalizzazione delle forme (features) riconosciute rende disponibile l'analisi geo-spaziale dell'informazione e conseguentemente la resa cartografica richiesta. Un approccio metodologico per il modello fotointerpretativo è descritto nella Figura photointerpretatione.jpg.

All'interno delle scienze della Terra, le foto aeree, le immagini satellitari e le immagini radar sono le componenti fortemente più utilizzate. Le foto aeree sono ampiamente sfruttate nelle analisi da frana poiché occupano un chiaro strumento interpretativo (qualitativo e quantitativo) e sono

jects on the photographic frame (the scale and the visible object vary according to interpretation purposes)

- **Analysis:** the determination of the geographical and physical features of the researched objects.
- **Interpretation:** the definition of the relationship between the single analysed object and reconstruction of the geometries that are not directly visible.

The interpretation and analysis process further involves the mapping and geometrisation of the acquired objects. The digitalization of the detected features provides the geo-spatial analysis of the acquired information, and therefore the required cartographic outcome. Picture photointerpretatione.jpg illustrates a methodological approach to the photo-interpretation model.

Aerial photographs, satellite and radar images represent the most important elements of the sciences of the Earth. Aerial photographs are particularly important for the analysis of landslides because they are a clear interpretation

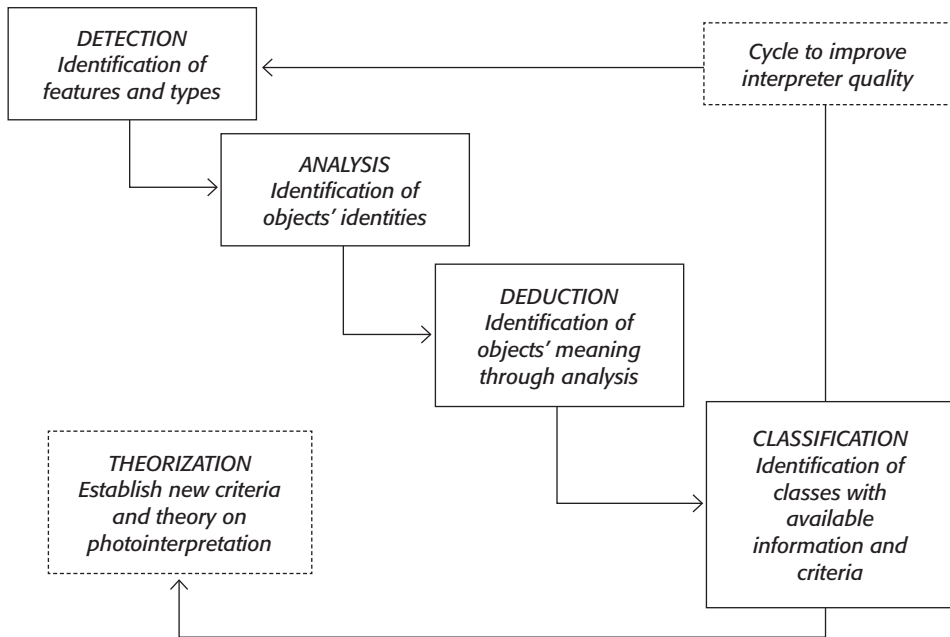


Figura photointerpretazione.jpg. Schema concettuale del ciclo fotointerpretativo.
 Picture photo-interpretatione.jpg. Conceptual scheme of the photo-interpretation cycle.

il tipo di dato più usato in ambito del telerilevamento (*remote sensing*). Per la loro disponibilità, per la loro qualità ed accessibilità (*user-friendly*), le immagini aeree sono impiegate nella maggior parte dei progetti riguardanti eventi a diversa scala e a diversa risoluzione.

Nel progetto è stata completata un'analisi geometrica delle aree in dissesto con digitalizzazione di eventi franosi in aree a quote superiori ai 2.000 m mediante fotointerpretazione aerea (sequenza Ortofoto digitali a colori Terraltaly it2000 NR volo 2006-2007). Oltre a una valutazione globale del territorio sono state identificate zone omogenee caratterizzate da un particolare contesto franoso (localizzazione, dimensioni, forma), dal quale si è passati a un'identificazione più specifica del singolo evento e alla sua caratterizzazione geometrica e informativa.

Inizialmente si è proceduto a un identificazione dell'area e del contesto morfologico confrontando una mosaicatura delle ortofoto disponibili con un modello digitale del terreno a risoluzione 10m (fig. foto_pre.tif).

tool (both from a qualitative and quantitative point of view) that is most frequently used in the remote sensing sector. Due to their availability, their quality and their accessibility, aerial photographs are mostly used for projects involving events with different scales and resolutions.

The project involved a geometrical analysis of the unstable areas and the digitalisation of the landslide events in areas with an altitude of 2000m or higher through aerial photo-interpretation (digital coloured orthoimage sequence Terraltaly it2000 flight 2006-2007). After a global analysis of the territory, the study has identified a number of homogeneous areas featuring a particular landslide context (location, size, shape), to later proceed to the identification of the single events and their geometrical and general features.

At the beginning, the area and its morphological context were identified through a comparison between a patchwork of the available orthoimages and a 10m resolution digital model of the land (Picture foto_pre.tif).

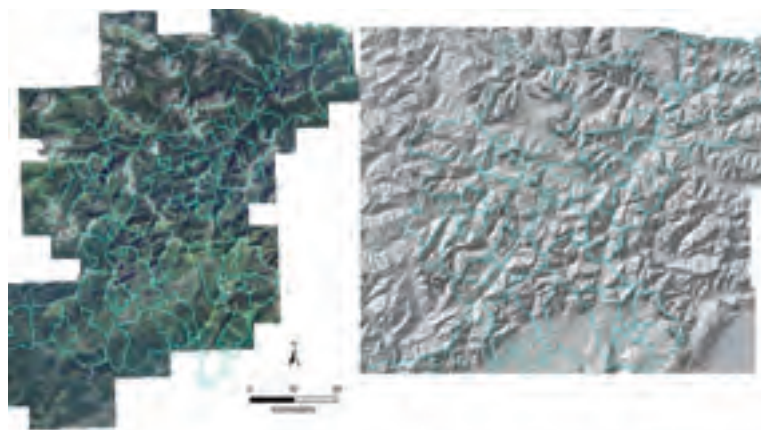


fig. foto_pre.tif. Inquadramento morfologico dell'area bellunese utilizzando una mosaicatura automatica da Ortofoto it2000 e creazione di un DEM 10m. Nella parte destra della figura è dato risalto ad ombre ed esposizioni (hillshade). I contorni azzurri rappresentano i confini comunali bellunesi.

picture. foto_pre.tif. Morphological overview of Belluno area through an automatic orthoimage patchwork it2000 and creation of a DEM 10m. Rightside of the picture shadows and expositions are highlighted (hillshade). The light blue contours represent the borders of the Belluno municipality.

A tale fase è seguita la reale interpretazione a scala 1:5000, utilizzando come base di confronto il database IFFI¹ relativo a eventi passati archiviati. Il database IFFI offre uno strumento di correlazione, ma essendo definito a scala 1:10000 su base Carta Tecnica Regionale, riscontra dettagli non visibili a scale più dettagliate. Ulteriore differenza è rappresentata dalla quota di rilevazione. La fase di individuazione delle aree in frana, per gli obiettivi del progetto, è stata focalizzata a quote superiori ai 2000 m, mentre IFFI copre ogni area inclusa in frana, indipendentemente dalla quota. Nella foto frane_comparate.tif è rappresentato un esempio del confronto sistematico che è stato eseguito, su ogni quadrante di foto aerea, tra elementi storicamente presenti in database IFFI e la reale fotointerpretazione. Si rilevano due tipi di relazioni oltre i 2000 m. Nel primo quadrante a sinistra sono state catalogate le nuove zone in frana oltre a quelle presenti nella banca dati spa-

The next phase involved the real interpretation on a 1:5000 scale, using the IFFI database on past events¹ as a comparison. Although the IFFI database can certainly represent a useful comparison instrument, its 1:10000 scale on Regional Technical Map highlights a number of details that are not visible on a higher scale. The surveyed altitude of the database also differs from the scale used. For the purposes of the project, in fact, the altitude of the researched landslide areas was higher than 2000 m, whereas the IFFI database covers all landslide areas, irrespectively of their altitude. Picture landslides_comparate.tif illustrates an example of the comparison that was made on each frame of the aerial pictures between the items of the IFFI database and the real photo-interpretation. On altitudes over 2000 m, two different relation types have been detected. The first frame to the left illustrates the new landslide areas that are not present

1. Progetto nazionale di inventario dei fenomeni franosi (Progetto I.F.F.I.). In Regione Veneto l'attività è svolta dalla Direzione Difesa del Suolo e Protezione Civile in collaborazione con la Direzione Geologia e Ciclo dell'Acqua. Le attività del progetto sono di competenza del Dipartimento Difesa del Suolo - Servizio Geologico d'Italia dell'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici (APAT). Link: <http://www.sinanet.apat.it/progettoiffi>

1. Italian Landslide Inventory Project (I.F.F.I. Project). In Veneto Region this activity is carried out by the Land Protection Department of the Civil Defence, in cooperation with the Geology and Water Cycle Department. The Land Protection Department - Italian Geological Service of the Agency for the Protection of Environment and for Technical Services (APAT) - is in charge of the activities of the project. Link: <http://www.sinanet.apat.it/progettoiffi>

ziale. Tale asincronia può derivare da due cause: una mancanza di dati IFFI nella singola particella studiata a discapito degli elementi rilevati da fotointerpretazione oppure una serie di eventi morfologicamente assenti durante la costruzione della banca dati IFFI. Nel secondo riquadro sono stati riportati, invece, gli eventi individuati con la fotointerpretazione che coincidono con molti centroidi presenti in banca dati IFFI. Tale omogeneità rileva la presenza di movimenti (in gran parte accumulo/falda di detrito) in continua attività.

Interferometria differenziale

I radar sono sensori attivi in grado di trasmettere un segnale di energia elettromagnetica e di registrare e misurare l'eco prodotta dagli oggetti, che ne vengono investiti (Henderson e Lewis, 1998). I sistemi progettati per la produzione di immagini operano nella porzione delle microonde dello spettro elettromagnetico, oltre le regioni del visibile, del termico e dell'infrarosso e, generalmente, si servono di lunghezze d'onda che vanno da pochi millimetri a qualche decina di centimetri. I SAR (Synthetic Aperture Radar) sono radar trasportati su piattaforme aeree o spaziali in grado di riprendere vaste aree della superficie terrestre. Un'immagine è formata da un mosaico di pixel ad ognuno dei quali è associato una cella di risoluzione sul terreno. In ogni pixel è rinchiusa

in the database. This asynchrony may derive from two factors: the lack of IFFI data on the single studied element that was detected by the photo-interpretation process or a series of morphological absent events during the creation of the IFFI database. The second frame illustrates the events detected by the photo-interpretation process coinciding with the centroids contained in the IFFI database. Such homogeneity shows the presence of continuously active movements (mainly the accumulation/layering of debris).

Differential interferometry

Radars are active sensors that are able to transmit an electromagnetic signal and to record and measure the echo produced by the affected objects (Henderson and Lewis, 1998). The radar system operates in part of the microwave region of the electromagnetic spectrum, beyond the visible, thermal and infrared region, normally using wavelengths ranging from few millimetres to tens of centimetres.

Synthetic Aperture Radars (SAR) are airborne or spaceborne radars that are able to sense vast areas of the Earth surface. Images they produce are made of a series of pixels, each one of which is associated to a resolution cell on the land. Each pixel contains information on the width (radiometry) and on the phase of the reflected radiation coming from the corresponding cell. The radio-

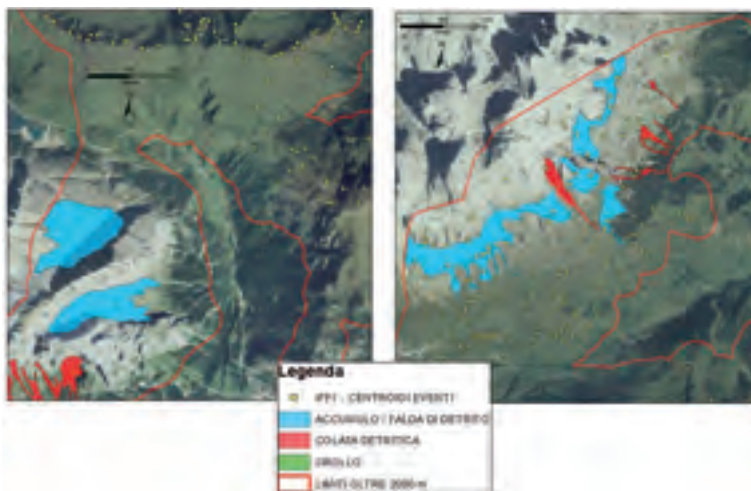


Fig. frame_comparate.tif. Esempi di relazione tra eventi derivanti da fotointerpretazione e dati storici.

Picture landslides_comparate.tif. Examples of relations between elements of photo-interpretation and historical data.

l'informazione sull'ampiezza (radiometria) e sulla fase della radiazione riflessa, proveniente dalla corrispondente cella. L'analisi radiometrica ci permette di estrarre utili informazioni sulle caratteristiche dielettriche del bersaglio, la rugosità della sua superficie, le sue dimensioni e l'orientazione rispetto al segnale incidente. La misura della fase, o meglio della differenza di fase tra il segnale trasmesso e quello ricevuto, ci consente invece di risalire alla distanza che separa il radar da ogni singolo pixel immagine.

In realtà la misura della fase di una singola immagine SAR non ci permette di stimare correttamente la distanza sensore-bersaglio, per effetto della presenza di un termine di riflettività sconosciuto. La ricombinazione casuale del segnale riflesso dai molteplici bersagli, contenuti all'interno di una medesima cella di risoluzione, produce infatti un contributo di fase aleatorio e pertanto non quantificabile.

L'interferometria è una tecnica che permette di risolvere questo problema valutando, per ogni pixel, la differenza di fase tra due immagini SAR successive acquisite da geometrie di ripresa simili, definite rispettivamente master e slave (figura aa).

Attraverso un processo di registrazione, le immagini vengono sovrapposte e ricampionate di modo che pixel, rappresentativi delle medesime celle di risoluzione sul terreno, risultino perfettamente sovrapposti. La differenza di fase si ottiene dalla moltiplicazione complessa e coniugata del segnale retrodiffuso e il prodotto finale prende il nome di interferogramma. Supponendo che tra le successive acquisizioni ogni cella preservi

metric analysis provides useful information on the dielectrical characteristics of the targets, the roughness of its surface, its size and the orientation towards the incidental signal. Through measuring the phase, or more precisely the phase difference between the transmitted and received signals, it is possible to calculate the distance between the radar and the single image pixels.

The measurement of the phase of a single SAR image does not actually provide a precise estimate of the distance between the sensor and the target because of the presence of an unknown reflectivity element. The random recombination of the signal reflected by the multiple targets contained inside the same resolution cell gives us a merely approximate contribution that we are essentially not able to quantify.

The interferometry technique helps us resolving this issue by assessing, for each pixel, the phase difference between to consecutive SAR images acquired by similar acquisition geometries, which are respectively defined as master and slave (Picture aa).

Thanks to the recording process, the images are superimposed and re-sampled so that the pixels representing the same resolution cells on the land are perfectly superimposed. The phase difference can be obtained by a conjugated and complex multiplication of the retro spread signal, and the final result is defined interferogram. Supposing that in the following acquisitions each cell preserves the same reflectors in the same identical positions, the interferometric phase does not have the random reflectivity term and can there-

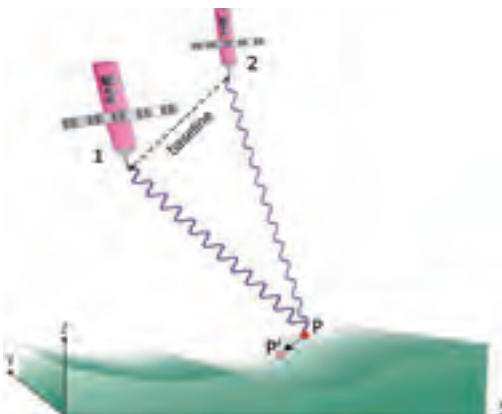


Figura aa. Geometria di ripresa dell'interferometria SAR. Uno spostamento del bersaglio P porta ad un cambiamento della distanza registrata dalla seconda acquisizione del satellite che si traduce in una variazione della fase del segnale di ritorno al radar (modificato da Riedel e Walther, 2008).

Picture aa. Acquisition geometry of SAR interferometry. The movement of target P causes a variation in the distance recorded by the second satellite acquisition, with a resulting variation of the phase of signal returning to the radar (as amended by Riedel and Walther, 2008).

i medesimi riflettori nelle identiche posizioni, la fase interferometrica risulta pertanto priva del termine di riflettività casuale e può essere associata alla distanza sensore-terreno.

In realtà la fase interferometrica Φ è il risultato del contributo di più termini che determinano delle differenze nella lunghezza del percorso di propagazione del segnale tra le due immagini e che sono stati riassunti di seguito:

$$\Phi = \Phi_{flat} + \Phi_{topo} + \Phi_{defo} + \Phi_{atmo} + \Phi_{noise}$$

dove:

Φ_{flat} : fase generata dalla curvatura della superficie terrestre,

Φ_{topo} : fase dovuta alla presenza di rilievi nell'area inquadrata,

Φ_{defo} : fase provocata dalle deformazioni avvenute tra le diverse acquisizioni,

Φ_{atmo} : fase generata dalle variazioni della velocità di propagazione del segnale nell'atmosfera,

Φ_{noise} : fase dovuta al rumore, per lo più termico, del sistema di acquisizione dati.

L'idea che sta alla base dell'interferometria differenziale SAR è quella di riuscire ad isolare il termine di fase dovuto esclusivamente alla deformazione. Per far ciò occorre eliminare o quantomeno ridurre tutti gli altri contributi.

Il termine Φ_{flat} può essere calcolato ed eliminato con la precisa conoscenza delle rotte o delle orbite percorse dalle piattaforme che trasportano i radar. La fase Φ_{topo} può essere rimossa creando un interferogramma sintetico generato a partire da un modello digitale di elevazione del terreno (DEM). Vale la pena sottolineare che il termine di fase legato alla topografia è strettamente dipendente dalla geometria di acquisizione delle immagini e decresce proporzionalmente alla riduzione della baseline spaziale (la distanza che intercorre tra i sensori durante l'acquisizione di una stessa area): se le riprese fossero condotte esattamente dalla stessa posizione, il contributo dovuto alla presenza del rilievo sarebbe nullo. Il termine Φ_{noise} può essere quasi del tutto eliminato attraverso l'uso di opportuni filtri in grado di isolare il rumore, mentre la fase atmosferica Φ_{atmo} non può essere calcolata in un singolo interferogramma senza la conoscenza di dettagliate informazioni spaziali sullo stato dell'atmosfera che normalmente non sono disponibili. Tale ter-

fore be associated to the distance between the sensor and the land.

The interferometric phase Φ is nothing but the result of the contribution of several terms determining a difference in the propagation path of the signal between the two images. These terms have been summarised as follows:

$$\Phi = \Phi_{flat} + \Phi_{topo} + \Phi_{defo} + \Phi_{atmo} + \Phi_{noise}$$

where:

Φ_{flat} *represents the phase originated from the curved surface of the Earth,*

Φ_{topo} *represents the phase originated from the presence of reliefs in the framed area,*

Φ_{defo} *represents the phase originated from the deformations that took place between the different acquisitions,*

Φ_{atmo} *represents the phase originated from the variations in the speed at which the signal propagated into the atmosphere,*

Φ_{noise} *represents the phase originated from the noise, mostly thermal, of the data acquisition system.*

SAR differential interferometry is based on the isolation of the phase term linked to the deformation. In order to do this, it is necessary to eliminate all the other phases.

The Φ_{flat} phase may be calculated and eliminated by obtaining precise information on the paths and orbits of the platforms transporting the radars. The Φ_{topo} phase may be eliminated by creating a synthetic interferogram starting from a Digital Elevation Model of the land (DEM). It is important to highlight that the Φ_{topo} phase is strictly related to the geometry of image acquisition, and decreases in proportion with the spatial baseline (the distance between the sensors during the same area acquisition): if the acquisition took place from the same exact position, the presence of the relief would have no contribution at all. The Φ_{noise} phase can be eliminated almost entirely through the use of adequate noise filters, while the Φ_{atmo} phase cannot be calculated in a single interferogram without obtaining precise details on the status of the atmosphere, which are normally not available. Such phase can therefore be assessed only from the quality point of view.

The effects arising from the variable weather

mine può essere quindi valutato solo qualitativamente.

Gli effetti dovuti alla variabilità delle condizioni atmosferiche tra le successive acquisizioni possono essere invece ridotti attraverso la mediazione statistica di una serie di interferogrammi con una procedura denominata *stacking* (Peltzer et al., 2001). In alternativa è necessario ricorrere a tecniche A-DInSAR (Advanced Differential SAR Interferometry), quali PS (Permanent Scatters) (Ferretti et al., 2001) o SBAS (Small Baseline Subset) (Berardino et al., 2002) per avere una stima più rigorosa del contributo di fase atmosferico e poterlo rimuovere quasi interamente.

I limiti all'applicazione dell'interferometria differenziale e la precisione nella misura delle deformazioni sono legati alla decorrelazione del segnale tra le successive acquisizioni che deteriora la qualità del dato. La decorrelazione è causata dalla incompleta rimozione della componente atmosferica, dall'inesattezza nella determinazione delle geometrie di acquisizione e nel DEM di riferimento, dal rumore del segnale, dai cambiamenti delle posizioni relative e delle proprietà dielettriche dei target individuali all'interno di una cella di risoluzione.

Il parametro che comunemente viene usato per valutare la qualità del dato interferometrico è la coerenza (Zebker e Villasenor, 1992): maggiore è la coerenza di un determinato pixel, migliore sarà l'informazione di fase da esso proveniente. La vegetazione, per esempio, riduce fortemente la coerenza facendo sì che la tecnica interferometrica diventi inapplicabile dopo un certo periodo di tempo (decorrelazione temporale), esattamente quello che accade quando, usando coppie di immagini con eccessiva baseline, le proiezioni lungo la linea di vista del sensore (line of sight) dei target all'interno della medesima cella di risoluzione diventano molto differenti (decorrelazione spaziale).

Altro fattore fortemente limitante all'applicazione dell'interferometria specialmente in aree montagnose è la presenza di ombre ed effetti di distorsione come il *layover* (inversione del rilievo topografico sul piano dell'immagine radar) generati dalla geometria di ripresa tipica dei sistemi radar. Nelle zone d'ombra e di *layover* non è possibile attuare l'analisi interferometrica.

Nel corso del progetto PermaNet l'elaborazione interferometrica differenziale è avvenuta appli-

conditions in the next acquisitions can be minimized by a procedure called stacking, which involves the statistical mediation of a series of interferograms (Peltzer et al., 2001). Alternatively, it may be necessary to use certain A-DInSAR techniques (Advanced Differential SAR Interferometry), such as PS (Permanent Scatters) (Ferretti et al., 2001) or SBAS (Small Baseline Subset) (Berardino et al., 2002) in order to obtain a more precise estimate of the atmospheric phase contribution and to therefore remove it almost entirely.

The limits of the differential interferometry and the degree of precision to which the deformations can be measured depend on the decorrelation between the following acquisitions that deteriorates the quality of the information. Decorrelation is linked to the incomplete elimination of the atmospheric component, to the lack of precision in the determination of acquisition geometries and the corresponding DEM, to the noise of the signal, to the varying relative positions and to the dielectrical properties of the single targets within the same resolution cell.

Coherence is the main parameter used to assess the quality of the interferometric data (Zebker and Villasenor, 1992): a highly coherent pixel can provide a better phase information. Vegetation, for instance, has a very low level of coherence, and therefore the interferometric technique is inapplicable after a certain period of time (temporal decorrelation). This is what happens when couples of images with a high baseline are used and the projections on the sensor line of sight of the targets of the same cell becomes very different (spatial decorrelation).

Another element that makes the interferometric technique inapplicable in mountain areas is the presence of shades and distortion effects such as the layover (the inversion of the topographic relief on the radar image level) that may originate from the acquisition geometry typical of radar systems. The interferometric analysis cannot be applied to shades and layovers.

Throughout the PermaNET Project, the differential interferometric elaboration was carried out by applying the SBAS and the stacking techniques, which are briefly summarised as follows.

The Small Baseline Subsets technique (SBAS)

cando la tecnica SBAS e quella stacking, che vengono di seguito brevemente illustrate.

La tecnica Small Baseline Subsets (SBAS)

L'approccio classico dell'interferometria differenziale consiste nell'elaborare due immagini SAR, acquisite in successione da differenti posizioni, ed analizzare il singolo episodio deformativo avvenuto nel tempo intercorso tra le riprese. Se si vuole studiarne il comportamento e seguirne l'evoluzione temporale, occorre far sì che ogni coppia di dati sia adeguatamente collegata ad altre attraverso la generazione di un'appropriata sequenza di interferogrammi differenziali.

Un numero n di immagini possono venire combinate assieme per produrre $[n(n-1)/2]$ interferogrammi. Normalmente, quando si dispone di un gran numero di acquisizioni, si possono imporre dei limiti sulla baseline spaziale e temporale massima ed ottenere comunque una quantità notevole di interferogrammi di buona qualità, molti dei quali generati a partire da immagini che possono essere ricollegate secondo un'opportuna sequenza. L'idea implicita del metodo è che la deformazione totale misurata al tempo t_2 è la somma delle deformazioni registrate da t_0 a t_1 e da t_1 a t_2 . Pertanto la deformazione al generico tempo t_i può essere espressa come una combinazione lineare delle misure ottenute dalle singole acquisizioni purché siano collegate tra di loro. La tecnica SBAS (Berardino et al., 2002) si basa sulla combinazione di interferogrammi differenziali prodotti a partire da coppie di immagini caratterizzate di piccole baseline spaziali, al fine di limitare il più possibile gli effetti della decorrelazione spaziale. L'applicazione del metodo SVD (Single Value Decomposition) permette di creare un legame tra immagini SAR che altrimenti sarebbero separate da baseline troppo grandi e quindi inutilizzabili, consentendo in tal modo di incrementare il numero dei dati processati. Inoltre la disponibilità di una grande quantità di informazioni sia temporali che spaziali, derivate dagli interferogrammi prodotti, permette di individuare il contributo di fase dovuto ad inomogeneità atmosferiche e di filtrarlo.

La tecnica STACKING

La tecnica stacking (Peltzer et al., 2001) punta a ridurre gli effetti dei disturbi di fase dovuti ai cambiamenti delle condizioni atmosferiche durante

The traditional approach of differential interferometry consists of the elaboration of two SAR images that are acquired consecutively from different positions and of the analysis of the single deformative episode that took place between the acquisitions. In order to study the patterns and the temporal evolution, every pair of data must be adequately connected to the others through the creation of a sequence of differential interferograms.

An n number of images can be combined to obtain $[n(n-1)/2]$ interferograms. With a large number of available acquisitions, it is generally possible to set some limits on the spatial and temporal maximum baseline and still obtain a good number of high quality interferograms, many of which originate from images that can be connected according to a particular sequence. The method is implicitly based on the idea that the total deformation measured on t_2 time equals the sum of the deformations recorded from t_0 and t_1 and from t_1 to t_2 . The deformation to generic time t_i can therefore be expressed as the linear combination of measures obtained from the single acquisitions, provided that they are interconnected.

The SBAS technique (Berardino et al., 2002) is based on the combination of differential interferograms originated from pairs of images with small spatial baselines in order to minimize the effects of spatial decorrelation. By applying the Single Value Decomposition method (SVD) it is possible to create a link between SAR images that would otherwise be separated by excessive and therefore unusable baselines, therefore allowing an increase of the processed data. Thanks to the large amount of available temporal and spatial information originated from the interferograms, it is possible to define and filter the atmospheric contribution.

The STACKING technique

The stacking technique (Peltzer et al., 2001) is aimed at minimising the effects of phase interferences linked to atmospheric variations and to orbital fluctuations of platforms. The method is essentially based on the calculation of the average of all deformation speeds related to the single interferograms and provides a better estimate of the deformation speed.

If we consider a N number of interferograms, the

le differenti acquisizioni e quelli prodotti dalle oscillazioni orbitali delle piattaforme. La metodologia si basa essenzialmente sul calcolo di una media pesata di tutte le velocità di deformazione misurate nei singoli interferogrammi e permette di ottenere una migliore stima della velocità di deformazione.

Considerando N interferogrammi, la stima della velocità di deformazione per ogni pixel è calcolata come:

$$v = \frac{\sum_{j=1}^N \Delta t_j \phi_j}{\sum_{j=1}^N \Delta t_j^2}$$

dove:

v = stima della velocità di deformazione

Δt_j = baseline temporale del j -esimo interferogramma

Φ_j = fase del j -esimo interferogramma

L'elaborazione interferometrica è stata effettuata sulle aree della Provincia di Belluno aventi quota superiore a 2000 m che comprendono una superficie di circa 814 km². Sono stati utilizzati 2 dataset di immagini SAR acquisite dai satelliti ERS (track 394, frame 2673, discendente) ed ENVISAT (track 401, frame 9267, ascendente) dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA) le cui specifiche sono state riassunte in tabella bb.

estimate of the deformation speed for each pixel is calculated as follows:

$$v = \frac{\sum_{j=1}^N \Delta t_j \phi_j}{\sum_{j=1}^N \Delta t_j^2}$$

where:

v is the estimate of the deformation speed

Δt_j is the temporal baseline of the j -th interferogram

Φ_j is the phase of the j -th interferogram

The interferometric calculation has been carried out on the areas of the Province of Belluno with an altitude of 2000 m or higher and with a total surface of approximately 814 km². The process has involved the use of SAR image datasets acquired from ERS (track 394, frame 2673, descending) and ENVISAT satellites (track 401, frame 9267, ascending) of the European Spatial Agency (ESA), the details of which are illustrated in table bb.

Tabella bb. Immagini SAR utilizzate per l'elaborazione interferometrica.

Table bb. SAR images used for the interferometric elaboration.

n°	Sensore Xxxxxxx	Data xxxxxxx	Orbita Xxxxxxx
1	ERS-1	29/05/1992	4547
2	ERS-1	03/07/1992	5048
3	ERS-1	07/08/1992	5549
4	ERS-1	11/09/1992	6050
5	ERS-1	16/10/1992	6551
6	ERS-1	18/06/1993	10058
7	ERS-1	23/07/1993	10559
8	ERS-1	27/08/1993	11060
9	ERS-1	01/10/1993	11561

n°	Sensore Xxxxxxx	Data xxxxxxx	Orbita Xxxxxxx
10	ERS-1	05/11/1993	12062
11	ERS-1	07/05/1995	19921
12	ERS-1	11/06/1995	20422
13	ERS-1	16/07/1995	20923
14	ERS-2	17/06/1995	1250
15	ERS-1	20/08/1995	21424
16	ERS-2	21/08/1995	1751
17	ERS-1	24/09/1995	21925
18	ERS-2	25/09/1995	2252

n°	Sensore XXXXXXX	Data XXXXXXX	Orbita XXXXXXX
19	ERS-1	29/10/1995	22426
20	ERS-2	30/10/1995	2753
21	ERS-1	26/05/1996	25432
22	ERS-2	27/05/1996	5759
23	ERS-1	30/06/1996	25933
24	ERS-2	09/09/1996	7262
25	ERS-2	14/10/1996	7763
26	ERS-2	12/05/1997	10769
27	ERS-2	16/06/1997	11270
28	ERS-2	21/07/1997	11771
29	ERS-2	25/08/1997	12272
30	ERS-2	29/09/1997	12773
31	ERS-2	01/06/1998	16280
32	ERS-2	06/07/1998	16781
33	ERS-2	10/08/1998	17282
34	ERS-2	14/09/1998	17783
35	ERS-1	16/05/1999	40963
36	ERS-2	17/05/1999	21290
37	ERS-2	21/06/1999	21791
38	ERS-2	26/07/1999	22292
39	ERS-1	29/08/1999	26400
40	ERS-2	30/08/1999	22793
41	ERS-2	04/10/1999	23294
42	ERS-2	01/05/2000	26300
43	ERS-2	05/06/2000	26801
44	ERS-2	10/07/2000	27302
45	ERS-2	14/08/2000	27803
46	ERS-2	18/09/2000	28304
47	ERS-2	23/10/2000	28805

n°	Sensore XXXXXXX	Data XXXXXXX	Orbita XXXXXXX
1	ENVISAT	10/05/2004	11477
2	ENVISAT	14/06/2004	11978
3	ENVISAT	23/08/2004	12980
4	ENVISAT	27/09/2004	13481
5	ENVISAT	30/05/2005	16988
6	ENVISAT	04/07/2005	17489
7	ENVISAT	08/08/2005	17990
8	ENVISAT	12/09/2005	18491
9	ENVISAT	17/10/2005	18992
10	ENVISAT	15/05/2006	21998
11	ENVISAT	19/06/2006	22499
12	ENVISAT	24/07/2006	23000
13	ENVISAT	28/08/2006	23501
14	ENVISAT	02/10/2006	24002
15	ENVISAT	30/04/2007	27008
16	ENVISAT	09/07/2007	28010
17	ENVISAT	17/09/2007	29012
18	ENVISAT	23/06/2008	33020
19	ENVISAT	01/09/2008	34022
20	ENVISAT	06/10/2008	34523
21	ENVISAT	04/05/2009	37529
22	ENVISAT	08/06/2009	38030
23	ENVISAT	13/07/2009	38531
24	ENVISAT	17/08/2009	39032
25	ENVISAT	21/09/2009	39533
26	ENVISAT	26/10/2009	40034
27	ENVISAT	24/05/2010	43040
28	ENVISAT	02/08/2010	44042
29	ENVISAT	11/10/2010	45044

Tabella cc. Interferogrammi differenziali generati a partire dalle immagini ERS. Bperp rappresenta la baseline espressa in metri e delta_T l'intervallo temporale in giorni intercorso tra la ripresa master e la slave.

Table cc. Differential interferograms obtained from ERS images. Bperp represents the baseline expressed in meters, whereas delta_T represents the number of days between the master and the slave acquisition.

n.	Master	Slave	Bperp	delta_T
1	19920529	19930618	41.647	385
2	19920703	19930827	-156.033	420
3	19920807	19930723	460.239	350
4	19930618	19950612	404.327	724
5	19930723	19950716	-3.782	723
6	19930723	19950717	110.562	724
7	19930723	19950924	-404.469	793
8	19931001	19950820	-265.195	688
9	19950612	19960527	504.394	350
10	19950612	19960909	-278.699	455
11	19950716	19950717	148.382	1
12	19950716	19950924	-366.649	70
13	19950716	19960526	-211.194	315
14	19950716	19970512	403.788	666
15	19950716	19970616	-160.945	701
16	19950716	19970721	77.582	736
17	19950717	19950924	-515.031	69
18	19950717	19960526	-359.576	314
19	19950717	19970512	255.406	665
20	19950717	19970616	-309.327	700
21	19950717	19970721	627.438	735
22	19950717	19970929	910.186	805
23	19950820	19950821	-896.967	1
24	19950820	19950925	255.352	36
25	19950820	19961014	-926.788	421
26	19950821	19961014	-29.821	420
27	19950821	19970512	-835.111	630
28	19950821	19970721	-463.079	700
29	19950821	19970929	-180.331	770
30	19950924	19960526	155.455	245
31	19950924	19960527	-923.474	246
32	19950924	19970512	770.437	596
33	19950924	19970616	205.704	631
34	19951029	19951030	-279.383	1
35	19960526	19970512	614.982	351
36	19960526	19970616	50.249	386
37	19960526	19970721	987.014	421

n.	Master	Slave	Bperp	delta_T
38	19960527	19960909	-783.093	105
39	19960527	19980914	-703.222	840
40	19960630	19980601	937.117	701
41	19960909	19980914	79.871	735
42	19961014	19970512	-80.529	210
43	19961014	19970721	-433.258	280
44	19961014	19970929	-15.051	350
45	19961014	19980810	-137.852	665
46	19970512	19970616	-564.733	35
47	19970512	19970721	372.032	70
48	19970512	19970929	65.478	140
49	19970512	19980810	667.438	455
50	19970512	19991108	714.498	910
51	19970616	19970721	936.765	35
52	19970721	19970929	282.748	70
53	19970721	19980810	295.406	385
54	19970721	19990621	992.466	700
55	19970721	19991004	74.052	805
56	19970721	19991108	342.466	840
57	19970825	19980601	-730.202	280
58	19970929	19980810	12.658	315
59	19970929	19990621	709.718	630
60	19970929	19991004	457.772	735
61	19970929	19991108	59.718	770
62	19971103	19990830	825.248	665
63	19980601	20000918	538.029	840
64	19980706	20000710	-230.249	735
65	19980706	20001023	523.763	840
66	19980810	19990621	69.706	315
67	19980810	19991004	445.114	420
68	19980810	19991108	4.706	455
69	19990517	20000814	-398.544	455
70	19990621	19991004	-251.946	105
71	19990621	19991108	-65	140
72	19991004	19991108	-398.054	35
73	20000501	20000605	-49.038	35
74	20000710	20001023	754.012	105

Tabella dd. Interferogrammi differenziali generati a partire dalle immagini ENVISAT. Bperp rappresenta la baseline espressa in metri e delta_T l'intervallo temporale in giorni intercorso tra la ripresa master e la slave.

Table dd. Differential interferograms obtained from ENVISAT images. Bperp represents the baseline expressed in meters, whereas delta_T represents the number of days between the master and the slave acquisition.

n.	Master	Slave	Bperp	delta_T
1	20040614	20041101	78.491	140
2	20040614	20050704	-138.27	385
3	20040614	20051017	78.259	490
4	20040614	20060619	72.426	735
5	20040614	20061002	-729.153	840
6	20040927	20050704	277.863	280
7	20040927	20061002	931.411	735
8	20041101	20050704	-146.119	245
9	20041101	20060619	645.769	595
10	20041101	20061002	-807.644	700
11	20050530	20060828	182.285	455
12	20050530	20070709	-109.398	770
13	20050704	20051017	146.096	105
14	20050704	20061002	653.548	455
15	20051017	20060619	646.001	245
16	20051017	20061002	-807.412	350
17	20060515	20060619	-116.879	35
18	20060515	20081006	91.045	875
19	20060619	20061002	-145.341	105

n.	Master	Slave	Bperp	delta_T
20	20060828	20070709	-291.683	315
21	20060828	20080623	-988.643	665
22	20070709	20080623	-69.696	350
23	20070709	20090713	1.207.325	735
24	20070709	20090817	-727.299	770
25	20070917	20080901	-514.765	350
26	20070917	20090921	-109.986	735
27	20070917	20090921	-109.986	735
28	20080623	20090817	-30.339	420
29	20080623	20100524	-617.686	700
30	20080623	20100802	-111.287	770
31	20080901	20090921	-585.093	385
32	20080901	20090921	-585.093	385
33	20081006	20090608	-124.49	245
34	20081006	20100802	1.085.791	665
35	20090504	20090608	25.678	35
36	20090817	20100524	-587.347	280
37	20090817	20100802	-108.253	350
38	20100524	20100802	-495.186	70

Dalle 47 immagini ERS utilizzate, sono stati generati 74 interferogrammi differenziali (tabella cc), mentre dalla serie più ridotta di 29 riprese ENVISAT ne sono stati prodotti 38 (tabella dd).

Con tale metodo, si sono potuti analizzare circa 111 km² di territorio con le immagini ERS e 101 km² con quelle ENVISAT (Figura 4). Tali valori sono da intendersi relativi alle aree coperte da segnale interpretabile (coerenza maggiore o uguale a 0.5) e non alla copertura delle immagini stesse, che in realtà inquadrano un territorio ben più esteso della provincia bellunese, a parte il margine più orientale, che resta escluso nei dati ENVISAT. Inoltre, essendo provenienti da orbite discendenti (dati ERS) ed ascendenti (dati ENVISAT), solo parte delle aree analizzate risulta essere inquadrata in entrambi i dataset (circa il 52% relativo a 58 Km²) e pertanto, per alcuni siti, le

74 differential interferograms were obtained from the 47 used ERS images (table cc), while 38 interferograms were obtained from the smaller series of 29 ENVISAT acquisitions (table dd).

Thanks to this method, it was possible to analyse approximately 111 km² of land through ERS images and 101 km² through ENVISAT images (Picture 4). Such data are to be read in relation to the areas covered by a clear signal (with a degree of coherence of 0.5 or higher) and not to the image coverage itself, relating to a wider portion of the Belluno province territory, apart from the eastern margin, which was not included within the ENVISAT survey. Furthermore, due to the descending (ERS data) and ascending (ENVISAT data) nature of the orbits, only some of the researched areas are included into both datasets (approximately the 52% of 58 Km²); for some areas, the

velocità di deformazione misurate sono da intendersi relative al periodo 1992-2000 (dati ERS) e per altre al 2004-2010 (dati ENVISAT).

I valori delle velocità di deformazione sono stati ricavati a partire dalla metodologia *stacking* che, potendo avvalersi di un numero di interferogrammi superiore ai *subset* utilizzabili nell'analisi SBAS, hanno una deviazione standard inferiore. Tali valori sono da intendersi come velocità di deformazione medie annue, supposte costanti, lungo la linea di vista del radar e relative ad un punto considerato stabile.

recorded deformation speed is therefore to be read in relation with the period between 1999 and 2000 (ERS data), while for some others the relevant period is that between 2004 and 2010 (ENVISAT data).

The speed deformation values have been obtained through the stacking technique, which, through the use of a higher number of interferograms than the subsets available in the SBAS analysis, provide a lower standard deviation. Such values are to be intended as yearly average deformation speeds, supposedly constant, along the line of sight of the radar, and in relation with a supposedly steady point.



Figura 4. Distribuzione delle aree sottoposte ad analisi ERS ed ENVISAT (in grigio) nell'area bellunese.

Picture 4. Distribution of the areas subject to ERS and ENVISAT analysis (in grey) within the territory of Belluno.

Un esempio di elaborazione interferometrica a partire dal dataset ERS è riportato in figura bb.

Il prodotto finale è rappresentato da una mappa di velocità di deformazione media annua (figura cc).

Le aree soggette a instabilità sono state di seguito georeferenziate ed importate in ambiente GIS, dove sono state sovrapposte alla carta inventario derivata dalla fotointerpretazione e dai tematismi IFFI.

La buona congruenza dei risultati ottenuti su alcune aree risulta apprezzabile come in figura X e figura xx, dove nella visualizzazione tridimensionale della Marmolada appaiono evidenti le frange interferometriche generate dalle deformazioni,

Picture bb illustrates an example of interferometric elaboration starting from the ERS dataset.

The final outcome is an average annual deformation speed map (picture cc).

The potentially instable areas have later been georeferenced and imported into a GIS environment, where they have been superimposed onto the map/inventory originated from the photo-interpretation technique and the IFFI database. In some areas, the results are quite congruent, such as in picture X and picture xx, where the three-dimensional view of the Marmolada clearly shows the interferometric fringes originating from the deformations, measured by ENVISAT (2004-

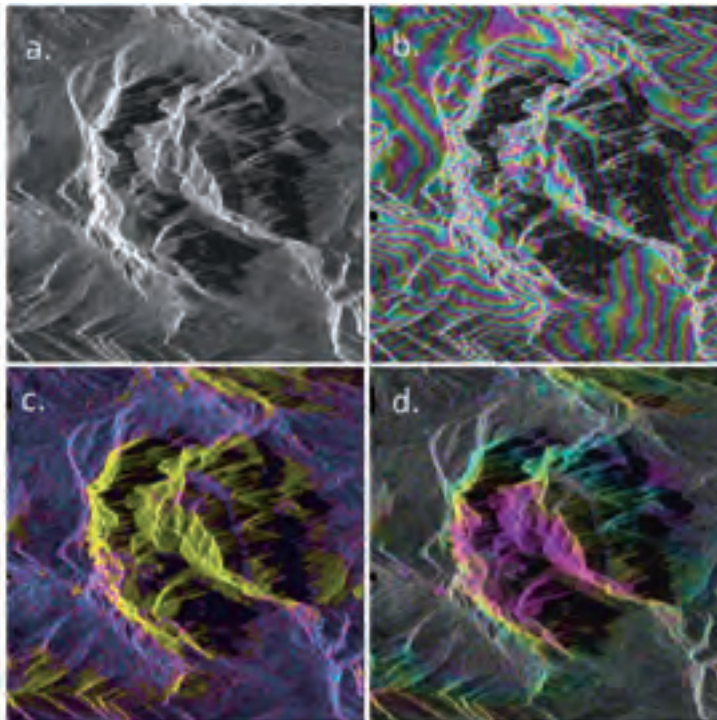


Figura bb. Elaborazione interferometrica dell'area del gruppo del Sella eseguita a partire da immagini ERS. a).Immagine di intensità in coordinate SAR. b) Interferogramma sintetico, utilizzato per rimuovere il contributo della fase generato dalla topografia. Ad ogni ciclo di colore corrispondono 100 metri di dislivello. c).Mappa di coerenza. Le aree in giallo corrispondono a quelle di maggior coerenza, le blu a quelle di minore. d) Interferogramma differenziale creato da due immagini rispettivamente dell'estate 1993 e di quella del 1995. Non si notano frange deformative.

Picture bb. Interferometric elaboration of the Sella mountain group area on the basis of ERS images. a).SAR intensity image b) Synthetic interferogram used to eliminate the topographic phase. Each colour cycle corresponds to a 100 meter gap c).Coherence map. The most coherent areas are marked in yellow, and the least coherent are marked in blue. d) Differential interferogram originated from two images respectively dating back to the summer of 1993 and of 1995. There are no deformative fringes.

misurate dai dati ENVISAT (2004-2010), in corrispondenza di un'area di dissesto (contorno rosso) localizzata attraverso la fotointerpretazione.

Dal confronto incrociato dei dati risulta che l'elaborazione interferometrica su immagini ERS ha individuato 15 aree deformative in corrispondenza di 21 dissesti presenti secondo i tematismi e la fotointerpretazione, con percentuale di successo molto elevata e pari a circa il 71%. Per i dati ENVISAT tale valore scende notevolmente e si attesta sul 45%, dal momento che sono state individuate solo 20 aree su 45.

Nell'area del Piz Boè non sono state riscontrate deformazioni misurabili in corrispondenza del rock glacier oggetto di studio, anche se sono state individuate diverse aree in movimento, situate per lo più ai margini dell'area di studio, al di fuori della provincia di Belluno.

2010), in correspondence of an instability area (red contour) localised through photo-interpretation.

A cross comparison of data shows that the interferometric elaboration on ERS images detected 15 deformation areas in correspondence of 21 instabilities highlighted by both photo-interpretation and IFFI, with a 71% probability of success. With regard to the ENVISAT data, the value is considerably lower (approx. 45%) since only 20 out of 45 deformation areas have been detected.

In the Piz Boè area, no deformation has been observed in correspondence of the analysed rock glacier; however, several moving areas have been detected mainly at the borders of the area of study, outside the Province of Belluno.

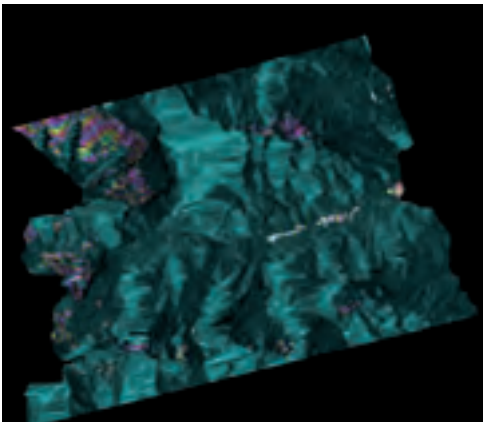


Figura cc. Frange interferometriche dovute a processi deformativi sulla Marmolada (in alto a sinistra) elaborate a partire da dataset ENVISAT (periodo 2004-2010). Un ciclo di colore corrisponde ad una velocità di spostamento lungo la linea di vista del radar di 5 mm/anno. Le frange sono state sovrapposte ad un'immagine di intensità georeferenziata.

Picture cc. Interferometric fringes caused by deformation processes on the Marmolada mountain (upper left), obtained from an ENVISAT dataset (2004-2010 period). Each colour cycle corresponds to a movement speed on the radar line of sight of 5 mm/year. Fringes have been superimposed on a georeferenced intensity image.

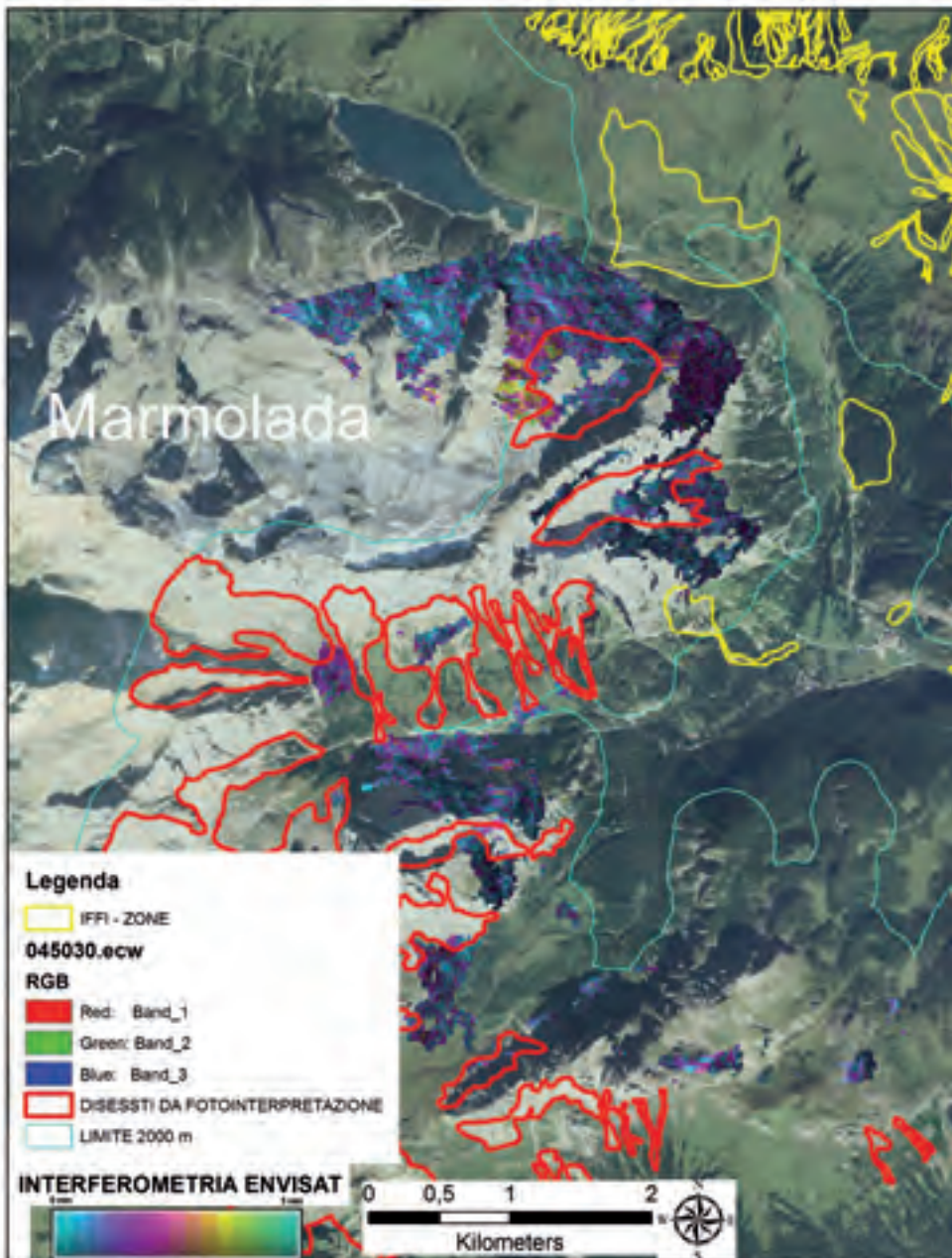


Figura X. Esempio di analisi spaziale condotta sulla Marmolada. Nell'immagine sono messi a confronto i tematismi IFFI (in giallo), i dissesti ricavati dalla fotointerpretazione (in rosso) e le frange interferometriche (un ciclo di colore corrisponde a 5 mm di deformazione lungo la linea di vista del radar). Nella parte alta dell'immagine è possibile notare un ciclo completo del segnale (rettangolo bianco).

Picture X. Example of spatial analysis on the Marmolada mountain. The picture shows a comparison between IFFI items (in yellow), the instabilities obtained through the photo-interpretation technique (in red) and the interferometric fringes (each colour cycle corresponds to a 5mm deformation on the radar line of sight). A complete cycle of the signal (white rectangle) can be observed at the top of the picture.

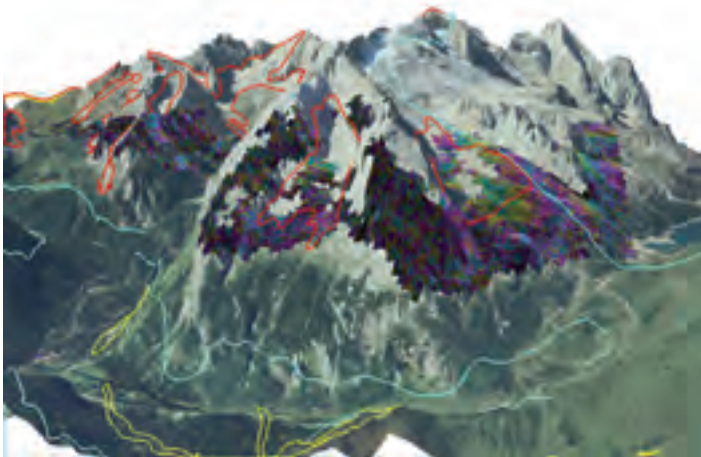


Figura 5. Visualizzazione 3D della Marmolada. La linea azzurra delimita le aree superiori ai 2000 m. Le linee gialle bordano i dissesti ricavati dai tematismi IFFI mentre quelle rosse racchiudono quelli ricostruiti dalla fotointerpretazione. Un ciclo di colore nei dati interferometrici equivale ad una velocità di deformazione di 5 mm/anno.

Picture 5. 3D view of the Marmolada. The light blue line marks the areas over 2000 m of altitude. The yellow lines mark the instabilities obtained through IFFI, while the red lines mark those obtained through the photo-interpretation technique. In the interferometric data, a colour cycle corresponds to a deformation speed of 5 mm/year.

LiDAR

Il LiDAR (Light Detection And Ranging) è un sensore attivo che sfrutta lo stesso principio utilizzato dai radar. Lo strumento indirizza un fascio laser verso un bersaglio che interagendo con la radiazione che lo colpisce ne retroriflette una parte verso il sensore. La misura del tempo impiegato dalla luce per coprire in andata e ritorno il percorso tra lo strumento ed il bersaglio, permette di risalire alla distanza che separa i due oggetti. Il raggio laser emesso dallo scanner viene pilotato da una coppia di specchi rotanti. Per ciascuno degli impulsi emessi dal laser, gli specchi compiono una rotazione infinitamente piccola e a passo costante: tale passo definisce la griglia di scansione. Dalla misura angolare degli specchi e da quella della distanza si riescono a determinare le coordinate spaziali dell'oggetto inquadrato. Il sensore è in grado di registrare inoltre, per ogni punto, l'intensità della radiazione retrodiffusa che dipende esclusivamente dalla natura del bersaglio. Attraverso un rilievo LIDAR è quindi possibile ricostruire tridimensionalmente e pertanto misurare oggetti anche molto complessi e di notevoli dimensioni.

Il confronto tra due o più modelli digitali, creati a

LiDAR

LiDAR (Light Detection And Ranging) is an active sensor based on the same principle of radar. The LiDAR instrument emits light towards a target that, by way of interacting with the radiation that hits it, reflects some of it back towards the sensor. The time for the light to travel out to the target and back to the LiDAR is used to determine the distance between two objects. The laser ray transmitted by the scanner is guided by a pair of rotating mirrors. The mirrors carry out an infinitely small and constant rotation for each impulse transmitted by the laser: this constant movement defines the scan grid. The spatial coordinates of the framed object can be obtained from the angular size of the object and of the distance. For each spot, the sensor is also able to record the intensity of the retro spread radiation depending exclusively on the nature of the target. A LIDAR survey therefore allows the three-dimensional reconstruction and the measurement of complex and considerably sized objects.

Thanks to the comparison between two digital models, created from two consecutive LiDAR surveys, it is possible to detect with a high level of precision the portion of land that is subject to

partire da due rilievi LiDAR successivi, consente di individuare con elevata precisione le porzioni di territorio soggette a variazioni plano altimetriche, di calcolarne i valori e gli eventuali volumi mobilizzati. La disponibilità di tale modello permette inoltre di disporre di una geometria molto accurata su cui è possibile effettuare simulazioni numeriche previsionali sull'evoluzione dei fenomeni deformativi.

Ai fini di un corretto confronto multi temporale dei DEM, risulta necessario realizzare e determinare un sistema di riferimento locale e univoco su cui orientare le diverse scansioni laser. L'orientamento di ciascuna singola scansione risulta infatti arbitrario e casuale, da cui ne consegue una diversa collocazione spaziale dell'oggetto ripreso. La tecnica di riallaccio delle scansioni prevede il riconoscimento di punti omologhi (tie points o, nello specifico, target reflectors) comuni a tutte le scansioni, che vengono utilizzati per la determinazione dei parametri di rototraslazione con variazione di scala per la ricollocazione delle singole riprese in un sistema di riferimento "esterno" e comune alle i-esime riprese. Le singole scansioni laser sono quindi state rototraslate vincolando tali punti di coordinate note, ridistribuendo quindi lo scarto in funzione della geometria di controllo (figura ee).

Per poter georeferenziare l'oggetto del rilievo è necessaria poi la conoscenza delle coordinate di almeno 3 punti nei due sistemi di riferimento, locale e geografico. Normalmente per tale scopo si utilizzano stazioni totali e ricevitori GNSS (Global Navigation Satellite System).

MAPPATURA DEL DISSESTO

Inventario frane

Un completo archivio storico degli eventi è stato definito in base ai dati a disposizione, referenziato e classificato. I record IFFI riportano informazioni sui punti di dissesto, le zone di innesco e di accumulo e una principale direzione dell'evento. L'utilizzo di tale archivio è legato alla sua completa copertura dell'area di studio e ad una scala di riferimento standard degli eventi archiviati (25.000). Altre banche dati sono concentrate su zone limitate (ad es. l'area del Cordevole), sono a scala di maggior dettaglio e mediamente a quota inferiore al limite dei 2000 m. Si è suc-

plano-altimetric variations, to obtain their values and their mobilised volumes. Such model can also provide a very accurate geometry that allows provisional numerical simulations on the evolution of the deformation events.

In order to carry out a correct multi-temporal comparison of the DEM, it is necessary to build and determine a local univocal reference system where the different laser scans can be oriented. The orientation of the single laser scans is in fact random and arbitrary: as a result, the acquired objects have different spatial collocations. Re-linking the scans implies the recognition of homologous spots (tie points or, more precisely, target reflectors), to be found in every scan, which can be used to determine the rototranslation parameters complete with scale variations. This way, the different scans can be redeemed into an external, communal reference system. Every single laser scan was later rototranslated by linking it to the known points and distributing the difference using control geometry (Picture ee.)

In order to georeferentiate the acquired object, it is necessary to know the coordinates of at least three spots in the local and geographic reference systems. To this end, total stations and GNSS (Global Navigation Satellite System) receivers are employed.

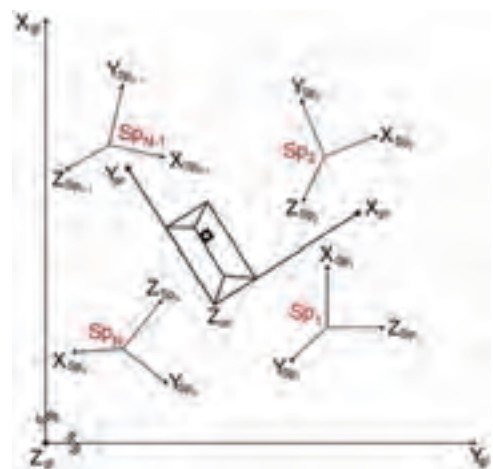


Figura ee. Struttura gerarchica dei sistemi di riferimento strumentali rispetto all'oggetto ripreso.

Picture ee. Hierarchical structure of the reference systems in relation to the acquired object.

cessivamente passati a una più completa analisi geometrica delle aree in dissesto alla stessa scala IFFI e a una scala più dettagliata (5.000) con digitalizzazione di eventi in aree superiori ai 2.000 m mediante fotointerpretazione aerea (sequenza Ortofoto digitali a colori Terraltaly it2000 NR volo 2006-2007). Tecnicamente sono state usate 3 classi tipologiche per 959 aree a dissesto (Fig. frane1 e frane2 e tab 1):

- accumulo/falda di detrito
- colata detritica
- crollo

TIPO EVENTO Xxxx	NUMERO DI AREE Xxxx
Accumulo / Falda di detrito Xxxx	427
Colata detritica / Xxxx	524
Crollo / Xxxx	8
Totale / Xxxx	959

Tab1. Tipologia e numero di eventi ottenuti da fotointerpretazione.

Table 1. Type and number of events obtained through the photo-interpretation technique.

MAP OF INSTABILITIES

List of landslides

On the basis of the available data, an historical archive has been drawn up, referenced and classified. The IFFI database gives us information on the instability areas, the triggering and accumulation areas as well as the main direction of the event. The database has been used because it covers the whole area of study and uses a standard scale (25,000) for filing the events. Other databases deal with more limited areas (such as the Cordevole area), have a lower scale and normally focus on altitudes lower than 2000 m. A more complete geometrical analysis of the instability areas has then been carried out using the IFFI scale as well as a lower scale (5,000), through the digitalization of the events in areas with an altitude over 2,000 m by way of aerial photo-interpretation (digital coloured orthoimage sequence Terraltaly it2000 flight 2006-2007). From a technical point of view, three classes have been used for 959 instability areas (Picture frane1 and frane2 and table 1):

- debris accumulation / layering
- debris flow
- collapse



Fig. frane1 Area del bellunese con distribuzione spaziale degli eventi digitalizzati (aree azzurre). In rosso il riquadro dell'area interessata dalla Fig.frane2

Picture.frane1 Belluno area with spatial distribution of digitalized events (light blue areas). The red area illustrates the frame shown in Picture.frane2

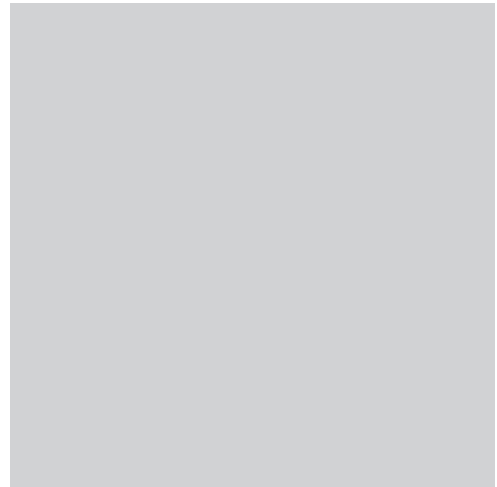


Fig.frane2 Dettaglio su base ortofoto del Piz Boè in cui appare la comparazione con la banca dati IFFI precedentemente acquisita.

Picture.frane2 orthoimage detail of Piz Boè in comparison with the previously acquired IFFI data.

Ulteriori riclassificazioni e modifiche geometriche sono state applicate in termini di numero di classi, di tipologia assegnata a ciascun record e di area occupata. La distribuzione di aree coinvolte nelle varie tipologie di frana è riassunta in tab.1 ed è visualizzata in alcuni esempi in fig. frane_tipo.tif. Appare evidente una chiara superiorità tra eventi individuati come accumuli con conseguenti falde detritiche e più ampie colate detritiche. Minor evidenza è stata rilevata per eventi di crollo. Tale mancanza è legata a una presenza più limitata della tipologia nel territorio e a una difficoltà morfologica in ambito fotointerpretativo, specialmente nell'individuazione dell'area di accumulo.

In fase di acquisizione si è utilizzata prevalentemente una visualizzazione geometrica 2D per una digitalizzazione di base. In una seconda fase, per ogni poligono digitalizzato, è stata eseguita una verifica geometrica e tipologica grazie a una riproduzione 3D delle aree di interesse. Tale approccio, mediante ortofoto su base altimetrica DEM, ha consentito una ripresa tridimensionale dell'immagine e una conseguente correzione degli eventi digitalizzati. Alcuni esempi di visualizzazione tridimensionale dei dissesti individuati con fotointerpretazione sono stati riportati in figura 3d.

Further reclassifications and geometrical variations have been applied in terms of class numbers, type of record and correspondent area. Table.1 illustrates the distribution of the areas affected by each type of landslide, and some examples are provided by Picture landslides_tipo.tif. The accumulation events and the resulting debris layering and debris flow appear to be higher than the rest of events. Scarce evidence has been found on collapse events. This is linked to a lower frequency of this type in the analysed territory, and to a morphological difficulty during the photo-interpretation process, especially in the identification of the accumulation area.

During the acquisition stage, a 2D geometrical visualisation for a basic digitalisation has mainly been used. In a second stage, a typological and geometrical verification has been carried out for each digitalised polygon, thanks to a 3D reproduction of the areas of interest. By using this approach, based on DEM altimetric orthoimages, it was possible to acquire the image in 3D and to digitally correct the events. Picture 3d illustrates some examples of three-dimensional visualisation of the instabilities detected through the photo-interpretation technique.

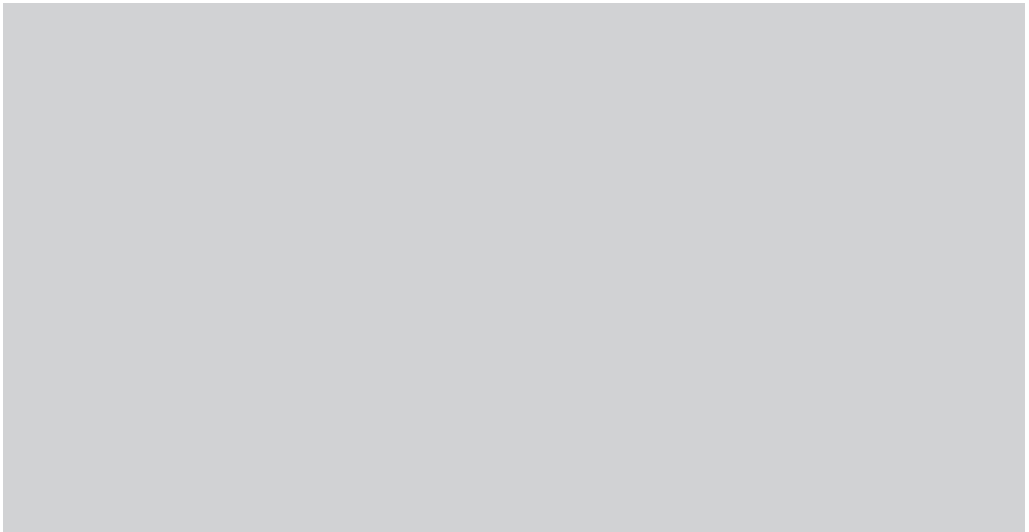


Figura 3D. Visualizzazione 3D dei dissesti da fotointerpretazione su ortofoto del 2006 con base DEM a risoluzione 5 m. Particolare su Lastoi di Formin da Passo Giau.

3D Picture. 3D view of the instabilities acquired via photo-interpretation on a 2006 DEM orthoimage with a 5m resolution. Detail of the Lastoi di Formin from Passo Giau.

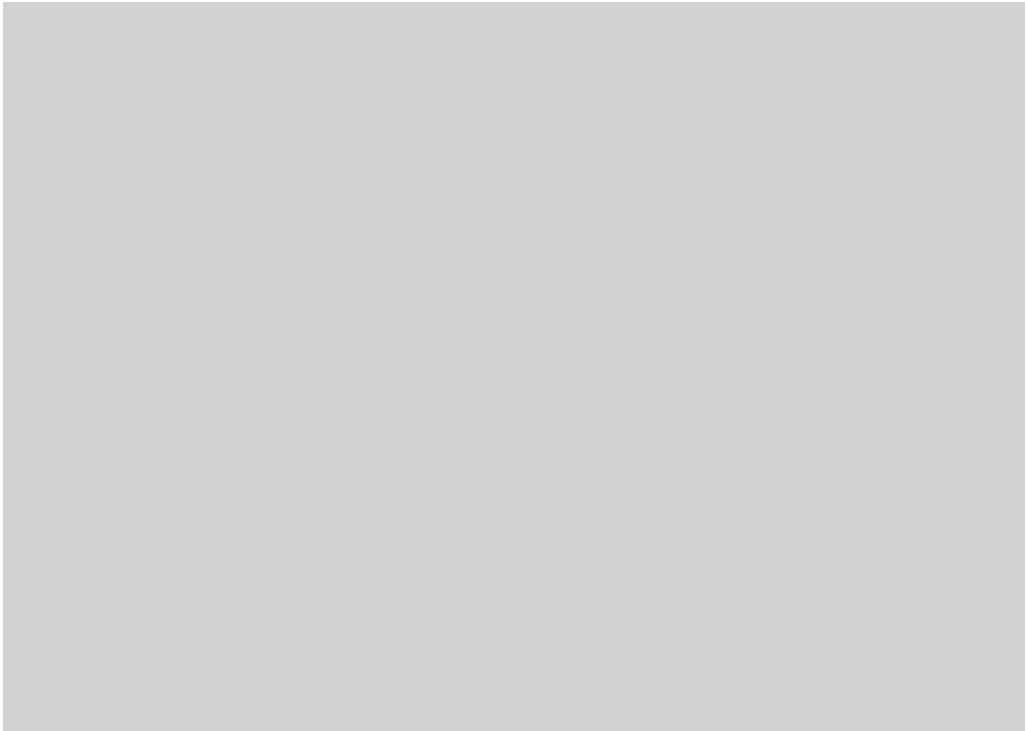


fig. frane_tipo.tif. Eventi franosi in quattro aree interessate da fotointerpretazione. La distribuzione evidenzia la presenza maggiore di colate detritiche. Solo in alcune aree (Cinque Torri come esempio) risultano evidenze morfologiche di crolli.
 picture. frane_tipo.tif. Landslide events in four areas analysed through the photo-interpretation technique. The distribution shows a stronger presence of debris flow. Morphological evidence of collapses can be found only in certain areas (such as Cinque Torri).

Analisi di suscettibilità

La tecnica WofE², utilizzata anche nel Progetto PermaNet, prevede l'acquisizione di una serie di informazioni spazializzate e standardizzate. Il modello si basa su metodologia quantitativa per combinare "evidenza" a supporto dell'ipotesi (ossia la distribuzione dell'evento) e si fonda su una serie di temi (es. uso del suolo, litologia) a cui viene dato un peso rispetto alla probabilità di accadimento. I parametri su cui si basa il modello consistono in una serie di dati d'ingresso e un set di fenomeni avvenuti presenti in un database storico (training points). I parametri gestiti sono vincolati alla loro disponibilità e ricampionati per ottenere una risoluzione standard. I layers utilizzati come predittori inseriti nel modello e derivati

Susceptibility analysis

The WofE technique², also used by the PermaNET Project, is based on the acquisition of spatial and standardised information. This model is aimed at collecting evidence supporting the hypothesis (the event distribution) through a quantitative method and is based on a number of elements (such as land use, lithology) that acquire a certain weight in relation to their likeliness of occurrence. The model parameters are a series of input data and of occurred events inserted into a historical database (training points). The use of these parameters depends on their availability; they are then re-sampled in order to obtain a standard resolution. The layers used by the model as predictors and originated from the DEM analysis are

2. WofE modeling: <http://www.ige.unicamp.br/wofe/documentation/wofeintr.htm>.

2. WofE modelling: <http://www.ige.unicamp.br/wofe/documentation/wofeintr.htm>.

da analisi su base DEM e sono i seguenti:

- Aree dissestate digitate e classificate da fotointerpretazione (da immagini Terraltaly it2000 NR volo 2006-2007) e database IFFI eventi vettorializzati (da IFFI database Regione Veneto e confronto geomorfologico)
- Carta Geologica originale Regione Veneto in otto classi di permeabilità (fig.permeabilita.tif)
- Modello Digitale del Terreno a 20m (DEM) partendo dall'originaria risoluzione 5m.
- Pendenza (slope) mediante analisi 3D eseguita da CNR-IDPA su base DEM 5m Regione Veneto, Unità di progetto per il SIT e la Cartografia e successivamente ricampionato a 20m
- Esposizione (aspect) mediante analisi 3D eseguita da CNR-IDPA su base DEM 5m Regione Veneto, Unità di progetto per il SIT e la Cartografia e successivamente ricampionato a 20m
- Pendio interno (internal relief) mediante analisi 3D eseguita da CNR-IDPA su base DEM 5m Regione Veneto, Unità di progetto per il SIT e la Cartografia e successivamente ricampionato a 20m
- Curvatura di versante (planar curvature) mediante analisi 3D eseguita da CNR-IDPA su base DEM 5m Regione Veneto, Unità di progetto per il SIT e la Cartografia e successivamente ricampionato a 20m

I pesi attribuiti ai diversi parametri sono gestiti dal modello stesso, che calcola la distribuzione spaziale delle tipologie di classi per ogni parametro rispetto agli eventi di riferimento in archivio. Da tale analisi se ne ricava direttamente la dipendenza condizionale delle varie classi e la loro importanza statistica rispetto ad eventi passati. Ad esempio, la maggior parte degli eventi è localizzata in specifiche classi di uso del suolo,

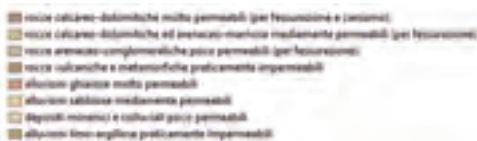


fig.permeabilita.tif. Classificazione geologica originale su base della permeabilità. È stata successivamente ricampionata come parametro di suscettibilità.

fig.permeabilita.tif. Original geological classification on the basis of permeability. This has later been re-sampled as susceptibility parameter.

the following:

- *Instability areas detected and classified through photo-interpretation (from Terraltaly images it2000 NR flight 2006-2007) and IFFI database vectorialised events (from Veneto Region IFFI database and geomorphological comparison)*
- *Original Geological Map of the Veneto Region, with eight permeability classes (Picture.permeabilita.tif)*
- *Digital Terrain Model at 20m (DEM), starting from the original 5m resolution.*
- *Slope calculated through a 3D analysis carried out by CNR-IDPA on 5m DEM, Veneto Region, Project Unit for the SIT and Mapping and later re-sampled at 20m.*
- *Exposure calculated through a 3D analysis carried out by CNR-IDPA on 5m DEM, Veneto Region, Project Unit for the SIT and Mapping and later re-sampled at 20m.*
- *Internal relief calculated through a 3D analysis carried out by CNR-IDPA on 5m DEM, Veneto Region, Project Unit for the SIT and Mapping and later re-sampled at 20m.*
- *Planar curvature calculated through a 3D analysis carried out by CNR-IDPA on 5m DEM, Veneto Region, Project Unit for the SIT and Mapping and later re-sampled at 20m.*

The model also manages the weight attributed to the various parameters and calculates the spatial distribution of the classes for each parameter in relation to the reference events in the archive. Such analysis shows the conditional dependence of each class and their statistical importance in relation to past events. For instance, most events are localised in specific land use types, which have therefore a higher weight than some others.

The parameter of permafrost distribution has been used in addition to the other traditional probabilistic parameters. The analysis, based on the 3D Alpine model (Steinkogler et al. 2011) has generated a stochastic distribution on the possible distribution of permafrost. As a statistical instrument made of several integrated models (e.g. snow carpet, land and vegetation distribution, snow movement), the results obtained are a probabilistic permafrost distribution based on the following classification:

che di conseguenza hanno un peso maggiore rispetto ad altre.

Accanto ai parametri utilizzati per un riscontro probabilistico classico si è introdotta l'opportunità di utilizzare la distribuzione del permafrost. L'analisi supportata mediante il modello Alpine3D (Steinogler et al. 2011) ha generato una distribuzione stocastica riguardante la possibile distribuzione del permafrost. Essendo un prodotto statistico costituito da vari modelli integrati (es: copertura nevosa, distribuzione del suolo e della vegetazione, trasporto nevoso) il risultato ha portato a una distribuzione probabilistica del permafrost utilizzando la seguente classificazione:

- 1) Permafrost assente (Permafrost not possible)
- 2) Permafrost possibile (Permafrost possible)
- 3) Permafrost molto probabile (Permafrost likely)

Come ben visibile in Fig. permafrost_reclas.tif il permafrost è risultato, considerando la distribuzione dei pixel, prevalentemente "non possibile" seguito dalla classe "possibile". Una scarsa quantità dell'intera area (circa l'1%) è definibile ad alta probabilità di presenza permafrost. I criteri iniziali di pre-processamento valutati sono i seguenti:

- L'analisi eseguita è già di per se un output da modello, non una distribuzione reale di un'informazione come permeabilità, quota o geologia.
- La risoluzione dell'informazione permafrost è di 150 m, inferiore alle risoluzioni degli altri parametri di partenza. (es. DEM 10m).
- L'informazione è dal principio convogliata ad aree > 2000 m mentre gli altri parametri sono distribuiti su tutto il territorio.
- Necessità di avere informazioni standard (classi definite) e non probabilistiche.

Come risoluzione a tale incompatibilità si è introdotta una riclassificazione delle aree deputate a permafrost Fig. permafrost_reclas.tif. Si sono di conseguenza individuate unicamente le aree dove il permafrost è stato individuato come "molto probabile" e definite le altre aree come "non possibili". L'obiettivo è stato quello di offrire un parametro coerentemente distribuito tra presenza e assenza di permafrost partendo dal modello utilizzato. Ma osservando la distribuzione geografica delle aree con permafrost (Permafrost likely)

- 1) Permafrost not possible
- 2) Possible permafrost
- 3) Likely permafrost

As clearly illustrated by Picture. permafrost_reclas.tif, considering the distribution of pixels, the majority of permafrost turned out to be "not possible"; immediately followed by "possible" permafrost. A small part of the area (around 1%) is characterised by a high probability of presence of permafrost. The initial pre-processing assessed criteria are as follows:

- *The analysis itself already represents a model output and not the real distribution of an element such as permeability, altitude or geology.*
- *The resolution of the permafrost element is 150 m, lower than the resolution of the other initial parameters. (e.g.. DEM 10m).*
- *From the beginning, the information is confined to areas below 2000 m, while the other parameters are used for the whole territory.*
- *Need to obtain standard and not probabilistic information (defined classes).*

A solution to such incompatibility is the reclassification of permafrost areas Picture permafrost_reclas.tif. This reclassification involved the identification of the areas where the presence of permafrost was "likely", while the other areas were defined as "not possible". This was aimed at offering a parameter that could clearly distinguish between presence and absence of permafrost on the basis of the used model. However, when observing the geographical distribution of the areas classified as "likely permafrost", it is easy to notice the scarce presence of permafrost in the Veneto territory, also in view of the said reclassification. It was therefore impossible to use the permafrost parameter in the landslide susceptibility analysis. From a statistical point of view, the weight of this parameter would have been too low if compared to the other parameters.

An adequate solution could be that of using a local scale deterministic model. This is due to the fact that the triggering factors of the single permafrost events (very rarely identified in the area of study) could be analysed through a geophysical and geotechnical study.

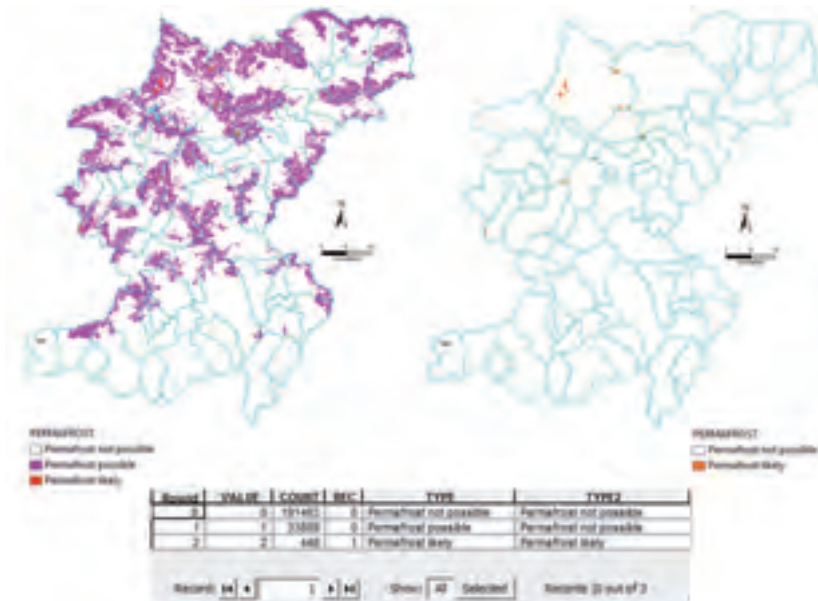


Fig. permafrost_reclas.tif. Carta di distribuzione permafrost secondo Alpine 3D. A sinistra la distribuzione originale e a destra riclassificata. La tabella mostra il campo "VALUE" associato all'informazione "TYPE" e il campo riclassificato "REC" associato a "TYPE2".
 Picture permafrost_reclas.tif. Permafrost distribution map according to Alpine 3D. To the left is the original distribution and to the right is its reclassification. The table illustrates the field "VALUE", associated with the element "TYPE" and the reclassified field "REC" associated with "TYPE2".

si sottolinea la generale scarsa distribuzione del permafrost nell'area veneta, anche considerando la riclassificazione.

Di conseguenza è risultato impossibile utilizzare il parametro permafrost nell'analisi di suscettibilità da frana. A livello statistico il peso che tale informazione avrebbe potuto avere sarebbe stato limitato e non confrontabile con gli altri parametri.

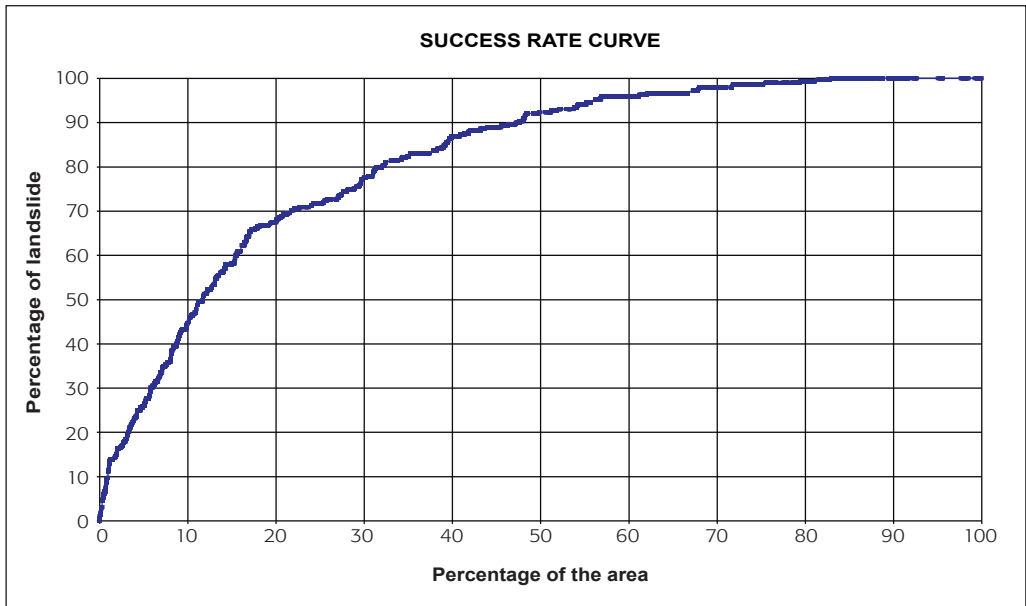
Una soluzione mediante modello deterministico a scala locale potrebbe essere una apprezzabile metodologia. La ragione è legata al fatto che avendo singoli spot con presenza di permafrost (raramente localizzati nell'area di studio) si potrebbe conseguentemente analizzare l'innesto dell'evento stesso a livello locale mediante analisi di tipo geofisico e geotecnico.

L'analisi sulle frane pregresse è stata condotta analizzando il database GeolFFI relativo all'intera provincia di Belluno. Delle diverse tipologie di fenomeni franosi si è scelto di prendere in considerazione esclusivamente gli eventi riconducibili a

The analysis on previous landslides has been carried out through a study of the GeoIFFI database on the entire Belluno Province. Out of all the listed landslide types, only the events originated from debris flows were taken into account. This was because such events are particularly typical of this territory as a result of its morphological features; the historical database is in fact mostly focused on these occurrences.

The database showed that some recorded debris flows had affected the valley bottom or certain town centres; these locations have therefore been eliminated as their spatial collocation was wrong for the purpose of the study. The database was further used to calculate the a priori probability³ of the events, and to later relate the various predictive elements with the debris flows.

3. The a priori event probability according to Bayes Theorem It constitutes the basis of every statistical model and it does not consider the parameters by which it may be influenced.



1. Success rate curve: valuta la capacità del modello di descrivere la distribuzione delle frane. Utilizzando il primo subset di dati, il modello mette in relazione la distribuzione spaziale delle frane con i predittori, calcolando la suscettibilità dell'area di studio. Nel grafico viene relazionata la percentuale di area predetta in frana con la percentuale di area realmente coperta da predittori utilizzati.

1. *Success rate curve, assessing the model's ability to describe the landslide distribution. Through the use of the first data subset, the model relates the landslide spatial distribution with the predictors and therefore calculates the susceptibility rate of the area of study. The graphic compares the percentage of the predicted landslide area with the percentage of area actually covered by the used predictive elements.*

colamenti rapidi (debris flow). Tale scelta è legata alla morfologia del territorio favorevole a questo tipo di eventi e a una archivio storico prevalentemente orientato a tale tipologia.

Analizzando il database, si è notato che alcuni debris flow mappati ricadevano sul fondovalle o nei centri abitati; si è quindi scelto di eliminare questi punti che presentavano un'errata collocazione nello spazio. Il database così ottenuto è stato successivamente utilizzato per calcolare la probabilità a priori³ degli eventi e successivamente per mettere in relazione i diversi predittori con i debris flow.

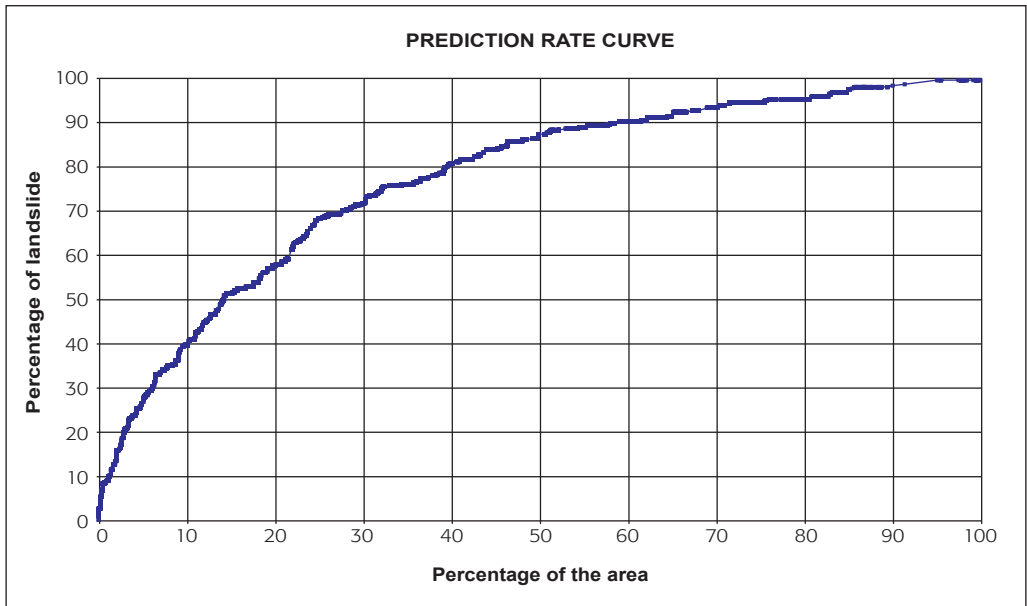
La carta Geologica utilizzata come predittore è stata precedentemente riclassificata sulla base del grado di permeabilità delle classi litologiche, valore già presente negli strati informativi (*featu-*

The geological map used as a predictor has been previously reclassified according to the degree of permeability of the lithological classes, a value that was already present in the reference features of the Veneto Region. The derived DEM and morphometric factors have also been classified and re-sampled by choosing a cell size of 20x20m.

The debris flow database has then been randomly divided into two data subsets: the first one was used to calculate the susceptibility rate on the entire area of study; the second one was used to assess the provisional strength of the model. To this end, the following two curves have been created:

The susceptibility map has then been divided into 5 classes (very high, high, medium, low, very low) according to the land predisposition to instability, expressed as a relative probability of occurrence. (picture suscettibilità)

3. La probabilità a priori dell'evento secondo il teorema di Bayes. È la base di ogni modello statistico, non tiene conto dei parametri che potrebbero influenzarla.



2. Prediction rate curve: valuta il potere predittivo del modello. La carta di suscettibilità derivata precedentemente viene infatti messa in relazione con il secondo subset di dati, verificando quindi quanti punti in frana ricadono nelle aree a maggiore suscettibilità. In questo caso il confronto è di tipo predittivo confrontando l'archivio eventi passati con le aree ad alta percentuale di accadimento.

2. *Prediction rate curve, assessing the model's ability to predict the landslide events. The previous susceptibility map is in fact compared to the second data subset, therefore assessing the number of landslide events that are present in the higher susceptibility areas. In this case the comparison is predictive, by way of relating the past events archive with the areas characterised by a high level of occurrence.*

res) di riferimento della Regione Veneto. Il DEM e i fattori morfometrici da esso derivati sono stati anch'essi classificati e ricampionati scegliendo come dimensione della cella 20x20m.

Il database relativo ai *debris flow* è stato successivamente suddiviso in modo casuale in due subset di dati: il primo è servito per calcolare la suscettibilità sull'intera area di studio, mentre il secondo è stato utilizzato per valutare la capacità previsionale del modello. Con tale finalità sono state costruite due curve:

La mappa di suscettibilità finale è stata infine suddivisa in 5 classi (molto alta, alta, media, bassa, molto bassa) in funzione della predisposizione al dissesto del territorio, espressa come probabilità relativa di accadimento. (fig suscettibilità)

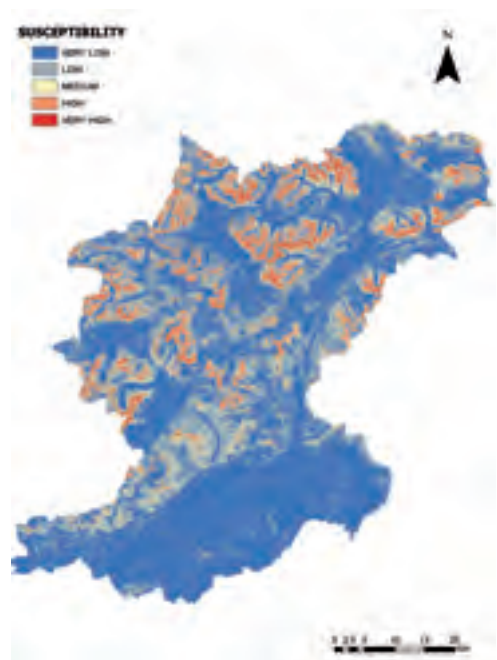


Figura.x. Mappa di suscettibilità da frana a 5 classi ottenuta con WOFE modeling.

Image.x. Landslide susceptibility map in 5 classes obtained through WOFE modelling.

7. Sito di studio: il Piz Boè

Site of study: the Piz Boè

Uno degli obiettivi del Progetto PermaNET è stata la realizzazione di nuovi siti di monitoraggio del permafrost in zone precedentemente non studiate. La Regione Veneto, per assolvere a tale compito, si è basata sulla precedente esperienza di ARPAV - Centro Valanghe Arabba, che nel 2005 nella zona del Piz Boè, ha condotto iniziali studi attraverso misure di temperatura alla base del manto nevoso (Bottom Temperature of Snow cover - BTS) ed indagini geoelettriche e sismiche. I risultati di questa prima ricerca, oltre alle caratteristiche fisiche ed alla collocazione geografica del sito in questione, hanno permesso di individuare come sito idoneo per l'installazione di una stazione di monitoraggio del permafrost, la zona antistante la cima del Piz Boè, in territorio di Livinallongo del Col di Lana a quota 2900 m circa (46.51 N, 11.83 E), al confine con l'Alto Adige. In quella zona era stato individuato nel passato un glacionevato (Glacionevato a Nord-Est del Piz Boè), citato nel World Glacier Inventory degli anni '80, oggi ridotto ad alcuni lembi per una superficie di 0.014 km², caratterizzato dalla presenza di un debris covered glacier (ghiacciaio sepolto da detrito), che in alcune carte viene classificato come rock glacier. Alla base dei detriti è presente un piccolo laghetto (Lech Dlacé), che, come evidenziato dal toponimo, è caratterizzato da presenza di neve e ghiaccio per la maggior parte dell'anno.

LA STAZIONE DEL PIZ BOÈ

Come fase preliminare nell'autunno 2009 sono stati posizionati due sensori termometrici (Hobo Pro V2 U23-001, Onset Computer Corp.) al fine di misurare le temperature alla base del manto nevoso nella primavera successiva. Scopo di queste misure, fatte nel tardo inverno, solitamente a Marzo e Aprile, quando la copertura nevosa

Building new permafrost monitoring sites in previously unresearched areas was one of the aims of the PermaNET project. To this end, Veneto Region took into account the previous experience of ARPAV - Centro Valanghe Arabba. During an initial research in 2005 in the Piz Boè area, the Bottom Temperature of Snow cover (BTS) was measured and geo-electrical and seismic tests were carried out. The results of this research, along with the physical attributes of the site and its geographic position, suggested the suitability for the installation of a permafrost monitoring station on the area facing the Piz Boè peak, in the Livinallongo territory on the Col di Lana, at an altitude of about 2900 m. (46.51 N, 11.83 E), near the South Tyrol border.

A snowfield insists on that area (Snowfield to the north east of Piz Boè), which was included in the World Glacier Inventory in the 1980's. Today, only a few bits of it remain, for a total extension of 0.014 km², characterised by the presence of a debris-covered glacier, which has been described in some maps as a rock glacier. A small lake (Lech Dlacé) is located at the base of the debris. As its name suggests, it is made of rock and ice for most of the year.

THE PIZ BOÈ STATION

During a preliminary phase, two thermometric sensors were set up in autumn 2009 (Hobo Pro V2 U23-001, Onset Computer Corp.) in order to measure temperatures under the layer of snow in the following spring. The aim of these measurements, normally made in March or April, when the quantity of snow is at its highest, is to estimate the Winter Equilibrium Temperature - WEqT. The WEqT is influenced by the presence or absence of permafrost or snow layer. When permafrost is present, the negative heat

è significativa, è stimare la temperatura di equilibrio invernale (Winter Equilibrium Temperature - WEqT). Quest'ultima è influenzata dalla presenza o assenza di permafrost, e dalla presenza o assenza del manto nevoso.

In presenza di permafrost, il flusso di calore negativo proveniente dal sottosuolo porta delle temperature di equilibrio significativamente negative (tipicamente meno di -2°C), mentre in condizioni di suolo non gelato, le temperature sono tipicamente vicine a 0°C o lievemente negative (Haerberli, 1973). La temperatura di equilibrio invernale diventa così un buon indicatore della presenza di permafrost (Tab x.x.) e può servire per distinguere zone a permafrost da zone non a permafrost, sempre che vi sia una significativa copertura nevosa, almeno 80/100 cm, formatasi nella prima parte dell'inverno e persistente per un periodo sufficiente a isolare il suolo dall'influenza atmosferica.

GST- WEqT ($^{\circ}\text{C}$)	
>-2	Permafrost improbabile <i>Permafrost improbable</i>
$-3 \div -2$	Permafrost possibile <i>Permafrost possible</i>
<-3	Permafrost probabile <i>Permafrost probable</i>

Un sensore è stato posizionato sulla roccia, nel luogo ipotizzato essere adatto ad ospitare il sito di monitoraggio, mentre l'altro è stato posto sulla fronte del debris covered glacier, sul quale le indagini geoelettriche e sismiche avevano evidenziato la probabile presenza di un nucleo di ghiaccio, che avrebbe influenzato le temperature superficiali.

Nel grafico (Fig. 1) sono state riportate le temperature registrate dai due dataloggers durante l'inverno 2009/2010, con indicazione di alcuni eventi meteorologici significativi, che hanno portato alla copertura del suolo da parte del manto nevoso ad inizio inverno e alla sua fusione nel periodo tardo primaverile. Il 17 Maggio 2010 è stato effettuato anche un profilo del manto nevoso e contestualmente è stata misurata la temperatura alla base di questo che ha evidenziato un valore di -1.5°C , molto vicino a quello misurato dal datalogger posizionato sulla roccia che

flow coming from below ground level causes significantly negative WEqTs (typically less than -2°C), whereas when the soil is not frozen, temperatures are close to 0°C or slightly negative (Haerberli, 1973). Winter Equilibrium Temperature therefore becomes a good indicator of permafrost presence (Tab x.x.) and can be used to identify permafrost areas and non permafrost areas, provided there is enough early winter snow on the ground, at least 80/100 cm, that has remained on the ground for long enough to isolate it from the influence of the atmosphere.

A sensor was placed on the rock, in a place that was deemed adapt to host the monitoring site, while the other was placed on the front of the debris-covered glacier upon which geo-electrical and seismic research showed a probable presence of an iced core that would have influenced the superficial temperature.

The graph (Picture 1) shows temperatures as registered by the two data loggers during winter 2009/2010, as well as the indication of important meteorological events that led to the ground being covered by snow at the start of the winter season and its melting in late spring. On the 17th of May, 2010, the snow layer was profiled, and temperature at its base was measured, reporting a figure of -1.5°C , which is very close to the -1.7°C registered on the rock by the data logger. It is clear how in the months of February, March and April temperatures in both sites fell to around -4°C and rose in the month of May until they reached a figure of just below 0°C (Zero curtain) in the month of June, thus showing a pattern normally typical only of snow-melting periods, when the snow is already completely melted (debris covered Glacier).

Based on the data registered during that winter, the presence of permafrost at the base of the Piz Boè was deemed possible, and for this reason it was decided to perform a drilling to investigate the temperature of the terrain.

In the summer of 2010, a drill core destruction of the dolomites rocks was carried out, and samples were collected for each metre, up to a depth of 30 metres. Such operation showed an unfractured, compact rock structure, without any traces of liquid or solid water. A PEAD tube with an internal diameter of 49 mm was

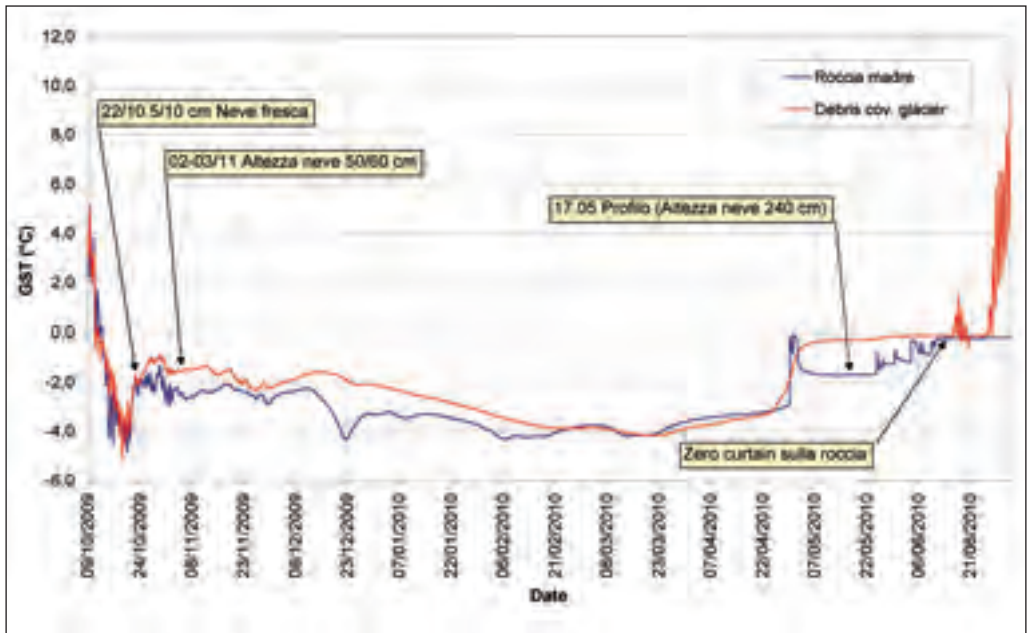


Figura 1. Temperature superficiali nella stagione invernale 2009/2010 nella zona del Piz Boè.

Picture 1. Surface temperatures during the winter season of 2009/2010 in the area of Piz Boè.

è risultato pari a -1.7°C . Si può notare come nei mesi di Febbraio, Marzo e Aprile la temperatura in entrambe i siti sia scesa attorno a -4°C , per poi risalire durante il mese di Maggio e raggiungere a Giugno valori appena inferiori a 0°C (Zero curtain), evidenziando così un comportamento riscontrabile solitamente durante la fusione del manto nevoso, in una situazione, invece, di neve già completamente fusa (debris covered Glacier).

Dai dati emersi durante quell'inverno è risultata quindi probabile la presenza di permafrost nella zona sottostante il Piz Boè, per tale motivo si è deciso di effettuare una perforazione in profondità per indagare lo stato termico del terreno.

Nell'estate 2010 si è proceduto, quindi, all'esecuzione di una perforazione a distruzione del nucleo in rocce dolomitiche, con prelievo di campioni ogni metro, fino a 30 m di profondità che ha rilevato roccia compatta, senza fratture, con assenza di acqua sia allo stato liquido che solido. Nel foro è stato inserito un tubo in pezzo unico in PEAD con diametro interno di 49 mm, sigillato alla base con termosaldatura e protetto alla

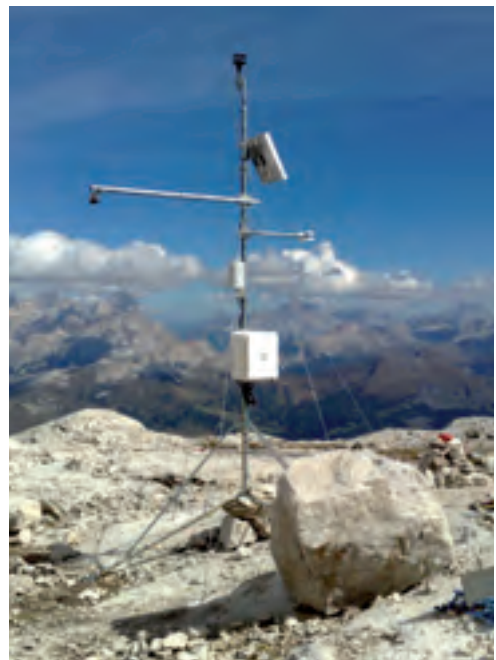


Figura 2. La stazione del Piz Boè.

Picture 2. The Piz Boè station.

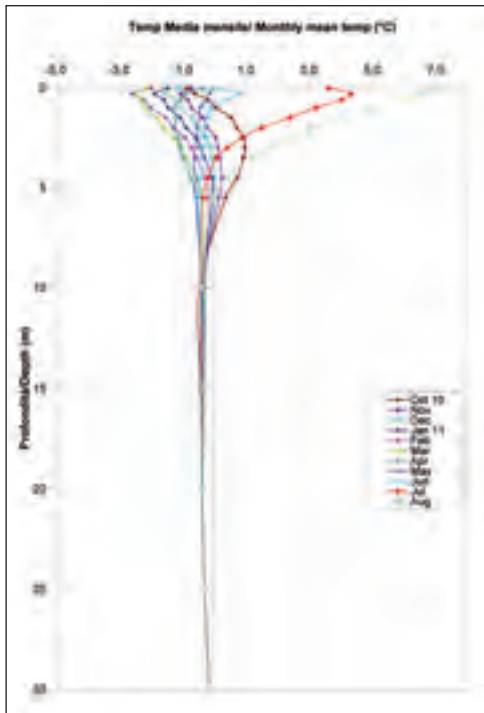


Figura 3. Temperature media mensile lungo il foro del Piz Boè.
Picture 3. Monthly mean temperature in the Piz Boè bore.

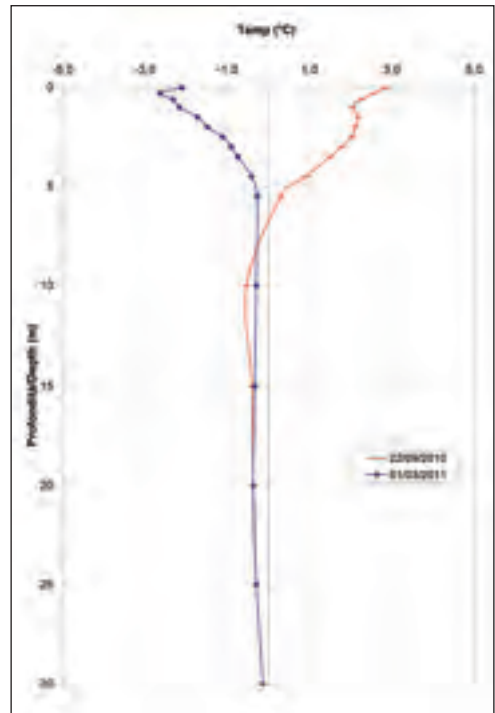


Figura 4. Profili di temperatura al Piz Boè.
Picture 4. Piz Boè temperature profiles.

sommità da una testa di pozzetto (cappellotto in metallo) fissato alla roccia con tre tasselli. L'intercapedine fra il tubo e la roccia è stata riempita con i detriti della perforazione e con un piccolo getto di malta in corrispondenza della superficie (5 cm). Successivamente, nel foro, è stata installata una catena termometrica dotata di 15 sensori (Stump ForaTec AG Termistori YSI 44031), posti rispettivamente alle profondità di 0.3, 0.6, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 3.5, 4.5, 5.5, 10.0, 15.0, 20.0, 25.0, 30.0 m, sigillata in testa con un cilindro in plastica unito al tubo mediante silicone e viti. Un ulteriore sensore è stato posizionato alla profondità di circa 2 cm nel sedimento, indipendente dalla catena termometrica, per misurare la temperatura superficiale del suolo (GST) a circa 5 metri di distanza dal luogo della perforazione e limitrofo al punto di misura da parte del nivometro, così da poter relazionare la temperatura superficiale e la presenza del manto nevoso. Congiuntamente alla catena termometrica, nel Settembre 2010, è stata installata una stazione

inserted in the bore, sealed at its base through thermal welding and protected at the top with a metal cover; the tube was then secured to the rock with three plugs. The gap between the tube and the rock was filled with debris deriving from the drilling operation and with a small casting of mortar at the surface level (5 cm). A thermometric chain with 15 sensors was then inserted into the bore (Stump ForaTec AG Termistori YSI 44031). The sensors were respectively located at a depth of 0.3, 0.6, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 3.5, 4.5, 5.5, 10.0, 15.0, 20.0, 25.0, 30.0 m, and the chain was sealed at the top with a plastic cylinder that was linked to the tube through the use of silicone and screws. Another sensor was placed at approximately 2 cm depth in the sediment, independent from the thermometric chain, in order to measure the ground surface temperature (GST) at 5 metres distance from the drilling spot, and in proximity of the nivometer measuring point, in order to be able to compare the surface tem-

meteorologica (Campbell Scientific AWS3000M), dotata di sensori per la misura della temperatura aria, umidità, direzione e velocità del vento, radiazione a onde corte e lunghe, incidente e riflessa (radiazione netta) e altezza del manto nevoso. Nell'estate 2011 si è dotata la stazione di un sistema di trasmissione via GPRS e si è integrata la sensoristica con un termometro a infrarossi per consentire di effettuare in maniera più semplice un bilancio radiativo. Inoltre è stato esteso il monitoraggio, della temperatura superficiale, precedentemente indagata con i due sensori utilizzati nella fase preliminare all'esecuzione del foro, posizionando 19 sensori termometrici in un'area più ampia, anche vicino al laghetto per verificare, l'eventuale presenza di permafrost anche in quella zona.

I primi risultati

Le temperature registrate dai sensori della catena termometrica sono risultate inizialmente (sett/ott 2010) positive sopra i 5.5 m, e lievemente negative sotto i 10 m (in dettaglio fra $-0.5/-0.31^{\circ}\text{C}$ a 10 m, e attorno a -0.12°C a 30 m), per poi diminuire durante i mesi invernali, quando, le

perature with the presence of snow carpet. In September 2010, together with the thermometric chain, a meteorological station was installed (Campbell Scientific AWS3000M), and it was provided with sensors for the measurement of air temperature, humidity, wind speed and direction, short-wave and long-wave incidental and reflected radiation (net radiation) and snow carpet height.

In the summer of 2011, the station was provided with a GPRS transmission system and the sensors integrated with an infrared thermometer in order to make it simpler to obtain a radiative balance. In addition, the monitoring of surface temperature that was previously measured through two sensors used before the execution of the bore was further integrated with the use of 19 thermometric sensors in a wider territory, also reaching the lake, in order to verify the presence of permafrost in that area.

Initial outcomes

Initially (Sep/Oct 2010), the temperatures recorded by the thermometric chain were positive above 5.5 m, and slightly negative below 10 m

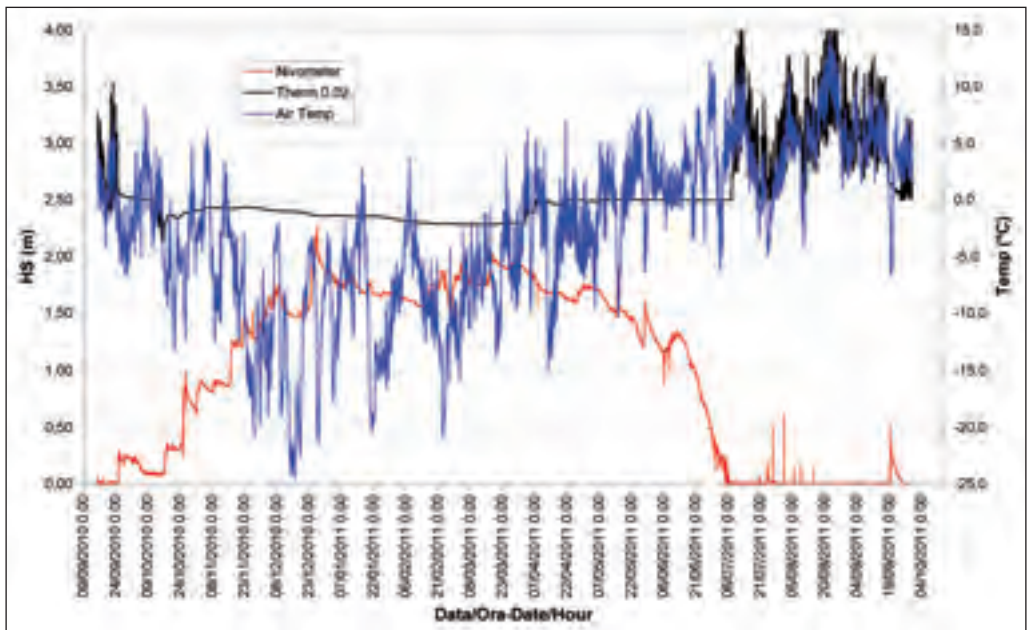


Figura 5. Temperatura aria, temperatura superficiale a altezza manto nevoso dal Settembre 2010 a Luglio 2011.
Picture 5. Air temperature, surface temperature and snow carpet height from September 2010 to July 2011.



Figura 6. Panoramica della zona del Piz Boè: sito della stazione, rock glacier con indicazione dei profili geoelettrici e Lech Dlacé.
 Picture 6. Overview of the Piz Boè area: location of the station, rock glacier with the details of the geo-electrical profiles and Lech Dlacé.

temperature sono scese a valori negativi lungo tutto il foro. Attorno ai 10 m la temperatura è risultata per tutto il periodo (settembre 2010–luglio 2011) abbastanza stabile fra -0.5 e -0.3°C , mentre a profondità maggiori la variazione è stata veramente contenuta, dell'ordine di $4\text{-}6/100$ di $^{\circ}\text{C}$ a 15 metri e $1/100$ di grado a 30 m. Nel grafico x.x. vengono riportati i valori medi giornalieri misurati a fine estate (22.09.2010, pochi giorni dopo l'installazione della stazione) e a inizio primavera (01.03.2011). Al fine di osservare anche l'evoluzione stagionale, si riporta il grafico (Fig. y.y.) con le temperature medie mensili da Ottobre 2010 a Giugno 2011, che evidenzia il riscaldamento nella porzione di terreno prossima alla superficie (a circa 3 m) già durante il mese di Aprile, dovuto alle alte temperature presenti in quel periodo, riscaldamento che è proseguito in maniera drastica nel mese di Maggio. Nel grafico di Fig. 5 sono riportate le temperature dell'aria, le temperature a 2 cm dalla superficie e le temperature registrate dal nivometro. Si può notare che la temperatura minima del suolo (therm 0,02) registrata durante i mesi di Febbraio e Marzo del 2011, risulta pari a -2.5°C , mentre, nel febbraio

(more precisely, between -0.5 and -0.31°C at 10 m, and around -0.12°C at 30 m), to later decrease during the winter season, when they reached negative values throughout the entire bore. Around 10 m, the recorded temperature stayed between -0.5 and -0.3°C throughout the entire period (Sep 2010–July 2011), whereas at higher depths there was a limited variation of about $4\text{-}6/100$ $^{\circ}\text{C}$ at 15 meters and $1/100$ at 30 m. Table x.x. illustrates the daily mean values taken at the end of the summer (22.09.2010, a few days after the station was installed) and at the beginning of spring (01.03.2011). The seasonal evolution is shown by the table (Picture y.y.) containing the monthly mean temperatures from October 2010 to June 2011, which highlights higher temperatures in the more superficial ground (around 3 m) in the month of April as a result of the warm climate of that period. In the month of May, the recorded temperatures were considerably higher. The table in picture 5 illustrates the temperatures of the air, the temperatures at 2cm from the surface and the temperatures recorded by the nivometer. It is easily observed that the minimum ground temperature

2010 lo stesso parametro mostra valori prossimi a a -4°C . Questo si può spiegare in quanto l'autunno non particolarmente freddo in quota, almeno fino a Novembre, e la precoce comparsa della neve, già a fine Ottobre, non ha consentito un significativo raffreddamento della roccia madre influenzando, così, il comportamento termico durante tutto l'inverno. Un profilo del manto nevoso effettuato il 12 Aprile 2011 ha mostrato una situazione prossima all'isotermità all'interno di questo, con temperature vicine a 0°C lungo tutto il profilo e alla base. Questo è confermato anche dal sensore posto a 2 cm di profondità, che ha misurato valori attorno a 0°C dalla seconda decade di Aprile fino al 6 Luglio, quando il manto nevoso si è fuso completamente permettendo una più diretta influenza delle condizioni atmosferiche sul terreno. In realtà già negli ultimi giorni di Giugno, in alcune zone la neve era completamente fusa, ad esempio in prossimità del foro, tanto che la temperatura a 30 cm di profondità mostrava valori marcatamente positivi (quasi 6°C) con una media mensile che risultava significativamente influenzata da questi valori, essendo già prossima a 1°C .

Le misure geofisiche

Nel 2005, nella zona antistante il Piz Boè, sulla superficie del debris covered glacier, venne condotta una campagna di misure geofisiche, sia con prove sismiche che geoelettriche, che rivelarono la probabile presenza di un nucleo di ghiaccio, posizionato al di sotto dei detriti.

Nell'ambito del Progetto PermaNET si è deciso di riproporre la campagna di misure, optando per le prove geoelettriche, al fine di verificare eventuali mutamenti del nucleo di ghiaccio, in relazione al regime termico degli ultimi anni.

Il 1 Settembre del 2010 è stata effettuata una tomografia elettrica utilizzando il dispositivo elettronico - Wenner e Schlumberger, con passo tra gli elettrodi pari a 4 m e profondità massima di esplorazione dell'ordine di 25 m, per una lunghezza di 124 m, in posizione limitrofa alla sezione effettuata nel 2005. Inoltre, intendendo estendere la zona di studio, è stata effettuata un'ulteriore sezione posta perpendicolarmente alla precedente, lungo la linea di massima pendenza.

L'inversione dei dati geoelettrici tomografici è stata eseguita con il metodo proposto da LaBrequé

(therm 0.02) recorded in February and March 2011, reached -2.5°C , whereas in February 2011 it was more around -4°C . This is due to the fact that the autumn season, up until at least the month of November, was not particularly cold at high altitudes, and the early appearance of snow (from the end of October) prevented the mother rock from becoming excessively cold, thus influencing the thermal patterns of the entire winter season. An analysis of the snow carpet carried out on 12th of April, 2011 showed a constant temperature of around 0°C at the basis and along the profile. This result was further confirmed by the sensor placed at 2 cm depth, which reported a temperature close to 0°C from the second decade of April up until the 6th of July, when the snow carpet melted completely, allowing a more direct influence of the weather conditions on the soil. Towards the end of June, the snow had already melted in some areas, for instance around the bore, and the temperature recorded at 30 cm depth was markedly positive (almost 6°C), with a resulting monthly mean temperature around 1°C .

Geophysical data

In 2005, the area opposite the Piz Boè, on the surface of the debris-covered glacier, a series of geophysical data were collected, both through seismic and geo-electrical measurements, which showed the probable presence of an ice core below the debris.

The PermaNET Project suggested the recollection of such measures by using geo-electrical tests in order to verify potential variations of the ice core as a result of the thermal regime of the recent years.

On the 1st of September, 2010, an electrical tomography was carried out by using the electronic device Wenner and Schlumberger, with a 4 m spacing between electrodes, a maximum depth of 25 m, 124 m length, in a position close to that of 2005. In order to extend the research area, a further section was made perpendicularly to the previous one, along the highest slope line.

The inversion of the tomographic geo-electrical data has been carried out by applying the method suggested by LaBrequé et al. (1996), which uses a finite elements algorithm based on the OCAM'S inversion concept (Oldenburg, 1994) and implemented by the PROFILER software

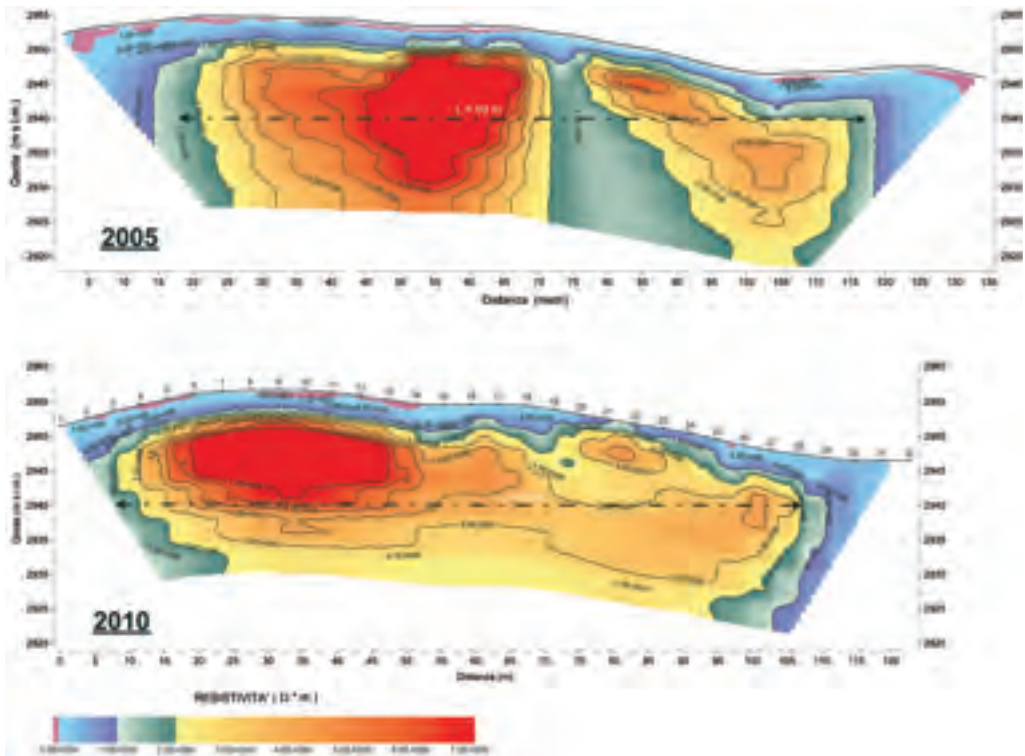


Figura 8. Tomografia di resistività elettrica nel 2005 e nel 2010.
 Picture 8. Electrical resistivity tomography in 2005 and 2010.

et alii (1996), mediante l'impiego di un algoritmo ad elementi finiti basato sul concetto di inversione di OCAM'S (Oldenburg, 1994) ed implementato nel software PROFILER (Binely, 2003). Il modello bi-dimensionale ottenuto dall'inversione dei dati di resistività apparente, riportato nelle Figure z e k, restituisce la distribuzione dei valori della resistività reale nel sottosuolo; quest'ultima è stata evidenziata sia da isolinee, sia da una scala colorimetrica. Al fine di evidenziare i fenomeni di maggiore interesse, la prima isolinea è stata tracciata per un valore pari a $5 \times 10^4 \Omega \cdot m$. La seconda isolinea ha valore $1 \times 10^5 \Omega \cdot m$, mentre le iso-resistive successive sono state poste a intervalli di $2 \times 10^5 \Omega \cdot m$ fino al valore di $1 \times 10^6 \Omega \cdot m$; per resistività più elevate, la spaziatura tra le isolinee è maggiore.

I modelli della distribuzione della resistività reale nel sottosuolo, hanno evidenziato la presen-

(Binely, 2003). The bi-dimensional model obtained from the inversion of the apparent resistivity data illustrated by Pictures z and k reflects the distribution of the real resistivity values of the underground layers: such values have been highlighted both by contour lines and by a colour scale. In order to highlight the most relevant events, the first contour line has been traced for a value of $5 \times 10^4 \Omega \cdot m$. The second contour line has a value of $1 \times 10^5 \Omega \cdot m$, while the following ones have been placed at intervals of $2 \times 10^5 \Omega \cdot m$ up to a value of $1 \times 10^6 \Omega \cdot m$; the space between the contour lines is higher for higher resistivity areas.

The models of distribution of the true resistivity in the underground layers showed the presence of three main electro-layers with pretty homogeneous resistivity values:

1. superficial electro-layer with resistivity values

za di tre elettrostrati principali, ognuno dei quali caratterizzato da valori di resistività relativamente omogenei:

1. elettrostrato superficiale, possiede valori di resistività elettrica inferiori a $5 \times 10^4 \Omega \cdot m$; è riconducibile alla presenza di depositi detritici senza ghiaccio e asciutti.
2. elettrostrato a resistività elevata ($1 \times 10^5 \Omega \cdot m < \rho < 1.5 \times 10^6 \Omega \cdot m$) correlabile con lo strato attivo, ghiaccio parzialmente attivo o blocchi ghiacciati, i quali possono essere misti a clasti lapidei eterometrici. Questo elettrostrato fa da transizione con quello più interno caratterizzato da resistività ancora più elevate.
3. elettrostrato a resistività molto elevata, è correlabile con il ghiaccio compatto e si caratterizza per resistività maggiori di $1.5 \times 10^6 \Omega \cdot m$ e valori massimi superiori a $5 \times 10^6 \Omega \cdot m$.

Paragonando i due profili effettuati nel 2005 e nel 2010 si può osservare che la geometria del corpo a resistività molto alta è simile nelle due sezioni. A 2940 m s.l.m., la larghezza dell'anomalia di resistività ($>1.5 \times 10^6 \Omega \cdot m$) è approssimativamente uguale a 99 metri. Lo strato superficiale, composto principalmente da blocchi misti a detrito a granulometria inferiore, mostra spessori molto simili, attorno ai 2 m. Lo spessore del nucleo di ghiaccio si mantiene inalterato in entrambi i casi: più profondo dei 23 m esplorabili dallo strumento. Limitate differenze nel comportamento delle iso-resistive negli stati più profondi possono essere imputate alla lieve differenza nel posizionamento della catena di elettrodi e anche all'elevata differenza puntuale delle resistività dei terreni superficiali che può influenzare, in parte, il processo di inversione.

Si può quindi concludere che le due sezioni risultano molto simili, con piccole differenze imputabili al metodo stesso.

Per quanto riguarda il profilo eseguito ortogonalmente al precedente la sezione mostra un settore con resistività elevata o molto elevata ($\rho > 7 \times 10^5 \Omega \cdot m$), che si estende tra le progressive 0 e 70 m. L'anomalia è ben delimitata verso valle. Infatti, a partire dalla progressiva 70 m la resistività cala bruscamente fino a raggiungere valori minimi inferiori a $1 \times 10^5 \Omega \cdot m$ in corrispondenza della parte finale del profilo. Tale fenomeno è, probabilmente, da imputare al progressivo passaggio da una situazione di ghiaccio compatto, ad una

below $5 \times 10^4 \Omega \cdot m$; linked to the presence of debris deposits without any traces of ice or water.

2. electro-layer with high resistivity values ($1 \times 10^5 \Omega \cdot m < \rho < 1.5 \times 10^6 \Omega \cdot m$), linked to the active layers, partially active ice or iced blocks that may be combined with heterometric stone clasts. This electro-layer represents the transition with the internal layer characterized by even higher resistivity values.

3. electro-layer with high resistivity values, linked to the presence of compact ice and characterized by resistivity values above $1.5 \times 10^6 \Omega \cdot m$ and maximum values above $5 \times 10^6 \Omega \cdot m$.

By comparing the profiles carried out in 2005 and 2001 it can be observed that the geometry of the high resistivity body is quite similar in the two sections. At an altitude of 2940 m a.s.l., the width of the resistivity anomaly ($>1.5 \times 10^6 \Omega \cdot m$) amounts to approximately 99 meters. The superficial layer, mainly made of mixed low granulometry debris blocks, presents very similar depths of around 2 m. In both cases, the ice core depth remains unvaried, going beyond the 23m depth limit of the instrument. Tiny differences in the iso-resistive behaviour of the deeper layers can be imputed to the slight different in the electrode chain positioning and to the high punctual difference of the resistivity values of the surface grounds that may partially affect the inversion process.

It is therefore possible to conclude that the two sections are very similar and that their differences result mainly from the method used.

As for the orthogonal profile, the section presents high or very high resistivity values ($\rho > 7 \times 10^5 \Omega \cdot m$) between 0 and 70 m depth. The anomaly is delimited downstream. Starting from a depth of 70 m, in fact, the resistivity values suddenly decrease to a minimum of $1 \times 10^5 \Omega \cdot m$ towards the bottom of the profile. Such phenomenon may originate from the gradual passage from a compact ice environment to an area where the ice is less compact and is already in the process of melting and mixing with stone material; the border of the profile is characterised by resistivity values that are typical of dry debris/morainic terrains with a predominant rough granulometry.

Towards upstream, a lower resistivity can be ob-

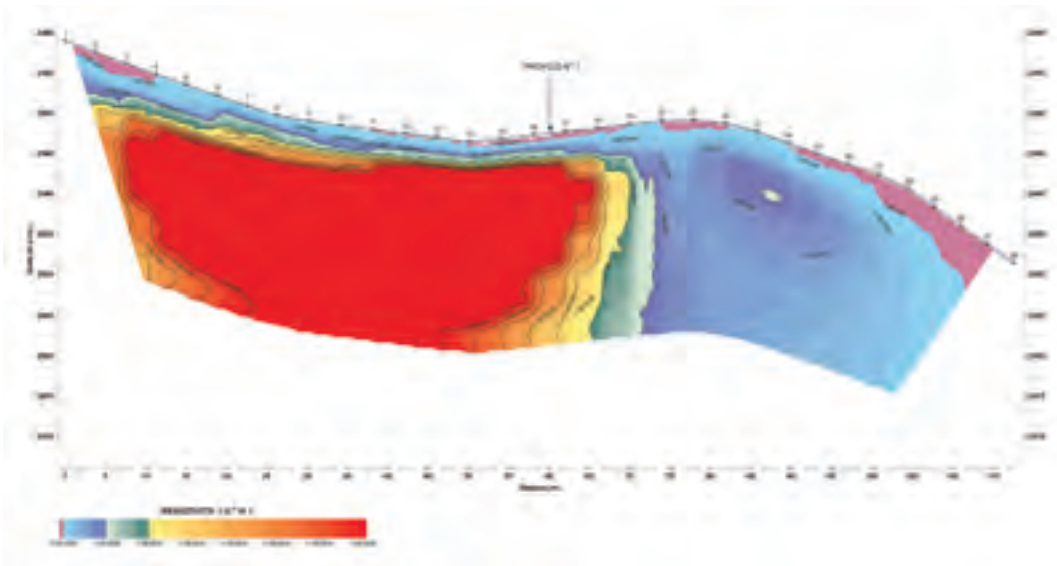


Figura 9. Tomografia di resistività elettrica nel profilo ortogonale del 2010.
 Picture 9. Electrical resistivity tomography in the orthogonal profile of 2010

zona dove il ghiaccio è meno compatto, forse in fase di parziale scioglimento e mescolato a materiale lapideo; all'estremità del profilo i valori di resistività sono tipici di terreni detritici/morenici asciutti e a granulometria grossolana prevalente ($\rho < 50.000 \Omega \cdot m$).

Verso monte si osserva ugualmente una diminuzione della resistività che, però, non scende sotto valori di $4-5 \times 10^6 \Omega \cdot m$: potrebbe trattarsi dell'inizio della zona di transizione verso la roccia in posto, ma, di fatto, non è possibile trarre delle conclusioni al riguardo. Il profilo non è quindi arrivato ad esplorare verso monte tutta l'estensione del corpo ghiacciato.

Sopra il corpo a resistività molto elevata sono presenti elettrostrati con resistività inferiori, correlabili con i depositi detritici e con lo strato attivo ($\rho < 6 \times 10^5 \Omega \cdot m$). Nella parte più elevata del profilo, tra le progressive 0 e 20 m lo spessore di questa copertura è prossimo a 5 m, mentre nella zona centrale, alla progressiva 50 m si riduce a 1.5-2 m. Nella parte finale del profilo, essendo i contrasti di resistività tra i terreni di copertura ed il materiale sottostante più sfumati, risulta difficile identificare la zona di contatto; fino alla progressiva 90 m, lo spessore sembra attestarsi

served, although never below $4-5 \times 10^6 \Omega \cdot m$: this could be the beginning of the transition area towards the bedrock. However, it is still not possible to come to such conclusions. Therefore, the profile did not explore upstream the whole extension of the iced area.

Some electro-layers with lower resistivity values are placed on the high resistivity body: these can be linked to the debris deposits and to the active layer ($< 6 \times 10^5 \Omega \cdot m$). In the highest part of the profile, between 0 and 20 m, the depth of the coverage reaches 5 m, while in its central part (50 m) it only reaches 1.5-2 m. Towards the end of the profile, due to the less clear nature of the contrast between the coverage and the underground material, it becomes quite difficult to identify the contact area; up to a 90m depth, the thickness appears to be around 4 m.

In the central part of the section, resistivity values are still very high at the maximum depth ($7 \times 10^6 \Omega \cdot m$), and the bedrock was therefore not reached. The verified ice thickness is therefore above 22 m, thus confirming the results obtained by the other profile.

When comparing the two orthogonal profiles of 2010, it can be observed how the first profile corresponds to the second one towards the bor-

su valori dell'ordine di 4 m.

In corrispondenza della zona centrale della sezione, alla massima profondità di indagine la resistività è ancora molto elevata ($7 \times 10^6 \Omega \cdot m$), e, pertanto, non è stato raggiunto il letto costituito dalla roccia in posto. Lo spessore accertato del ghiaccio è quindi maggiore di 22 m, confermando quanto rilevato nell'altro profilo.

Confrontando i profili ortogonali effettuati nel 2010, si può osservare come il primo profilo intersechi il secondo in prossimità del termine della zona presumibilmente occupata da ghiaccio sepolto compatto; il nucleo gelato si trova quindi quasi tutto nella zona a monte, mentre verso valle la zona è progressivamente occupata da materiale detritico misto a ghiaccio, forse in fase di fusione, fino a materiale detritico morenico asciutto.

RILIEVO LIDAR

Sul sito di studio del Piz Boè sono stati effettuati due rilievi LiDAR a distanza di circa un anno, rispettivamente nel settembre del 2010 e nel settembre 2011. La rete topografica di appoggio ai rilievi LiDAR è stata materializzata con chiodi a centrimento forzato. Il network comprende numerosi capisaldi nel sistema di riferimento locale e 4 punti di appoggio, le cui coordinate geografiche globali sono state determinate mediante un rilievo GPS di tipo statico. La successiva rototraslazione della rete locale nel sistema di riferimento globale ha permesso l'orientamento nel medesimo sistema di coordinate dei due rilievi, consentendo quindi di eseguire un confronto multitemporale.

La scansione laser del fronte del rock glacier è stato effettuato con strumento RIEGL LPM Z420i e camera digitale NIKON D200 con obiettivo calibrato da 20 mm (figura ff), ed è stato effettuato da tre posizioni differenti, al fine di garantire un inquadramento completo e dettagliato.

L'orientamento di ciascuna singola scansione risulta tuttavia arbitrario e casuale, portando a una diversa collocazione spaziale dell'oggetto ripreso. Per tale motivo tutte le posizioni di ripresa sono state successivamente orientate sulla base dei capisaldi di riferimento. La tecnica di riallaccio impiegata prevede il riconoscimento di pun-

der of the area presumably covered with buried compact ice; the iced core is therefore located mainly in the upstream area, while downstream the area is progressively covered with debris combined with ice (possibly in the process of melting) that gradually becomes dry debris/morainic material.

LIDAR SURVEY

Two separate LiDAR surveys were conducted on the Piz Boè site at a year's distance, in 2010 and 2011, in the month of September. The topographic network used for the LiDAR survey was made up of forced centring nails. The network includes many strongholds in the local reference system, and 4 footholds. Their position was determined by a static GPS reading. The local network's subsequent rototranslation into the global reference system allowed the orienting of the coordinates in the same system, and made possible a multi temporal comparison of the two studies.

The laser scan of the rock glacier front was performed using the RIEGL LPM Z420i instrument and a NIKON D200 digital camera with calibrated 20mm lens (Picture ff), and was taken from three different positions, thus allowing a complete and detailed framing.

The orienting of the different scans, though, was found to be random and arbitrary, which made for a different spatial collocation of the object of



Figura ff. Il RIEGL LPM Z420i in stazione sulla prima postazione sul sito del Piz Boè.

Picture ff. The RIEGL LPM Z420i in operation on the first station of the Piz Boè site.

ti omologhi (tie points o, nello specifico, target reflectors), riconoscibili in tutte le scansioni, che vengono utilizzati per la determinazione dei parametri di rototraslazione con variazione di scala. Le singole riprese possono in questo modo essere ricollocate in un sistema di riferimento "esterno" e comune.

Dal momento che per garantire la ripetibilità e quindi il confronto tra le scansioni, gli algoritmi di riallaccio, basati sul riconoscimento automatico di forme altamente riflettenti, non risultano idonei, il rilievo dei cilindri di dimensione e centroide noto (tie-points) è stato effettuato manualmente con l'uso della stazione totale ed inserito nella rete topografica di appoggio.

Le singole scansioni laser sono quindi state rototraslate vincolandole a tali punti e ridistribuendo lo scarto in funzione della geometria di controllo. Il rilievo, effettuato dalle tre differenti posizioni, comprende sia riprese areali dell'intero rock glacier, sia settori di particolare interesse, acquisiti con risoluzione angolare superiore.

Il prodotto grafico del primo rilievo LiDAR è stato riportato in figura ff, mentre quello del secondo rilievo in figura gg.

I due rilievi sono stati quindi sovrapposti al fine individuare e misurare le eventuali deformazioni occorse.

In corrispondenza del rock glacier sono state riscontrate variazioni di quota (asse z) comprese tra 0 e 7-10 cm circa. Tuttavia vista la soglia di

the scan. For this reason, from then on, every position was later oriented taking the strongholds as a reference. The re-linking technique implies the recognition of homologous points (tie points or, more precisely, target reflectors), to be found in every scan, which can be used to determine the rototranslation parameters complete with scale variations. This way, the different scans can be redeemed into an external, communal reference system.

The re-linking algorithms – which are based upon the automatic identification of highly reflective shapes – cannot guarantee the possibility of repeating and confronting the scans, therefore the identification of the known centroids (tie points) has been performed manually, using the total station inserted in the backing topographical network.

Every single laser scan was later rototranslated by linking it to the known points and distributing the difference using control geometry. The study as performed from three different positions is made of aerial pictures of the whole rock glacier and single high interest sectors, acquired with higher angular resolution.

Picture ff shows the graphic rendition of the first LiDAR survey, while the second is in picture gg.

The two studies were then superimposed to highlight and to measure any change that might have occurred.

Altitude variations were registered at the rock

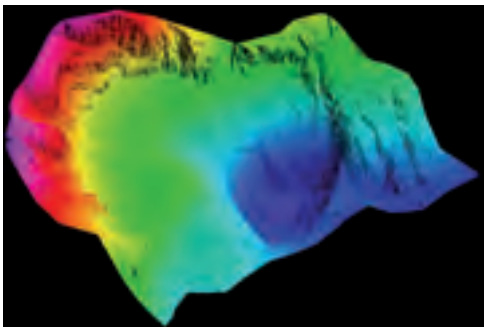


Figura ff. Rilievo ombreggiato della nuvola di punti acquisiti durante il primo rilievo LiDAR sul sito del Piz Boè. Il colore rappresenta il gradiente di quota.

Picture ff. The shadowed cloud of points as acquired during the first LiDAR survey on the Piz Boè site. Different colours account for a difference in altitude.

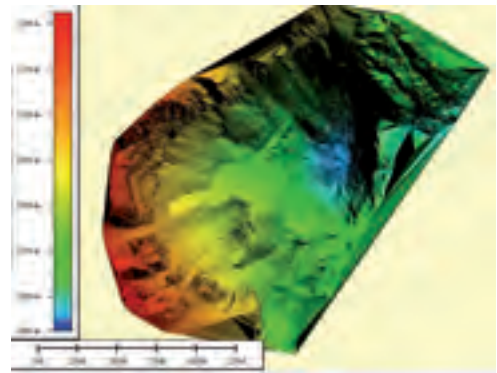


Figura gg. Rilievo ombreggiato della nuvola di punti acquisiti durante il secondo rilievo LiDAR sul sito del Piz Boè.

Picture gg. The shadowed cloud of points as acquired during the second LiDAR survey on the Piz Boè site.

accuratezza di ciascun rilievo (circa 2 cm r.m.s) e quindi di ripetibilità (4-5 cm), sono state rilevate variazioni dello stesso ordine di grandezza anche su aree stabili.

Considerando che le soglie di movimento ricercate risultano essere dello stesso ordine di grandezza delle oscillazioni statistiche, e che durante il primo rilievo era presente parecchia neve, che risulta invisibile al radar, si può concludere che le variazioni riscontrate sono difficilmente riconducibili ad un reale movimento (che può essere tranquillamente anche avvenuto con intensità minori), poiché le condizioni al contorno diverse, hanno incrementato il livello di incertezza nel confronto tra le due scansioni.

INDAGINI IDROLOGICHE ED IDROCHIMICHE SUL SITO DEL PIZ BOÈ

Introduzione

I rock-glacier attivi, definiti come una massa di roccia e ghiaccio in lento movimento, sono presenti in molte regioni alpine e sono considerati tra i più sensibili indicatori della presenza di permafrost e, conseguentemente, degli effetti dei cambiamenti climatici sulla criosfera (Haeberli, 1985). Alcuni autori affermano, basandosi su osservazioni in campo, che l'origine dei rock glaciers sia generalmente periglaciale (Haeberli, 1985), mentre secondo altri i rock glaciers possono essersi formati a seguito di un continuo processo glaciale/periglaciale come, ad esempio, l'evoluzione di un ghiacciaio ricoperto di detriti (Humlum, 1996; Krainer et al., 2002; Krainer and Mostler, 2000). I rock glaciers originatisi nel permafrost sono chiamati *ice-cemented rock glaciers* mentre quelli formatisi dall'evoluzione glaciale sono chiamati *ice-cored rock glaciers*.

Negli ultimi decenni, i rock glacier sono stati diffusamente studiati, soprattutto al fine di valutarne l'origine, l'evoluzione, le caratteristiche morfologiche, la distribuzione, la significatività climatica (Baroni et al., 2004; Barsch, 1996; Berger et al., 2004; Hausmann et al., 2007; Humlum, 1998; Krainer and Mostler, 2000; Seppi, 2004) e i rischi ambientali correlati alla degradazione del permafrost (Haeberli et al., 2002).

Sorprendentemente, scarsa attenzione è stata posta allo studio del regime idrologico dei rock glaciers attivi, così come delle caratteristiche

glacier (z axis) between 0 and 7-10 cm approx. However, taking into account the accuracy threshold of each study (approx 2 cm r.m.s) and repeatability (4-5 cm), similar variations have been reported on known static areas.

Considering that the detected movements are similar to static oscillations, and that a thick layer of snow – which is invisible to the radar – was present during the first study, we can determine in conclusion that the variations cannot be attributed to a genuine movement (without denying the possibility that this might actually have happened, perhaps on a minor scale), as the surrounding different conditions have increased the level of uncertainty between the two scans.

HYDROLOGICAL AND HYDROCHEMICAL RESEARCH ON THE PIZ BOÈ SITE

Introduction

Many Alpine regions are characterised by the presence of active rock-glaciers, defined as slowly moving masses of rock and ice; these are one of the main indicators of the presence of permafrost and, as a result, of the climate change effects on the cryosphere (Haeberli, 1985). On the basis of field observation, a number of authors tend to believe that rock glaciers originate from a periglacial process (Haeberli, 1985), whereas some others affirm that rock glaciers may have originated from a continuous glacial/periglacial process, such as the evolution of a glacier covered in debris (Humlum, 1996; Krainer et al., 2002; Krainer and Mostler, 2000). Rock glaciers originating within permafrost are called ice-cemented rock glaciers, whereas those coming from glacial evolution are called ice-cored rock glaciers.

Over the last few decades, rock glaciers have been widely studied, in particular with the purpose of analysing their origin, their evolution, their morphological features, their distribution and their effects on climate, (Baroni et al., 2004; Barsch, 1996; Berger et al., 2004; Hausmann et al., 2007; Humlum, 1998; Krainer and Mostler, 2000; Seppi, 2004) as well as the environmental dangers arising from the degradation of permafrost (Haeberli et al., 2002).

Surprisingly, little attention has been given to the hydrological regime of active rock glaciers and

idrochimiche delle acque. Solo in Williams et al. (2006) sono riportati i risultati della analisi chimiche effettuate su campioni di acqua di fusione proveniente da un ice-cored rock glacier. In particolare, non si conosce ancora la quantità di acqua proveniente dalla fusione del ghiaccio interno, in relazione con quelle provenienti dalla fusione della neve stagionale e dalla pioggia nel periodo estivo (Krainer and Mostler, 2002). Le implicazioni pratiche sono numerose, principalmente legate alla valutazione quantitativa della risorsa idrica immagazzinata nel permafrost, alla sua evoluzione in funzione dei cambiamenti climatici e alla caratterizzazione chimica delle acque di fusione. Ciò può avere impatti significativi sulla qualità della risorsa idrica, nel caso in cui le sorgenti captate per uso potabile si trovino in aree soggette a permafrost o in presenza di rock glaciers attivi.

Descrizione del Rock Glacier del Piz Boè

Il rock glacier del Piz Boè si trova nel gruppo dolomitico del Sella al confine tra le province di Belluno e Bolzano. Sulla base dei risultati degli studi di resistività elettrica eseguiti nel 2005 e nel 2010 è stato possibile verificare che questo rock glacier è di tipo *ice-cored*, con spessori di ghiaccio, nella parte posta più a Sud superiori a 20 m. La sua origine è probabilmente ascrivibile alla trasformazione della lingua nord-occidentale del ghiacciaio del Boè, ancora riportato nella cartografia austriaca prodotta nelle ultime decadi del 1800, dapprima in *debris covered glacier* (ghiacciaio ricoperto di detrito) e quindi alla sua lenta evoluzione in rock glacier. Questo rock glacier, di tipo *tongue shape*, è esposto a NW e collocato ad una quota compresa tra 2913 e 2965 m a.s.l. Ha una larghezza di circa 180 m e una lunghezza di 220 m. Da un'analisi delle ortofoto non appaiono solchi, ma il corpo del rock glacier presenta un'evidente salinatura trasversale in direzione Nord-Ovest. La copertura del deposito è costituita da massi, mediamente di dimensioni metriche. Il corpo detritico è delimitato da scarpate laterali piuttosto ripide, in corrispondenza della quali emergono ampi affioramenti di materiale mediamente più fine, con matrice ghiaiosa e massi di dimensioni sub metriche. La scarpata frontale si conclude in una valletta a forma di cucchiaino, sostenuta da una parete rocciosa che si estende in direzione SW-NE. A valle di questa

to the hydrochemical features of waters. Only Williams et al. (2006) offers the outcome of the chemical analysis carried out on samples of meltwater taken from an ice-cored rock glacier. In particular, the amount of meltwater coming from the internal ice is still unknown in relation to the amount of meltwater coming from snow in winter and from rain in the summer period (Krainer and Mostler, 2002). This has several practical implications, especially linked to the evaluation of the amount of water stored in the permafrost, to its evolution in relation to climate change and to the chemical features of meltwaters. In case of drinkable water supply sources that are located in areas featuring potential permafrost or active rock glaciers, the aforementioned aspect can severely affect their quality.

Description of the Piz Boè Rock Glacier

The Piz Boè rock glacier is located in the Sella mountain group, on the border between the Belluno and Bolzano provinces. The results obtained from the electrical resistivity studies carried out in 2005 and 2010 have allowed the classification of this rock glacier as ice-cored, featuring ice blocks higher than 20 meters in its southern part. This rock glacier is likely to have originated from the transformation of the north-western tongue of the Boè glacier, which still appears in the Austrian maps of the late 19th century, into a debris covered glacier, which then slowly turned into a rock glacier. This tongue-shaped rock glacier faces north-west and is located at an altitude between 2913 and 2965 m. a.s.l. It is approximately 180 m. wide and 220 m. long. Orthoimages do not show the presence of cracks; however, the body of the rock glacier features a clear transversal stair stepping towards North-West. The deposit is covered mainly in rocks that are generally measurable on a metric scale. The debris body presents steep lateral escarpments, where traces of thinner materials emerge, mainly of a pebbly type and rocks that are measurable on a sub-metric scale. At the bottom of the frontal escarpment, a small spoon-shaped valley is supported by a rock face that extends towards SW-NE. Downstream of this rock face is Lech Dlacé (also known as Frozen Lake), a small lake basin that is mainly fed by meteoric and surface run-off waters coming from the above snowfields and probably from the area

fascia rocciosa, si trova il Lech Dlacé (o Lago Gelato), piccolo bacino lacustre alimentato principalmente da acque meteoriche e di scorrimento superficiale (*run-off*), provenienti dai nevai sovrastanti e, probabilmente, dall'area interessata dal rock glacier, come testimoniato dai numerosi colatoi presenti lungo tutta la parete rocciosa (Fig. 1). La portata idrica di questi colatoi è variabile e, mentre solo il principale presenta un flusso continuo durante l'intera stagione estiva, gli altri sono alimentati solamente durante il disgelo primaverile e in occasione di precipitazioni atmosferiche. Il Lech Dlacé è un piccolo laghetto alpino poco profondo (*shallow alpine lake*) e rappresenta, con i suoi 2850 m di altitudine, il bacino lacustre più alto delle Dolomiti (Fig. 1). È di forma circolare, leggermente allungata sull'asse E-W; la

affected by the rock glacier, as also confirmed by the presence of several dripping areas on the rock face (Picture 1). The amount of water flowing through the dripping areas is variable; the main one is characterised by a continuous flow of water throughout the whole summer period, whereas the others are fed exclusively by the melting process in the spring and by occasional rainfall. Lech Dlacé is a small shallow Alpine lake and, with its altitude of 2850 m. it is the highest lake basin of the Dolomites (Picture 1). Its circular shape slightly stretches on its E-W axis. Its surface and the volume of its reservoir strongly depend on the weather conditions, such as the amount of snow in the winter and rainfall in the summer; over the last few years, the study of orthoimages and GPS surveys showed a



Figura 1. Rock glacier del Piz Boè (vista NE), delimitato a valle da una scarpata rocciosa/detritica che si sviluppa in direzione SW-NE. Sulla parete rocciosa si possono notare i segni di numerosi colatoi che trasferiscono le acque di weathering e discharge dall'area interessata dal permafrost al Lech Dlacé.

Picture 1. Piz Boè Rock Glacier (NE view), bordering downstream a rocky/debris escarpment extending towards SW-NE. The rock face features the signs of numerous dripping areas that transfer the weathering and discharge waters from the permafrost area to Lech Dlacé.

superficie, così come il volume di invaso, sono altamente variabili nel corso della stagione in relazione alla copertura nevosa invernale e agli apporti meteorici estivi; dall'analisi di ortofoto o rilievi GPS condotte negli ultimi anni la superficie massima stimata è risultata essere a 1870 m², e con una profondità massima di circa 2 m. Il lago non presenta emissari superficiali.

L'obiettivo di questo progetto è di caratterizzare dal punto di vista chimico ed isotopico le acque superficiali e meteoriche presso l'area del rock glacier del Piz Boè, nonché di effettuare una valutazione preliminare dei flussi idrici all'interno del bacino idrografico.

Campionamento ed analisi

Durante le stagioni estive 2010 e 2011 sono stati prelevati, con cadenza prima quindicinale (2010) e poi settimanale (2011), campioni di acqua dal Lech Dlacé, dai colatoi lungo la fascia rocciosa a monte del laghetto e dalle sorgenti limitrofe al rock glacier. È stata inoltre campionata un'ulteriore sorgente, posta a valle del rock glacier, ad una quota di 2550 m. Al fine di valutare l'origine delle acque superficiali presenti nel bacino del Boè, e specialmente se queste derivino direttamente dalle precipitazioni atmosferiche (*weathering*) oppure dalla degradazione del permafrost, sono stati prelevati campioni di neve e di pioggia. Per quanto riguarda la neve stagionale sono stati effettuati campionamenti stratigrafici nei mesi di maggio 2010 ed aprile 2011, al termine della stagione di accumulo e prima dell'inizio della fusione primaverile. Durante l'estate 2011 sono state raccolte le precipitazioni meteoriche utilizzando particolari deposimetri, campionati ad una frequenza di circa 2 settimane.

I campioni prelevati sono stati quindi analizzati presso i laboratori dell'IDPA-CNR, determinandone i parametri idrochimici di base tra cui pH, conducibilità elettrica, alcalinità, composti ionici principali (anioni: Cl⁻, NO₂⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻; cationi: Na⁺, K⁺, NH₄⁺, Mg²⁺, Ca²⁺), fosforo totale (P_{tot}), silice disciolta (Si) e carbonio organico disciolto (DOC). Al fine di caratterizzare, dal punto di vista geochimico, nel modo più dettagliato possibile le diverse sorgenti, sono state inoltre determinate le concentrazioni di elementi in tracce e metalli pesanti (Fe, Al, Li, Rb, Sr, Be, Cs, Ti, V, Mn, Ba, Ga, Sc, Ag, Sb, Tl, Pb, Th, U, Bi, Cd, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As), terre rare (Sc, Y, La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm,

maximum surface of 1870 m², and a maximum depth of approximately 2 m. The lake does not feature any surface effluents.

This project is aimed at defining the chemical and isotopic features of the meteoric and surface waters in the area of the Piz Boè rock glacier, as well as at evaluating the water flows of the hydrographic basin.

Sampling and analysis

In the summer of 2010 and 2011, on a fortnight (2010) and weekly basis (2011), a number of water samples have been extracted from Lech Dlacé, both from the dripping areas on its rock face upstream of the small lake and from the sources bordering the rock glacier. A further source located downstream of the rock glacier, with an altitude of 2550 m, has also been sampled. In order to define whether the surface waters in the Boè basin originate directly from rainfall or from the degradation of permafrost, a number of snow and rain samples have also been collected. Samples of seasonal snow have been collected in May 2010 and April 2011, just before the melting process that takes place in spring. During summer 2011, samples of meteoric rainfall have been collected on a fortnight basis through the use of special deposimeters.

The collected samples have been analysed by the IDPA-CNR laboratories in order to define their basic hydrochemical features such as pH, electrical conductivity, alkalinity, main ionic compounds (anions: Cl⁻, NO₂⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻; cations: Na⁺, K⁺, NH₄⁺, Mg²⁺, Ca²⁺), total phosphorous (P_{tot}), dissolved silica (Si) and dissolved organic carbon (DOC). In order to define in detail the geochemical features of the different sources, the concentration of trace elements and heavy metals has also been determined (Fe, Al, Li, Rb, Sr, Be, Cs, Ti, V, Mn, Ba, Ga, Sc, Ag, Sb, Tl, Pb, Th, U, Bi, Cd, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As), as well as rare earth metals (Sc, Y, La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) and the relations between hydrogen (δD) and oxygen (δ¹⁸O) stable isotopes.

Due to the risk of contamination resulting from the extremely low concentration of these elements, the samples have been treated and analysed inside a clean room. These special clean laboratories employ sophisticated air purifying systems that eliminate all the aerosol particles,

Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) e i rapporti tra gli isotopi stabili di idrogeno (δD) e ossigeno ($\delta^{18}O$).

Considerate le bassissime concentrazioni di taluni elementi e il conseguente rischio di contaminazione, i campioni sono stati trattati ed analizzati all'interno di clean-room. In questi particolari laboratori puliti, l'aria presente è purificata attraverso sofisticati sistemi di filtrazione, al fine di eliminare quasi totalmente le particelle di aerosol, le quali rappresentano una potenziale sorgente di contaminazione esterna. Le concentrazioni degli elementi in tracce, dei metalli pesanti e delle terre rare sono state determinate tramite spettroscopia di massa a settore magnetico con torcia al plasma accoppiato induttivamente (ICP-SFMS, ThermoScientific). Le concentrazioni degli ioni maggiori sono state determinate tramite cromatografia a scambio ionico mentre Si, P_{tot} e DOC per via spettrofotometrica nel campo del visibile ed ultravioletto (UV-VIS) ed infrarosso (IR). pH e conducibilità elettrica sono stati misurati per via potenziometrica mentre i rapporti degli isotopi stabili di idrogeno ed ossigeno tramite spettrometria di massa atomica.

All'interno del Lech Dlacé sono stati posizionati dei sensori in grado di registrare in continuo la temperatura e la profondità della colonna d'acqua, consentendo di stimare le variazioni del volume di invaso del laghetto e di valutare quindi, anche se indirettamente, gli apporti idrici. L'andamento della temperatura fornisce invece indicazioni sull'origine dell'acqua presente nell'invaso. Nelle acque del lago è stato inoltre posizionato un sensore di conducibilità elettrica al fine di studiare le variazioni della quantità di sostanze minerali disciolte sia in funzione del tempo che delle diverse condizioni meteo-climatiche. In corrispondenza della sensoristica immersa nelle acque del lago, è stato installato un palo meteorologico con strumenti per la determinazione della temperatura dell'aria, dell'umidità relativa e delle precipitazioni atmosferiche (Fig. 2). Altri sensori automatici di temperatura sono invece stati posizionati lungo il colatoio principale a valle del rock glacier.

Al fine di calcolare il volume di invaso del Lech Dlacé, è stato eseguito un rilievo topografico e batimetrico di dettaglio del bacino lacustre. Il rilievo topografico è stato quindi legato al rilievo eseguito con il laser scanner (vedi capitolo xx).

a potential source of external contamination. The concentration of trace elements, heavy metals and rare earth metals has been determined through a magnetic sector mass spectrometry with an inductively coupled plasma torch (ICP-SFMS, ThermoScientific). The concentrations of major ions have been determined through ion-exchange chromatography, whereas that of Si, P_{tot} and DOC has been determined through ultraviolet-visible (UV-VIS) and infrared (IR) spectrophotometry. pH and electrical conductivity have been measured through potentiometers, whereas the relations between hydrogen and oxygen stable isotopes have been determined through atomic mass spectrometry.

A number of sensors have been placed inside Lech Dlacé in order to continuously record the temperature and the depth of the water column, to determine the variations of the reservoir volume of the lake and to indirectly evaluate the water supply. The temperature variations pro-



Figura 2. Stazione meteorologica e supporto per i sensori di temperatura, profondità e conducibilità elettrica immersi nelle acque del Lech Dlacé.

Picture 2. Weather station and support for the temperature, depth and electrical conductivity sensors inside the waters of Lech Dlacé.

La portata del colatoio principale è stata misurata, a cadenza settimanale, utilizzando il metodo del riempimento del secchio. In pratica, dopo aver convogliato in modo quantitativo le acque della sorgente con l'ausilio di un telo di plastica, viene misurato il tempo necessario per portare a riempimento un contenitore di volume noto, da cui viene quindi calcolato il flusso idrico.

Risultati preliminari

L'analisi delle variazioni del livello del lago ha dimostrato che il livello idrometrico è rimasto pressoché costante a partire da luglio e fino al 23-24 agosto 2011 (Fig. 3). In questo periodo, gli apporti idrici all'interno del lago sono stati determinati esclusivamente dalla fusione della neve stagionale residua e dalle precipitazioni atmosferiche.

vide an indication on the origin of the reservoir water. An electrical conductivity sensor has also been positioned inside the lake with the purpose of analysing the variations of mineral substances dissolved according to the time and the weather. Besides these sensors, a meteorological pole has also been installed in order to determine the temperature of the air, the relative humidity and the rainfall (Picture 2). Some other automatic temperature sensors have been positioned alongside the main dripping area, downstream of the rock glacier.

In order to determine the volume of Lech Dlacé reservoir, a topographic and bathymetric survey has been carried out in the lake basin. The topographic survey has then been connected to the laser scanner survey (see chapter xxx).

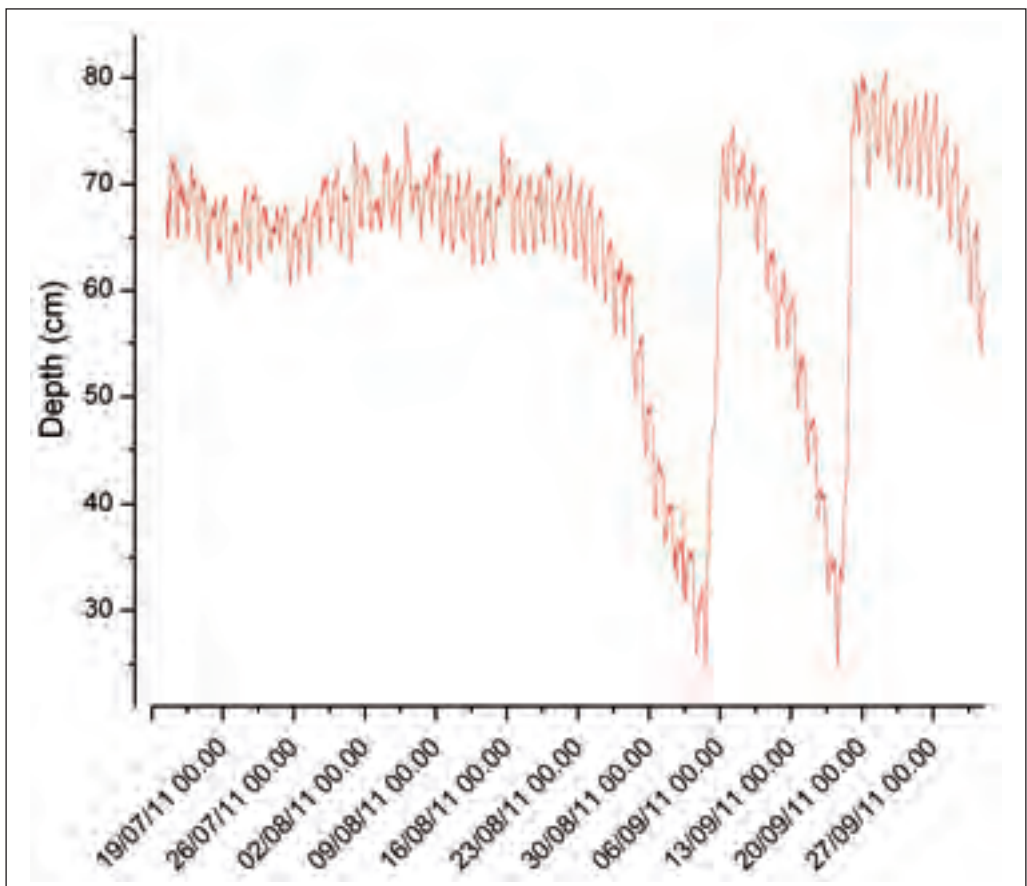


Figura 3. Variazioni del livello idrometrico del Lech Dlacé durante la stagione estiva 2011.

Picture 3. Variations of the hydrometric level of Lech Dlacé during the summer period of 2011.

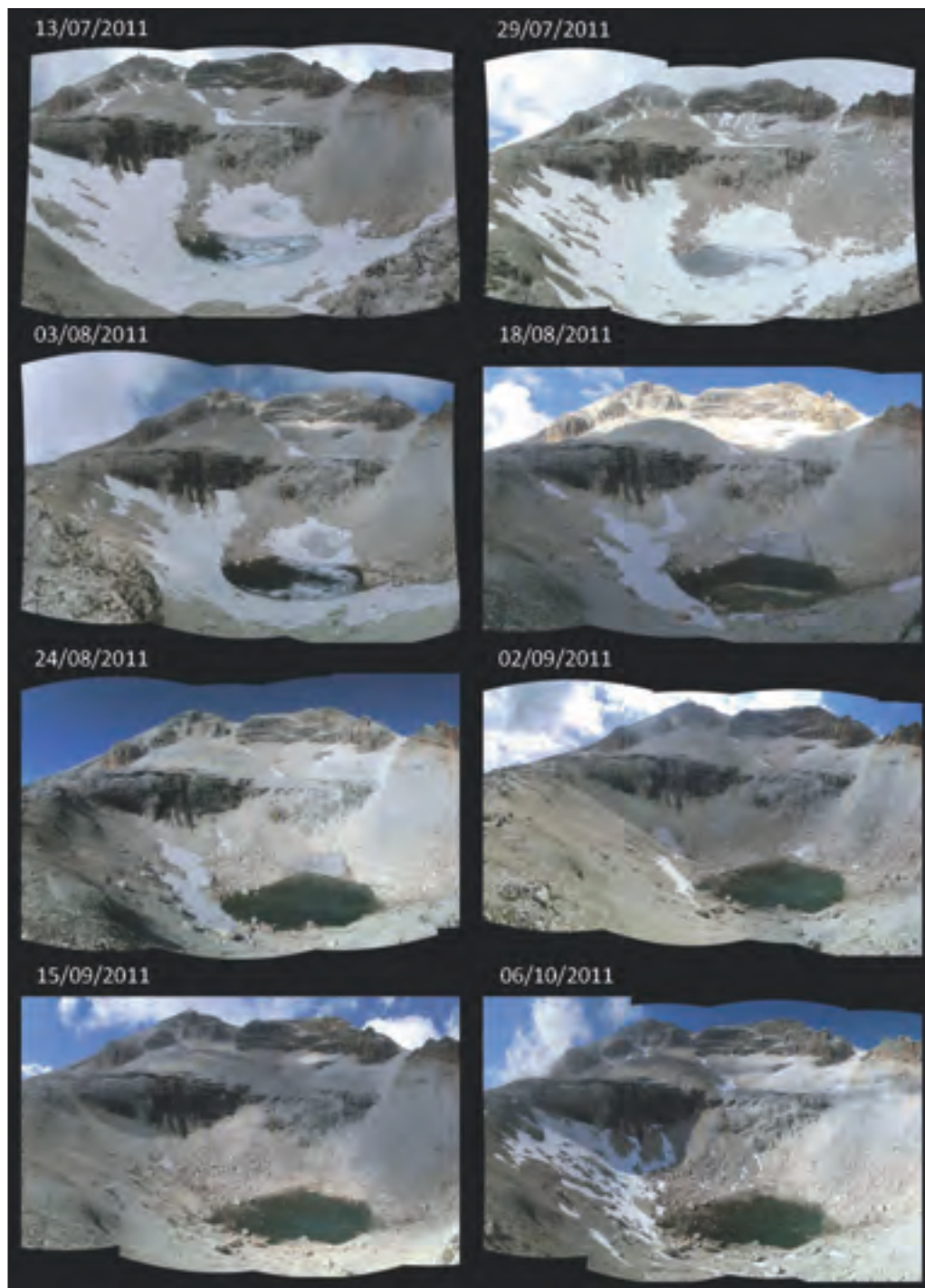


Figura 4. Evoluzione temporale della presenza di neve stagionale residua all'interno del bacino del Lech Dlacé durante la stagione estiva 2011.
Picture 4. Trend over time of residual seasonal snow in the Lech Dlacé basin during the summer period of 2011.

riche. Una volta terminata la fusione dei nevai maggiori all'interno del bacino idrologico (Fig. 4), il livello idrometrico del lago inizia a scendere fino a raggiungere il valore minimo assoluto il giorno 3 settembre. Dal 3 al 5 settembre, a causa delle intense precipitazioni meteoriche, si ha un innalzamento del livello idrometrico che, in meno di 48 ore, ritorna sui valori della seconda metà di luglio. Dal 7 al 17 settembre si registra un secondo abbassamento del livello delle acque del lago a cui fa seguito un ulteriore, repentino aumento dovuto ancora una volta alle abbondanti precipitazioni meteoriche tra il 17 e il 19 settembre.

The volume of the main dripping area has been measured on a weekly basis through the bucket fill method. Essentially, after collecting a considerable amount of source water with the use of a plastic sheet, this method involves measuring the time needed to fill a container of known volume. This allows calculating the water flow.

First results

The study of the variations has shown that the hydrometric level of the lake has remained unvaried from July to 23-24 August 2011 (Picture. 3). During this period of time, the water supply of

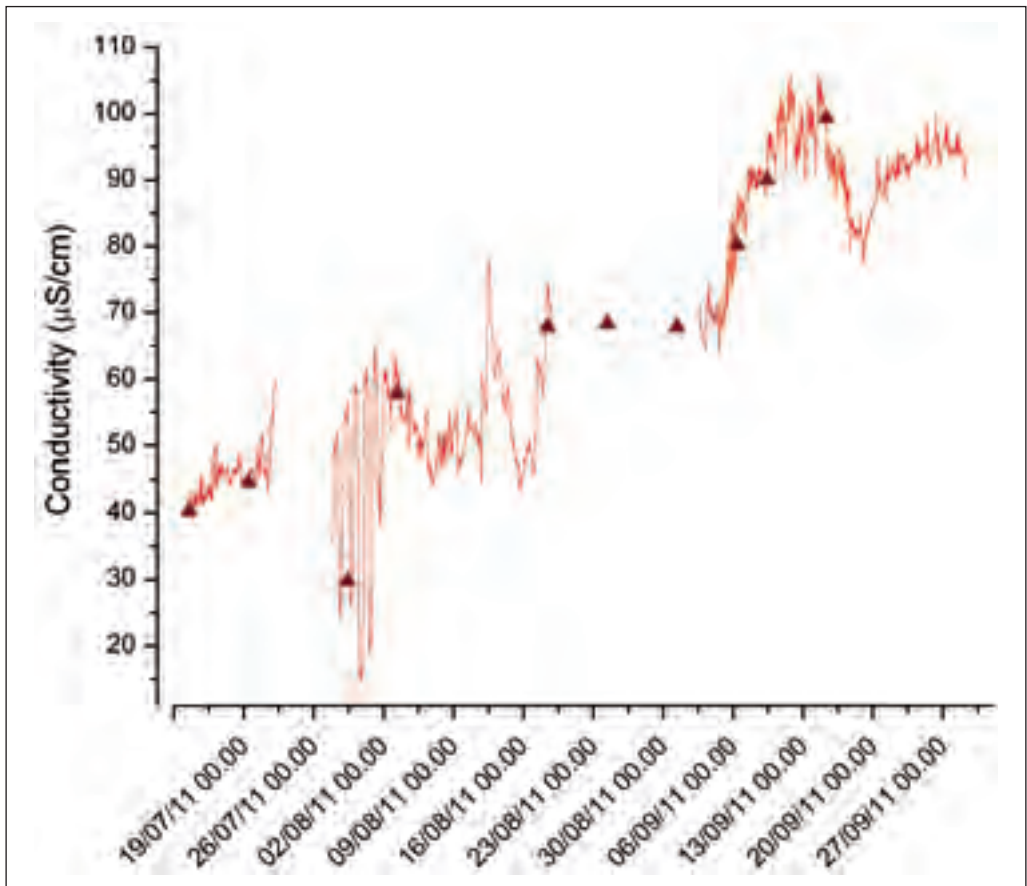


Figura 5. Variazioni della conducibilità elettrica delle acque del Lech Dlacé durante la stagione estiva 2011. La linea rossa rappresenta i dati acquisiti in continuo dal sensore di conducibilità posto all'interno delle acque del lago mentre i triangoli rappresentano i valori determinati in laboratorio sui campioni prelevati a cadenza settimanale.

Picture 5. Variations of electrical conductivity of Lech Dlacé waters during the summer period of 2011. The red line indicates the information continuously recorded by the conductivity sensor positioned inside the lake waters, whereas the triangles represent the values that have been determined in laboratory on the basis of the weekly samples.

La conducibilità elettrica aumenta durante la stagione, passando da circa 40 $\mu\text{S}/\text{cm}$ di metà luglio ad oltre 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dell'inizio autunno (Fig. 5). Durante la prima parte dell'estate infatti, le caratteristiche chimiche delle acque superficiali all'interno del bacino sono fortemente influenzate dalla fusione nivale che, specialmente durante le ore più calde della giornata, libera grandi quantità di acqua dolce, con un basso contenuto di sali minerali disciolti. Il ciclo diurno/notturno delle concentrazioni di ioni disciolti durante il periodo di fusione nivale è particolarmente accentuato negli ultimi giorni del mese di luglio, quando si è verificata la fusione repentina della neve caduta nei giorni 23, 24 e 25 luglio. Con la completa fusione della neve stagionale residua, all'abbassamento del livello idrometrico si accompagna un aumento della conducibilità elettrica delle acque superficiali dovuto ad un maggior apporto relativo di acque sotterranee, caratterizzate da concentrazioni più elevate di specie ioniche disciolte. Rispetto ai dati relativi al termine della stagione 2010, si nota come le conducibilità elettriche nello stesso periodo del 2011 siano superiori, probabilmente della minor apporto derivante dalla fusione nivale.

L'analisi degli andamenti stagionali delle concentrazioni di ioni maggiori, elementi in tracce ed isotopi stabili di idrogeno ed ossigeno fornisce importanti informazioni sulle variazioni delle caratteristiche geochimiche delle acque superficiali, rendendo possibile l'identificazione dell'origine delle acque, discriminando tra fusione nivale, precipitazioni meteoriche, acque sotterranee e degradazione del permafrost e del limitrofo rock glacier.

the lake has originated exclusively from the melting of the seasonal snow and atmospheric rainfall. Once the melting process of the main snowfields into the hydrological basin terminated (Picture 4), the hydrometric level of the lake began to decrease, to reach its lowest value on the 3rd of September. From the 3rd to the 5th of September, the intense meteoric rainfall caused an increase in the hydrometric level, which went back to the July values in less than 48 hours. Between the 7th and the 17th of September, the water level of the lake further decreased, to later increase again as a result of the heavy meteoric rainfall between the 17th and the 19th of September.

During the season, the electrical conductivity increased from 40 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (mid July) to over 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (beginning of Autumn) (Picture 5). At the beginning of the summer period, the climate features of the surface waters of the basin are largely affected by the melting of the snow, which provokes an intense flow of freshwater characterised by low concentration of dissolved mineral salts, especially during the warmest hours of the day. As a result of the rapid melting of the snow that had fallen on 23rd, 24th and 25th of July, the night and day cycle of ions dissolved during the snow melting process was particularly prominent in the last few days of the month. At the end of the melting process, the decreasing of the hydrometric level is combined with a higher electrical conductivity of the surface waters due to a stronger underground water flow. These waters present higher amounts of dissolved ionic species.

The electrical conductivity recorded in 2011 is certainly higher than that of the same period of 2010, and this is probably because of a lower amount of meltwater coming from the seasonal snow.

The study of the seasonal variations of the concentration of major ions, trace elements and hydrogen and oxygen stable isotopes provides important details on the variations of the geochemical features of surface waters. It therefore allows determining the origin of waters, whether they come from the melting of snow, meteoric rainfalls, underground waters or degradation of the permafrost or the bordering rock glacier.

Conclusioni

Conclusions

Il Progetto PermaNET ha dato un notevole impulso allo studio del permafrost sulla montagna veneta. L'applicazione in simultanea di due modelli diversi (Alpine 3D e APMOD), unitamente alla realizzazione del catasto dei rock glacier, ha permesso, , di avere una prima valutazione sull'estensione odierna del permafrost sul nostro territorio montano.

In tutta la Regione del Veneto l'area presumibilmente interessata da permafrost, presente a tutte le condizioni termiche, si avvicina a 5 km², dato che costituisce meno del 0,03% del territorio regionale, e che tale area è confinata alle quote elevate, prevalentemente sopra i 2500 m, soprattutto sulle alte creste dolomitiche.

Per studiare i possibili rischi naturali derivati dalle variazioni del permafrost a causa dei cambiamenti climatici, sul territorio della provincia di Belluno posto al di sopra dei 2000 m di quota, sono state applicati diversi metodi di indagine il cui confronto e sovrapposizione hanno fornito una mappatura approfondita dell'area indagata. I dati derivati dal DEM e dall'analisi spaziale sono stati confrontati in modo deterministico con la distribuzione degli eventi storici e delle aree a dissesto digitalizzate, specialmente in aree ritenute maggiormente predisposte al distacco (esposizione tra N/NE e N/NW e pendenze superiori al 60%).

Stesso tipo di confronto è stato fatto considerando la distribuzione degli eventi e gli *output* dello *Stream Power Index*, indice che consente di definire le aree predisponenti l'incanalamento e di conseguenza una marcata adattabilità del territorio alla presenza di colate di detrito o terra (*debris o earth flow*). Inoltre, tale indice permette di creare mappe di densità del distacco utilizzando i parametri derivanti dal DEM. Il confronto ha portato ad un autocontrollo sulla predisposizione all'evento stesso.

L'applicazione dell'indagine interferometrica ha permesso di individuare le aree soggette a de-

The PermaNET Project has given a significant contribution to permafrost research in the Veneto mountain region. Thanks to the simultaneous application of two different models (Alpine 3D and APMOD) and the creation of a rock glaciers' register, it was possible to obtain an overview on the current distribution of permafrost in our mountain area.

In Veneto Region, an area of approximately 5 km² is presumably covered by permafrost, irrespectively of the thermal conditions: this represents less than 0.03% of the entire regional territory and mainly refers to areas with an altitude of over 2500 m, in particular the high Dolomites' peaks.

With the aim of studying the natural dangers associated with the permafrost variations as a result of climate change in the Province of Belluno territory with an altitude of over 2000 m, a number of research methods have been applied and compared to obtain a detailed mapping of the area of study. The data obtained from the DEM and the spatial analysis have been compared with the historical events distribution and the digitalized unstable areas using a deterministic approach, especially in the areas with a highest predisposition to instability (exposure between N/NE and N/NW, slopes over 60%).

The same approach has been used by comparing the event distribution and the outputs of the Stream Power Index, which allows defining the areas with a higher predisposition to instability and, consequently, a significant adaptability of the territory to the presence of debris or earth flow. Furthermore, the above index allows the creation of detachment density maps through the use of DEM parameters. Thanks to this comparison, it was possible to monitor the predisposition to the event itself.

The use of interferometric analysis has allowed

formazione le quali sono state, successivamente, georeferenziate, importate in ambiente GIS e sovrapposte alla carta inventario derivata dalla fotointerpretazione e dai tematismi IFFI.

I risultati ottenuti possono essere considerati molto incoraggianti. Dal confronto incrociato i dati, derivati dall'elaborazione interferometrica su immagini ERS, appaiono più affidabili in virtù della loro maggiore quantità, della copertura temporale e della geometria di ripresa (orbita discendente). È bene comunque sottolineare che le velocità di deformazione stimate sono state mediate sul periodo 1992-2000 e pertanto non possono essere considerate attuali. Dai dati emersi dall'elaborazione delle immagini ENVISAT, contrariamente, si individua un numero decisamente inferiore di aree deformative, ma la velocità stimata è da ritenersi più aggiornata.

Risulta utile notare, comunque, che la mancata individuazione di spostamenti in aree soggette a dissesto, può essere dovuta anche alla temporanea inattività dei fenomeni, o a deformazioni che hanno una componente lungo la linea di vista del radar troppo piccola per essere apprezzata o troppo grande da far sì che il segnale di ritorno risulti incorrelato tra successive acquisizioni. Inoltre va sottolineato che il segnale di ritorno è risultato processabile ed interpretabile solo su 66 dei 959 eventi franosi individuati dalla fotointerpretazione e che quindi solo il 7% delle aree a dissesto ha potuto essere analizzato con le tecniche interferometriche.

Infine, l'interpretazione statistica offerta da un modello multivariato ha offerto la possibilità di creare una mappa di suscettibilità da frana per l'intera area di studio, usando una risoluzione a 10 m. Per tale analisi sono stati impiegati diversi parametri geologici e morfologici, standardizzati e riclassificati. In questa analisi non è stato possibile coinvolgere direttamente la mappa del permafrost, fornita da precedenti modellazioni statistiche, poiché la sua distribuzione non era significativamente rappresentativa è risultata, quindi, ininfluenza al calcolo effettuato.

Attraverso il progetto PermaNET è stato, inoltre, realizzato un sito di studio, presso la cima del Piz Boè, nel gruppo dolomitico del Sella, che oltre ad incrementare la rete di monitoraggio del permafrost a scala alpina, ha dato la possibilità di effettuare degli studi multidisciplinari che hanno analizzato in modo approfondito la complessa si-

the identification of areas subject to deformations, which were later geo-referenced, imported in a GIS environment and superimposed on the register map derived from the photo-interpretation technique and the IFFI data.

The results can certainly be described as encouraging. The data derived from the interferometric processing on ERS images appear more reliable because of their quantity, the available time and the acquisition geometry (descending orbit). It is however important to point out that the estimated deformation speeds refer to the period between 1992 and 2000, and cannot therefore be considered up to date. Conversely, the data derived from the ENVISAT images processing provides a lower number of deformation areas, while the estimated speed is certainly more up to date.

It must be added that the absence of movements in areas subject to instabilities may result from a temporary inactivity of the events or from deformations of a very small component that cannot be detected by the radar's line of sight or with a very big component, so that the return signal appears unrelated between consecutive acquisitions. Furthermore, we need to highlight that it was possible to process and interpret the return signal of only 66 out of 959 landslides detected by the photo-interpretation technique, and that only 7% of the instable areas could be analysed with interferometric techniques.

Finally, the statistical interpretation deriving from a combination of models allowed the creation of a landslide susceptibility map for the entire area of study by using a 10 m resolution. A number of standardised and reclassified geological and morphological parameters have been used for such analysis. The permafrost map deriving from previous statistical modelling was not directly involved in the analysis, since its distribution was not sufficiently relevant for our measurement.

In addition, as part of the PermaNET Project, a site of study has been installed at the peak of the Piz Boè, within the Sella mountain group: this has played an important role for the Alpine permafrost monitoring network and acted as a basis for multidisciplinary studies that researched in detail the complex situation of the correspondent area. The constant monitoring of temperatures at different degrees of depth through a thermometric chain located inside a

tuazione dell'area in questione. Il monitoraggio in continuo delle temperature a diverse profondità tramite catena termometrica posizionata all'interno di un foro in roccia di 30 m, realizzato a quota 2900 m, ha consentito di verificare la presenza di temperature inferiori a 0°C per circa un anno, sottolineando, così, la concreta possibilità dell'esistenza di permafrost a tale quota. Il monitoraggio della temperatura superficiale (GST) nelle zone circostanti la stazione è stato effettuato proprio per osservare la distribuzione spaziale, su scala locale, dell'eventuale presenza di permafrost. I rilievi geoelettrici realizzati nell'estate del 2010 al fine di studiare in particolare il rock glacier presente nel sito, hanno confermato la presenza di ghiaccio sepolto al di sotto del detrito.

I possibili movimenti del rock glacier determinati dall'eventuale fusione/alterazione della massa glaciale sono stati analizzati anche attraverso tecniche avanzate quali l'interferometria ed il LIDAR. Lo studio interferometrico, non ha evidenziato deformazioni misurabili in corrispondenza del rock glacier, anche se sono state individuate diverse aree in movimento, situate per lo più ai margini dell'area di studio, al di fuori della provincia di Belluno. La stessa sovrapposizione dei due rilievi LIDAR effettuati nel 2010 e 2011 ha riconosciuto variazioni nel rock glacier che, a causa di situazioni al contorno diverse (rilievo di settembre 2010 con presenza di neve, rilievo di settembre 2011 con assenza di neve), non possono essere direttamente attribuite ad un reale movimento di quest'ultimo; non si esclude, però, che tale movimento possa essersi verificato con intensità inferiori rispetto a quelle misurate.

L'utilizzo di tali metodologie, congiuntamente al rilievo topografico effettuato nel settembre 2011, ha fornito una base per controllare l'effettivo movimento del rock glacier, attraverso il confronto con i prodotti di studi analoghi che potranno essere realizzati in un futuro nell'area di indagine.

Lo studio multidisciplinare applicato al sito periglaciale del Piz Boè è stato inoltre completato attraverso lo studio del regime idrologico all'interno del bacino, nonché l'analisi delle caratteristiche idrochimiche delle acque presenti.

L'esecuzione di una precisa caratterizzazione, dal punto di vista fisico, geo-chimico ed isotopico, delle acque superficiali, lacustri e meteoriche presso l'area del rock glacier del Piz Boè, ha permesso di registrare, sia durante la campagna di campiona-

30 m bore in a rock, at an altitude of 2900 m, allowed the detection of temperatures lower than 0°C for approximately one year, thus confirming the concrete possibility of permafrost present at such altitudes. The Ground Surface Temperature (GST) in the area neighbouring the station has been monitored in order to observe the spatial distribution, on a local scale, of the possible presence of permafrost. The geo-electrical surveys of summer 2010, aimed at specifically analysing the rock glacier of the site, confirmed the presence of debris-covered ice.

The potential movements of the rock glacier resulting from the possible melting/alteration of the ice mass have also been analysed through the use of technologically advanced methods such as interferometry and LIDAR. The interferometric analysis did not detect any deformations around rock glaciers; it did however highlight a number of moving areas, mainly at the borders of the area of study, outside the territory of Belluno Province. By superimposing the two LIDAR surveys of 2010 and 2011 it was possible to observe a number of variations on the rock glacier that, because of their different environments (presence of snow in the September 2010 survey, absence of snow in the September 2011 survey), cannot really be attributed to a real movement of the glacier itself; however, it is possible to infer that such movement may have taken place with a lower intensity than the one we measured.

The use of such methods, in conjunction with the topographic survey of September 2011, may serve as a basis to monitor the actual movement of the rock glacier, through the comparison with similar future studies of the same area.

The multi-discipline research on the peri-glacial area of the Piz Boè was completed through the analysis of the hydrological regime inside the basin and that of the hydro-chemical features of the waters.

Thanks to a precise physical, geo-chemical and isotopic characterisation of the superficial lake and meteoric waters of the Piz Boè rock glacier area, it was possible to record significant variations in the seasonal patterns of the concentration of the monitored chemical parameters, both during the preliminary sampling process of 2010 and during the intensive sampling process of 2011. We were therefore able to confirm that

mento preliminare 2010 che in quella intensiva 2011, notevoli variazioni negli andamenti stagionali delle concentrazioni dei vari parametri chimici monitorati. Si è potuto, così, verificare che tali variazioni sono legate alla differente origine delle acque all'interno del bacino idrologico durante la stagione estiva ed autunnale ed in particolare alla variazione relativa degli apporti derivanti da fusione nivale, precipitazioni meteoriche, acque sotterranee e degradazione del permafrost e del limitrofo rock glacier.

Grazie, quindi, alle conoscenze acquisite attraverso il Progetto PermaNET, è stata creata una base per i futuri studi relativi all'evoluzione del permafrost ed alle sue implicazioni sull'ambiente dolomitico del Veneto, soprattutto in relazione ai cambiamenti climatici in atto.

Questi ulteriori approfondimenti consentiranno di studiare, con un dettaglio ancora maggiore, le dinamiche idrologiche del bacino del Piz Boè, ponendo le basi per una modellizzazione della risorsa idrica presente nell'area, sia dal punto di vista quantitativo che qualitativo.

Inoltre, la presenza della stazione meteorologica e di monitoraggio del permafrost, che attualmente fornisce sia lo stato termico della roccia nonché la possibilità di effettuare dei bilanci radiativi, permetterà, in futuro, l'applicazione e la verifica di modelli fisici di simulazione del permafrost.

such variations were resulting from the different origin of the waters of the hydrological basin during the autumn and summer season, and in particular from the different contributions given by meltwaters, rainfall, underground waters and the degradation of permafrost and the neighbouring rock glacier.

The knowledge acquired through the PermaNET Project therefore allowed creating a basis for future studies on the evolution of permafrost and on its implications on the Dolomite area of Veneto, especially in relation with the current climate change.

These future studies will certainly provide more detailed information on the hydrological patterns of the Piz Boè basin, thus laying the foundation for modelling the local water supply, both from a quantitative and a qualitative point of view.

Furthermore, the presence of a permafrost monitoring and meteorological station, currently informing us on the thermal conditions of the rocks and on the possibility of carrying out radiative balances, will allow in the future the application and verification of physical models of permafrost simulation.

Bibliografia

References

- AA.VV.**, 2004 - *Italia dei Tipi Geografici*. - Istituto Geografico Militare. Firenze: 254-257.
- BARKER R.D.**, 1981 - *Offset system of electrical resistivity sounding and its use with a multicore cable*. - Geophysical Prospecting, 29: 128-143.
- BARONI C., CARTON A.,** Seppi R., 2004 - *Distribution and behaviour of rock glaciers in the Adamello-Presanella massif (Italian Alps)*. - Permafrost and Periglacial Processes, 15: 243-259.
- BARSCH D.**, 1996 - *Rockglaciers: indicators for the present and former geoecology in High Mountain Environments*. - Springer, Berlin.
- BERARDINO P., FORNARO G., LANARI R., SANSOSTI E.**, 2002 - *A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms*. - IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 40(11): 2375–2383.
- BERGER J., KRAINER K., MOSTLER W.**, 2004 - *Dynamics of an active rock glacier (Otztal Alps, Austria)*. - Quaternary Research, 62: 233-242.
- BIANCHI CASTIGLIONI G.B.**, 1960 - *Osservazioni morfologiche sulla Valle di S. Pellegrino nelle Dolomiti*. - Rivista Geografica Italiana, 67: 393-415.
- BINELY A.**, 2003 - *2D inversion of apparent resistivity data using "Profiler"*. - Institute of Environmental and Natural Sciences, Lancaster University, LANCASTER, UK.
- BOECKLI L., NOETZLI J., GRUBER S.**, 2011 - *Permafrost Layer for the Veneto Region*. Internal Report.
- BOECKLI L., BRENNING A., GRUBER S., NOETZLI J.**, 2011 - *A statistical permafrost distribution model for the European Alps*. - The Cryosphere Discussion, 5: 1419–1459.
- BOSELLINI A.**, 1989 - *La storia geologica delle Dolomiti*. - Edizioni Dolomiti.
- BRABB E.E.**, 1984 - *Innovative approaches to landslide hazard mapping*. - 4th International Symposium on Landslides, Toronto, 1: 307–324.
- CAGNATI A., CREPAZ A., CAROLLO F., LENHING M., VÖLKSCH I.**, 2006 - *Permafrost nel bacino del Cordevole - Studio sulla distribuzione potenziale del permafrost mediante l'utilizzo del modello Alpine3D*. - Neve e Valanghe, 58: 82-89.
- CARTON A., DRAMIS F., SMIRAGLIA C.**, 1988 - *A first approach to the systematic study of the rock glaciers in the Italian Alps*. - Senneset K. (ed.), Permafrost Fifth International Conference Proceedings, August 2-5, 1988: 712-717.
- CARTON A., SMIRAGLIA C.**, 1998 - *Introduzione al «catasto dei rock glaciers delle Alpi Italiane»*. in Guglielmin M. e Smiraglia C. Catasto dei rock glaciers delle Alpi Italiane. Archivio del Comitato Glaciologico Italiano n 3.
- CREMONESE E., GRUBER S., PHILLIPS M., POGLIOTTI P., BOECKLI L., NOETZLI J., SUTER C., BODIN X., CREPAZ A., KELLERER-PIRKLBAUER A., LANG K., LETEY S., MAIR V., MORRA DI CELLA U., RAVANEL L., SCAPOZZA C., SEPPI R., ZISCHG A.**, 2011 - *Brief communication: "An inventory of permafrost evidence for the European Alps"*. - The Cryosphere Discussion, 5: 1201-1218.
- DEL LONGO M., FINZI E., GALGARO A., GODIO A., LUCHETTA A., PELLEGRINI G.B., ZAMBRANO R.**, 2001 - *Response of the Val d'Arcia small dolomitic glacier (Mount Pelmo, Eastern Alps) to recent climatic changes. Geomorphological and geophysical study*. - Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, 24: 43-55.
- FERRETTI A., PRATI C., ROCCA F.**, 2001 - *Permanent Scatterers in SAR interferometry*. - IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 39: 8–20.
- FIERZ C., RIBERA P., ADAMS E.E., CURRAND A.R., FÖHN P.M.B., LEHNING M., PLÜSS C.**, 2003 - *Evaluation of snow-surface energy balance models in alpine terrain*. - Journal of Hydrology, 282: 76-94.
- HAEBERLI W.**, 1985 - *Creep of mountain permafrost: internal structure and flow of Alpine rock glaciers*. - Mitteilung der VAW ETH, Zurich, 77.

- HAEBERLI W., BURN C. R.**, 2002 - *Natural hazards in forests: glacier and permafrost effects as related to climate change*. - Environmental change and geomorphic hazards in forests, Sidle, R. C. Editors, IUFRO Research Series, 9.
- HAEBERLI W.**, 1973 - *Die Basis-Temperatur der winterlichen Schneedecke als möglicher Indikator für die Verbreitung von Permafrost in den Alpen*. - Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, 9: 221-227.
- HAUSMANN H., KRAINER K., BRUCKL E., MOSTLER W.**, 2007 - *Creep of two Alpine rock glaciers - observation and modelling (Oetztal and Stubai Alps, Austria)*. - Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung, 43: 145-150.
- HENDERSON F. M., LEWIS A. J.**, 1998 - *Principles and Applications of Imaging Radar* - Manual of Remote Sensing, 2, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- HUMLUM O.**, 1996 - *Origin of rock glaciers: observations from Mellemfjord Disco Island, Central West Greenland*. - Permafrost and Periglacial Processes, 7: 361-380.
- HUMLUM O.**, 1998 - *The climatic significance of rock glaciers*. - Permafrost and Periglacial Processes, 9: 375-395.
- KRAINER K., MOSTLER W.**, 2000 - *Reichenkar Rock Glacier: a Glacier Derived Debris-Ice System in the Western Stubai Alps, Austria*. - Permafrost and Periglacial Processes, 11: 267-275.
- KRAINER K., MOSTLER W.**, 2002 - *Hydrology of active rock glaciers: examples from the Austrian Alps*. - Arctic, Antarctic and Alpine Research, 34: 142-149.
- KRAINER K., MOSTLER W., SPAN N.**, 2002 - *A glacier-derived ice-cored rock glacier in the Western Stubai Alps (Austria): evidence from ice exposures and ground penetrating radar investigation*. - Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, 38: 21-34.
- KRAINER K., LANG K., HAUSMANN H.**, 2010 - *Active rock glaciers at Croda Rossa/hohe gaisl, eastern Dolomites (Alto Adige/south tyrol, northern Italy)*. - Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, 33: 25-36.
- LABREQUE D.J., MILETTO M., DAILY W., RAMIREZ A., OWEN E.**, 1996 - *The effects of noise on Occam's inversion of resistivity tomography data*. - Geophysics, 61: 538-548.
- LEHNING M., VÖLKSCH I., GUSTAFSSON D., NGUYEN T.A.**, Stähli M., Zappa M., 2006 - *ALPINE3D: A detailed model of mountain surface processes and its application to snow hydrology*. - Hydrol. Processes, 20: 2111-2128.
- MAIR V., ZISCHG A., LANG K., TONIDANDEL D., KRAINER K., KELLERER-PIRKLBAUER A., DELINE P., SCHÖNEICH P., CREMONESE E., POGLIOTTI P., GRUBER S., BÖCKLI L.**, 2011 - *PermaNET - Permafrost Long-term Monitoring Network. Synthesis report*. - INTERPRAEVENT Journal series 1, Report 3. Klagenfurt, Austria.
- MANTOVANI F., SOETERS R., VAN WESTEN C.J.**, 1996 - *Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe*. - Geomorphology 15: 213-225.
- NANGERONI G.**, 1938 - *Forme glaciali nel Gruppo di Sella (Dolomiti)*. - Boll. Com. Glac. It. 18
- OLDENBURG D., LI Y.**, 1994 - *Inversion of induced polarization data*. - Geophysics, 59, 9: 1327-1341.
- PELTZER G., CRAMPÉ F., HENSLEY S., ROSEN P.**, 2001 - *Transient Strain Accumulation and Fault Interaction in the Eastern California Shear Zone*. - Geology, 29: 975-978.
- SEPPI R.**, 2004 - *Caratteristiche morfodinamiche di due rock glaciers attivi nel gruppo Adamello-Presanella*. - Studi Trentini di Scienze Naturali, Acta Geologica, 81: 75-85.
- STEINKOGLER W., BAVAY M., LEHNING M.**, 2011 - *Permafrost simulation in the Dolomites using Alpine3D – Version 2.0. Final – last update report May 12, 2011*. - WSL Institute for Snow and Avalanches Research SLF – Internal report.
- WILLIAMS M. W., KNAUF M., CAINE N., LIU F., VERPLANCK P. L.**, 2006 - *Geochemistry and source waters of rock glacier outflow, Colorado Front Range*. - Permafrost and Periglacial Processes, 17: 13-33.
- ZEBKER H.A., VILLASENOR J.**, 1992 - *Decorrelation in interferometric radar echoes*. - IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 30, 950-959.

Stampato
nel mese di settembre 2011
da Cierre Grafica scarl
Verona
www.cierrenet.it