

Covariables couvrant l'ensemble du territoire pour les cartographies numériques des sols: terrain et utilisation du sol

Fiche d'information

Dr. Felix Stumpf et Dr. Armin Keller
Juin 2020

Sommaire

1	Cartographie numérique	3
2	Relief: analyse de terrain multi-échelles	4
3	Utilisation du sol: séries temporelles spectrales	7
4	Références	10

1 Cartographie numérique

La cartographie du sol classique repose sur une description qualitative des relations sol-paysage. Ce modèle conceptuel est utilisé pour choisir des sites de prélèvement représentatifs à partir desquels les propriétés pédologiques correspondantes sont appliquées à une unité paysagère homogène. En raison de son caractère qualitatif, la cartographie du sol classique présente des lacunes en termes de reproductibilité, de continuité de la représentation cartographique et d'incertitudes quantifiées (Kempen et al., 2012; Stumpf et al., 2017).

La cartographie numérique se base quant à elle sur une description quantitative de la relation sol-paysage. Elle fait appel à des modèles mathématiques et statistiques qui permettent de combiner des informations pédologiques ponctuelles avec des covariables disponibles pour l'ensemble de la surface. La propriété du sol est ensuite prédite pour la surface considérée au moyen du modèle calibré et des covariables. Le caractère quantitatif d'une cartographie numérique élargit ainsi la cartographie du sol classique en permettant une reproduction, une représentation cartographique continue ainsi qu'une évaluation au moyen d'incertitudes (spatiales) quantifiées (Behrens and Scholten, 2006; Stumpf et al., 2017; Viscarra Rossel et al., 2015).

Le concept de base de la cartographie du sol - tant classique que numérique - peut être décrit à l'aide d'un modèle facteurs-état dans lequel la propriété du sol S est une fonction issue du sol (S), du climat (C), de l'utilisation du sol (O), du relief (R), du matériau parental (P), du temps (A) et de la position géographique (N) (fig. 1; Jenny, 1941; McBratney et al., 2003).

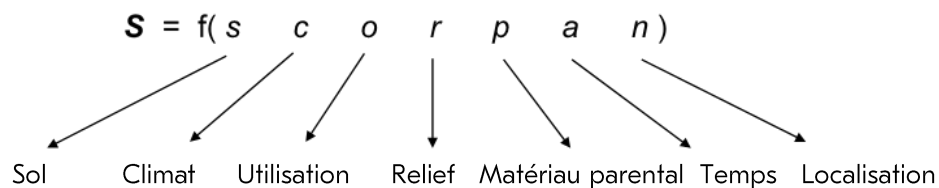


Fig. 1: Le modèle facteurs-état de la cartographie numérique du sol; le sol S en tant que fonction de différentes covariables disponibles pour toute la surface considérée.

2 Relief: analyse de terrain multi-échelles

Contexte

Le relief est un important facteur pédogénétique. Il peut être décrit par des attributs de terrain dérivés de modèles altimétriques (Behrens et al., 2010a). Les attributs de terrain sont les covariables les plus couramment utilisées pour la cartographie numérique des sols (Behrens et al., 2010b).

Il existe par ailleurs des corrélations à différentes échelles spatiales entre les attributs de terrain servant à décrire le sol. Ces corrélations multi-échelles ont une influence sur la pédogenèse et sur la variabilité spatiale du sol (Behrens et al., 2018a). Par exemple, des caractéristiques de terrain régionales peuvent influencer le régime pluviométrique et déterminer ainsi des propriétés du sol sensibles à l'humidité. Il est donc particulièrement important pour la cartographie numérique des sols de décrire le relief avec des attributs de terrain multi-échelles (Behrens et al., 2018b).

Méthode et exemples

L'analyse de terrain multi-échelles est fondée sur le modèle altimétrique swissALTI^{3D} à une résolution de 2 m. Le modèle altimétrique swissALTI^{3D} se base sur des campagnes de mesures aéroportées visant à générer des données de scanner laser et des orthophotos (SwissTopo, 2020). SwissALTI^{3D} a en outre été élargi dans l'espace sur une bande de 30 km au-delà de la frontière suisse à l'aide de données altimétriques de la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Le modèle altimétrique SRTM est disponible à une résolution spatiale de 30 m (Farr et al., 2007). Cet élargissement spatial est nécessaire pour réduire au minimum les artefacts affectant les attributs de terrain dans la zone de la frontière suisse (fig. 2).

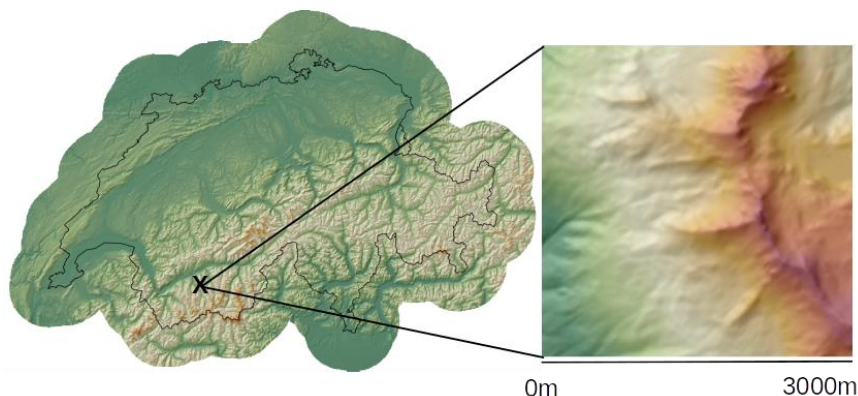


Fig. 2: Modèle altimétrique swissALTI^{3D} avec l'extension SRTM de 30 km au-delà de la frontière suisse (à gauche), et exemple de zoom dans une section de terrain (à droite).

En accord avec Behrens et al. (2018b), le modèle altimétrique a été graduellement redimensionné pour obtenir plusieurs versions à des résolutions spatiales de plus en plus grossières. Les différents degrés de redimensionnement se basent sur des tailles de cellules de trame de 5 m, 10 m, 20 m, 40 m, 80 m, 160 m, 320 m, 640 m, 1280 m, 2560 m et 5120 m. Des attributs de terrain ayant une influence sur le sol (tableau 1) ont été calculés pour chacun de ces degrés, puis redimensionnés à la taille originale des cellules de la trame.

Tableau 1: Liste d'attributs de terrain utilisés pour les cartographies numériques des sols (non exhaustive).

Attribut	Description	Référence
DEM	Elevation (a.s.l): altitude par rapport au niveau de la mer	SwissTopo, 2020
CUgen	General curvature: courbure combinée	Zevenbergen & Thorne, 1987
CUplan	Plan curvature: courbure le long des courbes de niveau	Zevenbergen & Thorne, 1987
CUprof	Profile curvature: courbure le long de la pente maximale	Zevenbergen & Thorne, 1987
NO	Northness: $\cos(\text{aspect in radians})$	Behrens et al., 2018a
EA	Eastness: $\sin(\text{aspect in radians})$	Behrens et al., 2018a
SL	Slope: pente	Zevenbergen & Thorne, 1987
FLA	Flow accumulation, log10: accumulation de flux	Qin et al., 2011
TPI	Topographic position index: altitude par rapport à l'environnement	Guisan et al., 1999
TRI	Terrain ruggedness index: différence d'altitude moyenne par rapport à l'environnement	Riley et al., 1999
LHAC	Local height above channel: altitude au-dessus de la ligne de fond	Olaya, 2004

Les figures 3 et 4 présentent à titre d'exemple une sélection d'attributs de terrains aux degrés de redimensionnement de 5 m, 40 m et 160 m.

Fig. 3: Attributs de terrain Local Height Above Channel (LHAC), Plan Curvature (CUplan) et Profile Curvature (CUprof), présentés à titre d'exemple aux degrés de redimensionnement de 5 m, 40 m et 160 m.

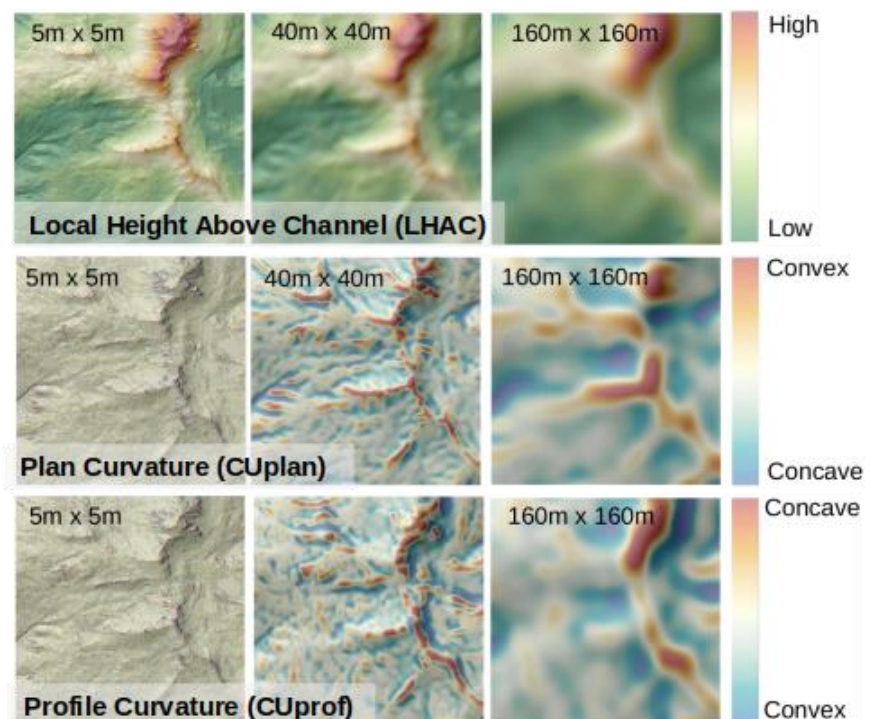
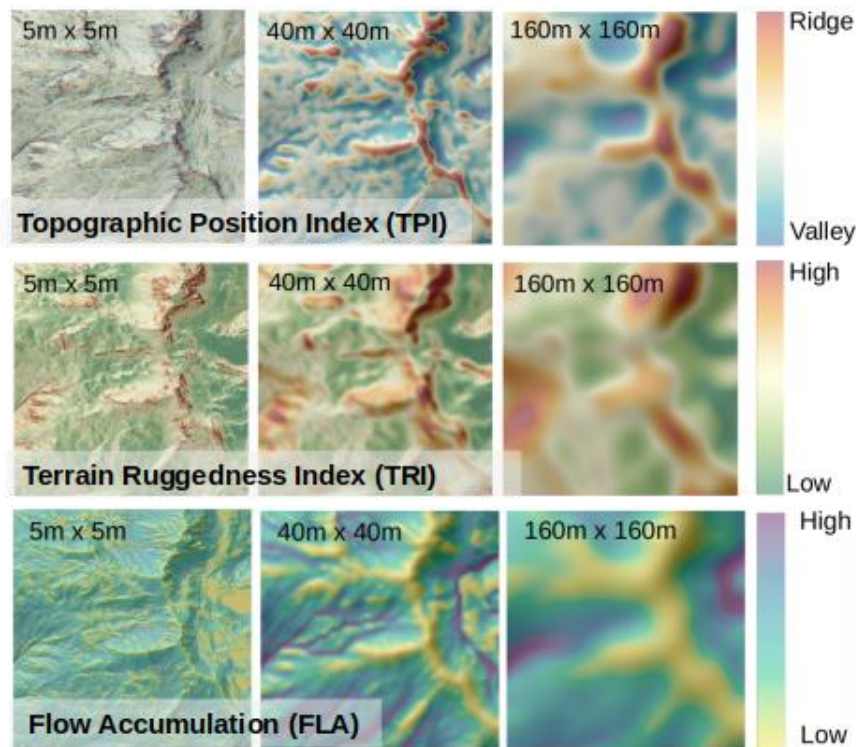


Fig. 4: Attributs de terrain
Topographic Position Index (TPI), Terrain Ruggedness Index (TRI) et Flow Accumulation (FLA),
présentés à titre d'exemple
aux degrés de
redimensionnement de 5 m,
40 m et 160 m.



3 Utilisation du sol: séries temporelles spectrales

Contexte

L'utilisation et le changement d'utilisation du sol jouent un rôle déterminant dans divers processus et propriétés pédologiques. L'utilisation du sol a une influence sur des caractéristiques essentielles des cycles du carbone et de l'azote, et modifie ainsi la biologie et la physique du sol (De Vries et al., 2013). Le changement d'utilisation du sol est étroitement lié à des modifications de propriétés pédologiques comme le taux de matière organique, la masse volumique et la capacité de rétention en eau (Haghighi et al., 2010; Stumpf et al., 2018). La description spatiale de l'utilisation et du changement d'utilisation du sol constitue par conséquent une composante importante de la cartographie numérique des sols. Les méthodes de télédétection par satellite, combinées avec l'accroissement des données disponibles et des capacités de calcul, offrent une possibilité efficace pour cartographier l'utilisation du sol dans l'espace et dans le temps.

Méthode et exemples

Les données sur lesquelles se fondent les analyses spatio-temporelles de l'utilisation du sol sont des séries temporelles spectrales basées sur des images satellites Sentinel et Landsat provenant de différents capteurs (Sentinel 2 MSI, Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+, Landsat 8 OLI; cf. tableau 2). La combinaison des capteurs permet de disposer de séries temporelles ininterrompues depuis 1985 (USGS, 2020).

Tableau 2: Résolution spectrale et spatiale et période de fonctionnement des capteurs spectraux de Sentinel et de Landsat

	Sentinel 2	Landsat 5	Landsat 7	Landsat 8
Opérationnel [a]	depuis 2017	1984 - 2013	depuis 1999	depuis 2013
Résolution [m]	10- 20	30	30	30
BLUE [μm]	0.46 - 0.52	0.45 - 0.52	0.45 - 0.52	0.45 - 0.51
Green [μm]	0.54 - 0.58	0.52 - 0.60	0.52 - 0.60	0.53 - 0.59
RED [μm]	0.65 - 0.68	0.63 - 0.69	0.63 - 0.69	0.64 - 0.67
RED Edge 1 [μm]	0.69 - 0.71	-	-	-
RED Edge 2 [μm]	0.73 - 0.75	-	-	-
RED Edge 3 [μm]	0.77 - 0.79	-	-	-
NIR [μm]	0.79 - 0.90	0.77 - 0.90	0.77 - 0.90	0.85 - 0.88
NIR Narrow [μm]	0.86 - 0.88	-	-	-
SWIR1 [μm]	1.57 - 1.66	1.55 - 1.75	1.55 - 1.75	1.57 - 1.65
SWIR2 [μm]	2.10 - 2.28	2.08 - 2.35	2.08 - 2.35	2.11 - 2.29

Sentinel relève à un intervalle de cinq jours dix bandes spectrales qui se prêtent à des analyses spatiales de l'utilisation du sol; la résolution spatiale est de 10 à 20 m. Chaque capteur de Landsat enregistre à un intervalle de seize jours six bandes spectrales à une résolution spatiale de 30 m. En raison d'un décalage temporel dans le survol des satellites Landsat, les données spectrales de Landsat sont théoriquement disponibles à un intervalle de huit à dix jours en chaque point de la surface terrestre. La résolution temporelle effective des données de Sentinel et Landsat dépend toutefois des conditions atmosphériques, comme la couverture nuageuse, les nuages et les aérosols. Pour générer des séries temporelles d'images spectrales couvrant pratiquement toute la surface du territoire, les données Landsat ont été agrégées à un intervalle d'une année

et combinées sur la surface considérée. Un raccourcissement de la période d'agrégation et donc une augmentation de la résolution temporelle des séries, impliquent une diminution de la couverture spatiale. Les séries temporelles d'images spectrales annuelles ainsi générées couvrent en moyenne 98% de la surface de la Suisse (fig. 5).

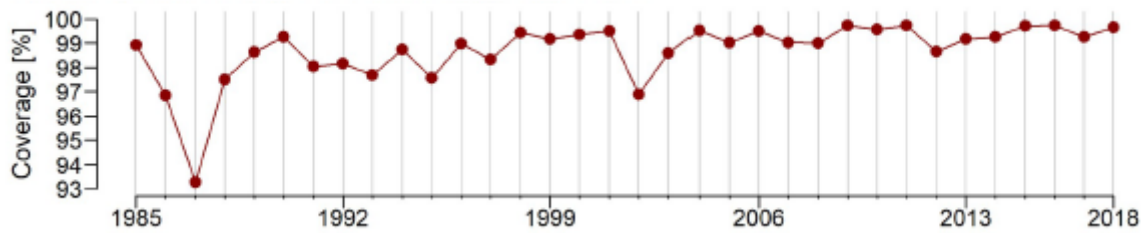


Fig. 5 Couverture spatiale de la Suisse par les données spectrales Landsat agrégées annuellement sur la base de Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+ et Landsat 8 OLI pour la période de 1985-2018.

Les données spectrales brutes de Landsat ont été converties en réflectance spectrale de surface à l'aide du système LEDAPS (Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System ; Schmidt et al., 2013), une procédure standardisée utilisée pour la correction des perturbations atmosphériques. Par ailleurs, les données erronées des capteurs ont été identifiées sur la base de plages de valeurs incertaines dans les bandes, et supprimées. La résolution spectrale des données de Landsat 8 présente de légers écarts par rapport aux données de Landsat 5 et Landsat 7 (tableau 2). Ces écarts ont été corrigés au moyen d'une analyse de régression (Stumpf et al., 2018; Stumpf et al., 2020)

La combinaison de différentes bandes spectrales permet de calculer des indices interprétables sur le plan écologique, et d'analyser ainsi l'utilisation et le changement d'utilisation du sol dans le cadre de problématiques écologiques (tableau 3; fig. 6)

Tableau 3: Liste d'indices spectraux utilisés pour les cartographies numériques des sols (non exhaustive).

	Description	Calcul	Référence
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index: p. ex. biomasse	NIR-RED/NIR+RED	Rouse et al., 1974
NDMI	Normalized Difference Moisture Index: humidité	NIR-SWIR1/NIR+SWIR1	Jin & Sader, 2005
NCI	Normalized Canopy Index: couverture de la végétation	SWIR1-GREEN/SWIR1+GREEN	Vescovo & Gianelle, 2008
NBR	Normalized Burn Ratio: p. ex. sol nu	NIR-SWIR2/NIR+SWIR2	Key & Benson, 1995

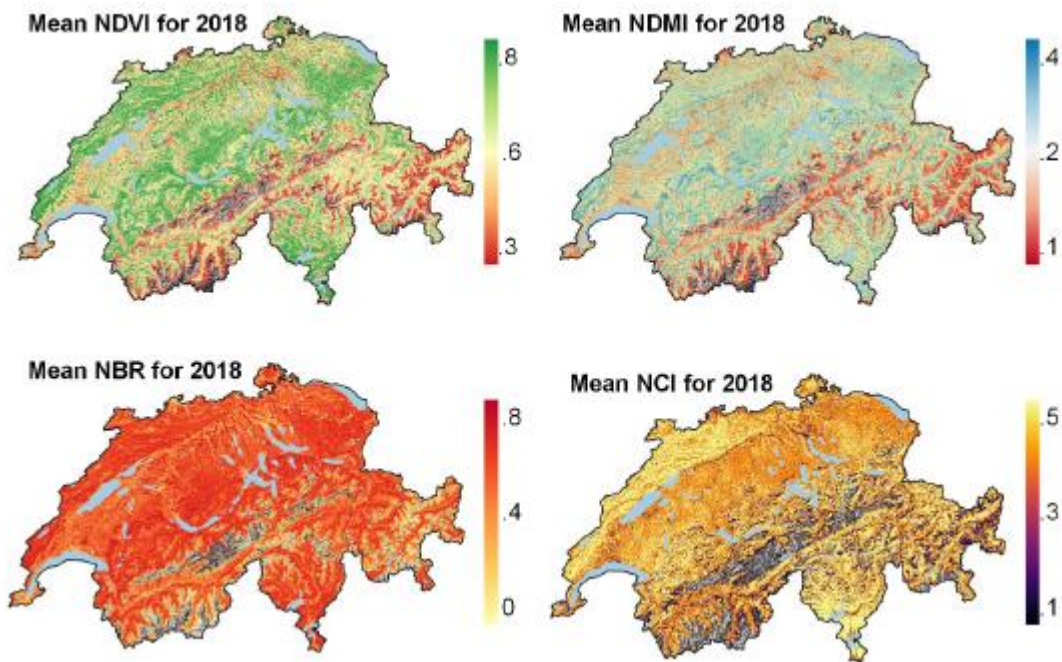


Fig. 6 Sélection d'indices spectraux comme moyenne pour l'année 2018 pour la description de l'état de la végétation et de l'humidité de surface (NDVI): Normalized Difference Vegetation Index ; NDMI : Normalized Difference Moisture Index ; NBR : Normalized Burn Ratio; NCI: Normalized Canopy Index).

Il existe différentes possibilités d'agréer les séries temporelles spectrales en fonction des questions étudiées (Stumpf et al., 2020). La figure 7 illustre la variabilité du traitement des données à l'exemple du Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) moyen sur 34 ans et des séries temporelles annuelles NDVI correspondantes dans des sites sélectionnés.

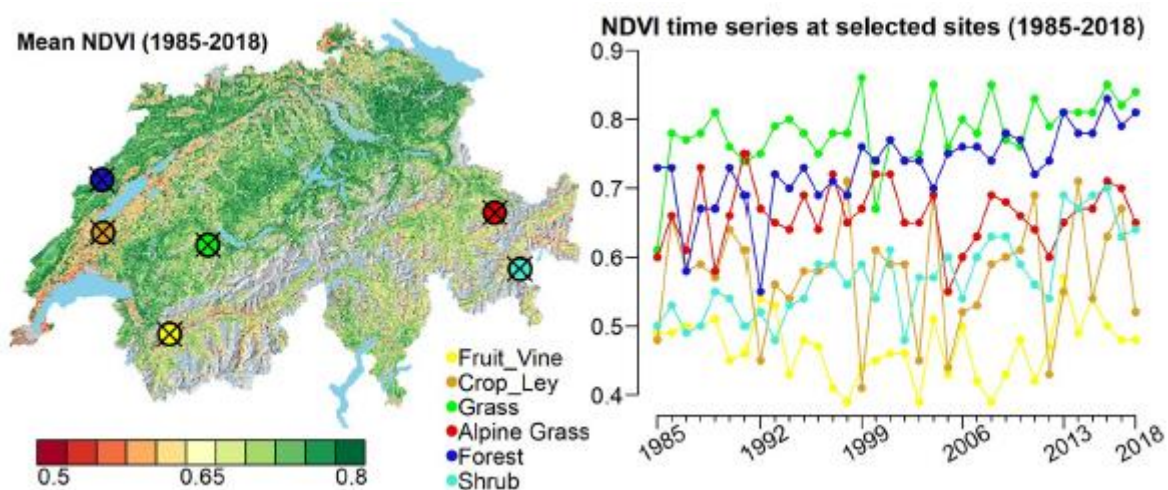


Fig. 7: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) moyen pour la Suisse (à gauche) et moyenne des séries temporelles annuelles dans une sélection de sites pour la période de 1985 à 2018.

4 Références

- Behrens T., Scholten T., 2006. Digital soil mapping in Germany – a review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 169, 434–443.
- Behrens T., Zhu AX., Schmidt K., Scholten T., 2010a: Multi-scale digital terrain analysis and feature selection for digital soil mapping. *Geoderma* 155, 175-185.
- Behrens T., Schmidt K., Zhu AX, Scholten T., 2010b: The ConMap approach for terrain-based digital soil mapping. *European Journal of Soil Science* 61, 133-143.
- Behrens T., Schmidt K., MacMillan RA., Viscarra Rossel RA., 2018a: Multiscale contextual spatial modelling with the Gaussian scale space. *Geoderma* 310, 128-137.
- Behrens T., Schmidt K., MacMillan RA., Viscarra Rossel RA., 2018b: Multiscale digital soil mapping with deep learning. *Scientific Reports* 8, 15244.
- De Vries FT., Thebault E., Liiri M., Birkhofer K., et al., 2013: Soil food web properties explain ecosystem services across European land use systems. *PNAS* 35, 14296-14301.
- Farr TG., Rosen PA., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., et al., 2007: The Shuttle Radar Topographic Mission. *Review of Geophysics* 45, RG2004.
- Guisan A., Weiss SB., Weiss AD., 1999: GLM versus CCA spatial modeling of plant distribution. *Plant Ecology* 143, 107-122.
- Haghighi F., Gorji M., Shorafa M., 2010: A study of the effects of land use changes on soil physical properties and organic matter. *Land degradation and development* 21, 496-502.
- Hansen MC., Loveland TR., 2012: A review of large area monitoring of land cover change using Landsat data. *Remote Sensing of Environment* 122, 66-74.
- Jenny H., 1941: *Factors of soil formation: A system of quantitative pedology*. McGraw-Hill, New York.
- Jin S., Sader SA., 2005: Comparison of time series tasseled cap wetness and the normalized difference moisture index in detecting forest disturbances. *Remote Sensing of the Environment* 94, 364-372.
- Kempen B., Brus DJ., Stoorvogel JJ., Heuvelink GBM., De Vries F., 2012. Efficiency comparison of conventional and digital soil mapping for updating soil maps. *Soil Science Society of America Journal* 76, 2097–2115.
- Key CH., Benson NC., 1999: Measuring and remote sensing of burn severity. *Proceedings Joint Fire Science Conference, Vol. II (p. 284), Moscow*.
- McBratney AB., Mendonça-Santos ML., Minasny B., 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117, 3–52.
- Olaya V., 2004: A gentle introduction to SAGA GIS – Edition 1.1. <https://www.saga-gis.org>.
- Qin CZ., Zhu AX., Pei T., Li B., Scholten T., Behrens T., Zhou CH., 2011: An approach to computing topographic wetness index based on maximum downslope gradient. *Precision Agriculture* 12, 32-43.
- Riley SJ., De Gloria SD, Elliot R., 1999 : A terrain ruggedness that quantifies topographic heterogeneity. *Intermountain Journal of Science* 5, 23-27.

- Rouse JW., Haas RH., Schell JA., Deering DW., 1974: Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS-Symposium, Washington D.C. 1973.
- Schmidt G., Jenkerson C., Masek J., Vermote E., Gao F., 2013: Landsat ecosystem disturbance adaptive processing system (LEDAPS) algorithm description. US Geological Survey. <https://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr20131057>.
- Stumpf F., Schmidt K., Goebes P., Behrens T., Schönbrodt-Stitt S., Wadoux A., Xiang W., Scholten, T., 2017. Uncertainty-guided sampling to improve digital soil maps. *Catena* 153, 30–38.
- Stumpf F., Keller A., Schmidt K., Mayr A., Gubler A., Schaepman M., 2018: Spatio-temporal land use dynamics and soil organic carbon in Swiss agroecosystems. *Agriculture, Ecosystem & Environment* 258, 129-142.
- Stumpf F., Keller A., Schneider M., Mayr A., Rentschler T., Meuli RG., Schaepman M., Liebisch F., 2020: Spatial monitoring of grassland management using multi-temporal satellite imagery. *Ecological Indicators* 113, 106201.
- Swisstopo, 2020: Bundesamt für Landestopographie, Schweiz: https://shop.swisstopo.admin.ch/de/products/height_models/alti3D.
- USGS, 2019: U.S. Geological Survey. <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat>.
- Vescovo L., Gianelle D., 2008: Using the MIR bands in vegetation indices for the estimation of grassland biophysical parameters from satellite remote sensing in the Alps region of Trentino (Italy). *Advances in Space Research* 41, 1764-1772.
- Viscarra Rossel R., Chen C., Grundy M., Searle R., Clifford D., Campbell P., 2015. The Australian three-dimensional soil grid: Australia`s contribution to the GlobalSoilMap project. *Soil Research* 53, 845–864.
- Zevenbergen LW., Thorne CR., 1987: Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes Landforms* 12, 47-56.