

시공간 대표성을 고려한 토양수분 모니터링 system의 구축 및 운영

Establishment and Operation of Soil Moisture Monitoring System Considering Temporal and Spatial Representation

김기훈*/ 김상현**/ 이가영***/ 김원****

Kim, Ki Hoon*/ Kim, Sang Hyun**/ Jung, Sung Won***/ Kim, Won****

Abstract

A soil moisture measuring method for a hillslope of Korean watershed was developed to configure spatial-temporal distribution of soil moisture. Intensive surveying of topography had been performed to make a refined digital elevation model(DEM) and the hydrological interpretation from flow distribution algorithm was incorporated through reverse surveying. Moreover, A long term measurement system was established to maximize representative features of spatial variation of soil moisture and operated from October 19 to 21, 2003. TDR(Time Domain Reflectometry) with a multiplex monitoring system has been operated for accurate measurements. Measurements were performed at the right side hillslope of Buprunsa located at the sulmachun watershed. The data of temporal and spatial soil moisture variation by rainfall event were collected and the variations of soil moisture were well captured.

Keywords : Soil Moisture, Monitoring System, Inverse Surveying, Flow Distribution Algorithm

요 지

국내산지사면의 토양수분 시공간적 분포상황을 파악하기 위한 토양수분 측정법을 개발하였다. 대상유역을 정밀 측량하여 수치고도모형을 구성한 다음 흐름분배 알고리즘을 적용하였고 역측량을 통한 대상 유역의 흐름분배 알고리즘의 유의성을 판단하였다. 이를 통한 공간적 변화의 대표성을 최대화하기 위한 장기 모니터링 시스템을 구축하고, 10월 19일부터 21일까지 연속적인 모니터링을 실시하였다. 토양수분의 정확한 측정을 위해 TDR(Time Domain Reflectometry)를 이용하였다. 측정은 설마천 유역의 범륜사 우측사면에서 수행되었다. 강우사상에 의한 시공간적 토양수분의 변화 자료를 획득하였고, 강우사상에 의한 토양수분의 변화를 확보할 수 있었다.

핵심용어 : 토양수분, 수치고도모형, 흐름분배 알고리즘, 역측량, 모니터링 시스템, TDR

- * 부산대학교 환경공학과 석사과정
Research Assistant, Dept. of Environmental Engrg. Pusan National Univ., Pusan, 609-735 Korea
- ** 정회원, 부산대학교 공과대학 환경공학과 부교수
Associate Professor, Dept. of Environmental Engrg. Pusan National Univ., Pusan, 609-735 Korea
- *** 부산대학교 환경공학과 석사과정
Research Assistant, Dept. of Environmental Engrg. Pusan National Univ., Pusan, 609-735 Korea
- **** 수석연구원, 한국건설기술연구원
Research Fellow, KICT, Koyang, Kyungido, 411-712, Korea

1. 서 론

토양수분대(Root zone)에서의 토양수분의 상태는 농공학적, 수문학적 그리고 기상학적 연구의 상당한 부분에서 중요한 변수로 작용하고 있다. 토양수분의 정확한 산정은 관개, 작물재배, 물자원의 효율적 관리에 가장 필수적인 요소이다. 다른 여러 연구 분야에서, 토양수분은 대기층에서의 잠열순환 등 지구표면에서의 가용에너지와 강우사상에 의한 침투와 유출의 구분에 있어서도 상당히 중요한 역할을 한다.

토양수분 측정을 위한 상당히 많은 방법들이 제시되고 있지만, 그 중에서 가장 신뢰성 높고 간편한 방법 중의 하나가 TDR(Time Domain Reflectometry)을 이용하는 방법(Topp, 1980)인데 이는 다른 매질과 차별성이 있는 물의 유전상수를 이용하여 일정 주파수의 파를 전송한 후 반향되어 오는 파를 분석함으로써 토양 내의 수분의 함량을 추정하는 방법이다. 상부에서 대상 유역으로 흐름의 유입경로가 없는 독립적인 사면에서 TDR에 의한 토양수분변화양상의 측정이 행해진다면 여기서 얻어진 결과를 통해 국내유역의 산지사면에서 강우사상에 따라 달라지는 유출의 특성을 가늠할 수 있는 효과적인 현장측정이 예상된다.

2. 연구 대상유역

본 연구의 대상유역으로는 95년부터 한국건설기술연구원에서 시험유역으로 운영하고 있는 임진강 하구에서 약 46km 상류의 경기도 파주시 적성면 마지리와 설마리의 설마천 유역내에 소규모 대상유역을 새로이 선정했다. 설마천 시험유역의 위치는 동경 126°55'54"~126°54'57", 북위 37°54'57"~37°56'23"이고, 유역면적 8.5 km², 유로연장 5.8km, 연평균 강수량은 1,600mm, 고도는 최저 59m에서 최고 675m, 유로경사 2m인 전형적인 급경사 산지 사행하천 지형이며 전형적인 곡류하천이다. 지질은 경기편마암 복합체로 구성되고 단층과 옅리가 잘 발달되어 있다. 또한 삼림과 토양은 90% 이상이 주로 20~30년 수령의 침엽수와 활엽수로 구성되고 표토는 얇은 편으로 함양능력이 대단히 낮고 산지 사면에 산재한 다량의 돌과 자갈은 집중호우시 토석류를 유발한다. 관측소에서는 10분마다 강우와 수위가 관측되고 있다(한국건설기술연구원, 2000). 이 소유역은 상부로부터의 유입이 불가능한 독립적인 사면이며, 우량관측소(범륜사)가 있어 정확한 강우량 산정이 가능하다.

3. 방법론

본 연구에서는 대상사면에 대한 토양수분 측정지점의 결정을 위하여 먼저 연구 대상지역의 전체적인 측량을 통하여 얻어진 DEM을 이용, 흐름분배알고리즘을 통해 도출된 우선흐름 경로를 파악하였다. 그리고 역측량을 통하여 그 흐름 경로에 TDR 탐침을 설치하였고, 10월 19일부터 21일까지 연속적인 모니터링을 실시하였다. 또한 진행되고 있는 토양수분추정 알고리즘과 유출모형의 구조를 종합함으로써 토양수분과 관련된 연구방향을 제시하고자 한다.

3.1 측정대상사면의 측량 및 역측량

연구 대상사면의 정밀한 DEM(1m*1m) 구축을 위해 TRANSIT (DT-208P, TOPCON)을 이용해 직접측량을 실시하였다. 대상사면의 상부지점에서는 10m의 간격을 가지는 40m*40m의 구역을 설정하였고 여기서 선정된 25개의 각 점점 지점에 대해 우선적으로 측량을 실시했으며 상부에 5개 지점(10m*40m)과 하부에 위치한 사면의 유출지점까지(약 55m 하부에 위치) 약 32개의 지점에 걸쳐서 측량을 실시하였다. 측량에서 얻어진 각도(수평각, 수직각)와 거리의 각좌표계를 x, y, z데카르트좌표계로 변환하여 DEM(digital elevation model)을 구축하였다. 구축된 DEM을 이용하여 단방향 흐름분배 알고리즘(SFD)과 다방향 흐름분배 알고리즘(MFD)에서 습윤지수(wetness index, $\ln(a/\tan\beta)$)를 계산해낸다(O'Callaghan과 Mark, 1984 ; Quinn, 1991). 두 가지 알고리즘을 함께 고려하여 습윤지수가 높은 지점들을 중심으로 약 10m의 간격으로 측정 지점을 선정하여 그 x, y, z좌표를 다시 각좌표로 전환, 현장에서의 역측량을 통해 토양수분의 측정지점을 선정했다.

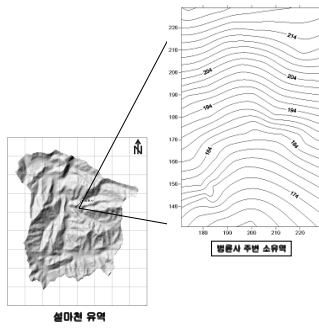


그림 1. 대상사면의 정밀 DEM

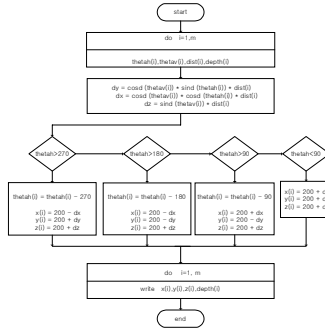


그림 2. DEM 구축 알고리즘

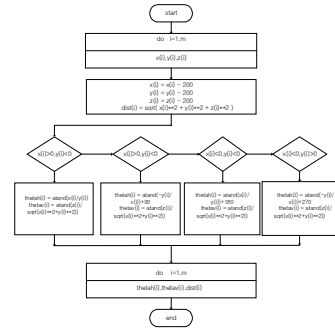


그림 3. 역측량을 위한 각 좌표변환 알고리즘

3.2 흐름분배 알고리즘(Flow Distribution Algorithm, SFD, MFD)

본 연구에서 사용된 흐름분배 알고리즘이란 복잡한 지형을 따르는 흐름분산특성의 정확한 표현을 위해 개발된 알고리즘이다. 이의 표현을 위해 제일 처음 개발된 알고리즘은 O'Callaghan과 Mark(1984)에 의해 고안된 단방향 흐름분배 알고리즘(Single Flow Direction Algorithm, SFD)으로서 수치고도모형의 각 격자에서의 흐름이 주위 8개 격자중에서 가장 경사가 급한 방향의 격자로 형성된다고 가정하는 알고리즘인데 그 과정은 그림 (4)와 같다. 이에 반해 Quinn 등(1991)에 의해 고안된 다방향 흐름분배 알고리즘(Multiple Flow Direction Algorithm, MFD)은 SFD 알고리즘의 단점인 1차원적 흐름경로 표현의 한계를 해결하기 위하여 고도가 낮은 주위격자들로 균등하게 흐름을 분산시키는 알고리즘이며 식 (1)으로 기술되어 흐름을 하류단으로 분배한다. MFD 알고리즘은 산의 봉우리와 같이 흐름이 분산되는 지형에 적합하다고 알려져 있고, 계곡과 같이 경사가 급한 지형에는 SFD 알고리즘보다 적용성이 낮은 것으로 알려져 있다(김상현, 2001).

$$f_i = \frac{L_i S_i}{\sum(L_i S_i)} \quad (1)$$

여기서, f_i 는 대상격자에서 i 격자방향으로의 흐름분배율, S_i 는 i 격자지점으로의 지표면 경사, L_i 는 i 격자에 대한 유효등고선 길이로서, 흐름경로를 따른 흐름 폭에 해당한다.

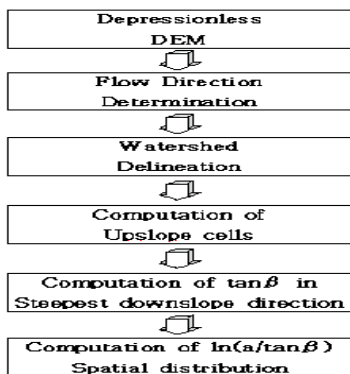


그림 4. SFD 알고리즘을 이용한 지형지수산정절차

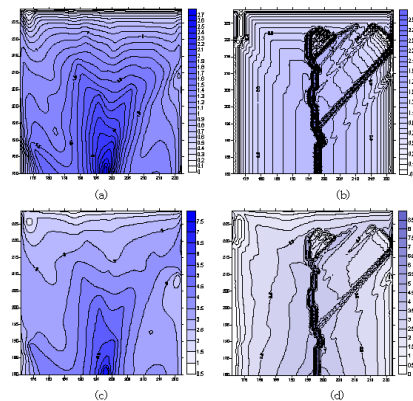


그림 5. 모의된 토양수분
(a) mfd(습윤) (b) sfd(습윤)
(c) mfd(area) (d) sfd(area)

3.3 TDR의 원리

일반적으로 전송선을 따라 이동하는 에너지의 전자기적 펄스의 속도는 접촉되어 있거나 전송선을 감싸고 있는 매질의 유전상수(K_a)에 의존하게 된다고 알려져 있다. 즉 유전상수가 높을수록 속도는 더 느려지게 된다. 이처럼 토양 내의 다른 물질들과 비교하였을 때, 수분이 가지고 있는 유전상수의 상대적으로 큰 값으로 인하여, 토양 내에 평행하게 묻혀진 전송선(토양속에 묻혀진 waveguide를 언급) 내부를 따라 흐르는 에너지의 마이크로파 펄스의 이동 속도는 토양 내의 수분에 크게 의존하게 된다. 전송선과 주변의 물체간의 불연속성의 존재는 마이크로파의 전송선을 따른 반향을 야기한다. 마이크로파의 펄스가 알려진 길이의 전송선을 따라 이동하는데 필요한 시간의 측정을 가능하게 하고 이를 이용하여 다음의 (2)식을 이용하여 유전상수(K_a)를 구하게 된다.

$$Ka = \left(\frac{tc}{L}\right)^2 \quad (2)$$

여기서, L은 waveguide의 길이(cm), t는 전송시간(ns), 그리고 c는 빛의 속도이다(cm/ns).

4. 결과 및 고찰

4.1 측정 결과

	x(m)	y(m)	z(m)	wave guide의 깊이별 위치
1	197.534	210.19	206.9428	지표, 지하 30cm
2	196.65	200.2929	200.053	지표, 지하 25cm
3	199.5	190.39	193.838	지표, 지하 30cm
4	199.5	180.49	187.8978	지표, 지하 40cm
5	202.44	170.59	182.3309	지표, 지하 45, 지하 90cm
6	200.48	160.69	177.44	지표, 지하 30cm
7	200.48	150.7979	173.114	지표, 지하 35cm
3-1	204.039	197.3690	199.3808	지표, 지하 60, 지하 90cm
3-2	205.8158	204.8731	205.024	지표, 지하 40, 지하 80cm
6-1	196.3314	183.1461	189.8763	지표, 지하 45, 지하 90cm
6-2	198.1229	178.9263	186.6818	지표, 지하 30, 지하 65cm
6-3	198.7020	167.6832	180.5126	지표, 지하 70cm
6-4	198.1025	193.0543	194.8887	지표, 지하 50cm

	수평각(°)	수직각(°)	거리(m)
station 설치 지점	171.9792	-28.65147	17.79

	x(m)	y(m)	z(m)
station 설치 지점	202.1783	184.5411	191.47

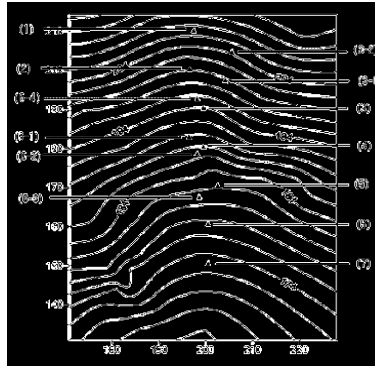


그림 6. TDR 탐침 설치 지점과 스테이션 설치 지점

4.1.1 대상구역 상부사면

그림 7에서 관찰할 수 있듯이 강우로 인한 토양수분의 변화가 약간의 시간적 차를 두고 발생하는데, 이는 강우로 인한 토양수분의 측정까지 침투되는 지체시간을 나타낼을 알 수 있다. 그리고 지하보다는 지표에서 토양수분의 변화폭이 큰 것을 관찰할 수 있다. 이는 강우로 인해 발생된 침투가 지표면과 지표하 공극을 채우기 때문에 지하의 토양수분 측정 탐침까지 도달하는 토양수분이 감소하기 때문이다.

본 대상구역에서 전체적 상부사면의 특징은 강우사상 이후 토양수분의 급격한 증가를 보이고 있다. 또한 급격한 토양수분의 증가 이후에 토양수분이 유지되지 않고 급격히 배수됨을 알 수 있다. 이는 상부사면은 토양층의 깊이가 아주 얇을 뿐만 아니고 강우 이외에 또 다른 상부 기여면적이 없기 때문일 것이다. 그리고 토질 또한 상부사면의 지표하는 굽은 모래 혹은 자갈로 구성된 특성을 지니고 있기 때문이다.

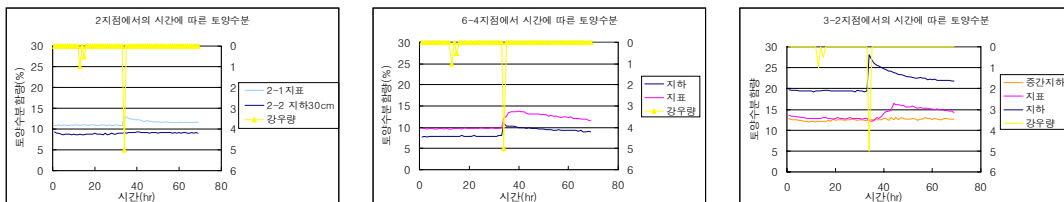


그림 7. 상부사면의 토양수분 변화

4.1.2 대상유역 중부사면

대상유역 중부사면은 그림 8에서도 보이는 바와 같이 상부사면과 비슷하게 초기 강우에 의해서는 토양수분의 별다른 변화를 볼 수가 없다. 또한, 실험 결과에서 관찰할 수 있듯이 중부사면에서도 지표면에서는 토양수분의 급격한 증가를 볼 수 있고 지하에서는 완만한 증가를 관찰할 수 있다.

하지만, 상부사면과는 달리 중부사면은 지표면에서의 토양수분의 급격한 증가 뒤에 완만한 배수 특성을 알 수 있다. 이는 상부사면에서 유입되는 토양수분으로 인해 재충전 효과를 알 수 있다.

그러나 중부사면에서도 지하에서의 토양수분의 변화는 중부사면 지표에서의 특징과는 달리 토양수분의 급격한 증가도 보이지 않으며 재충전 현상 또한 관찰할 수 없었다. 이는 적은 강우로 인하여 지하 측정지점까지 토양수분이 도달하지 못했음을 관찰 할 수 있다.

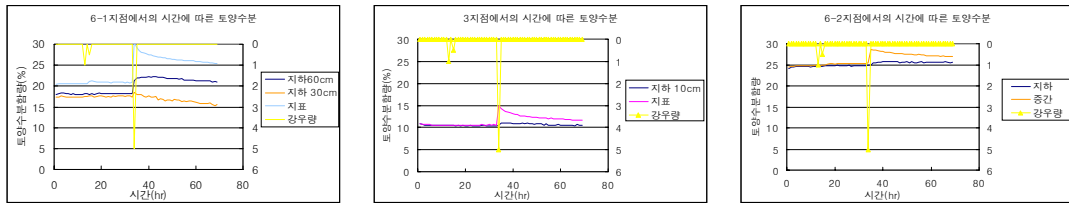


그림 8. 중부사면의 토양수분 변화

4.1.3 대상유역 하부사면

대상유역 하부사면은 상부사면과 중부사면과는 상당히 다른 결과를 보이고 있다. 우선 하부사면에서 지표면의 토양수분 변화를 보면, 강우사상으로 인한 토양수분의 상당한 증가를 보이고 있다(그림 9). 하지만 상부사면과 중부사면과는 조금 다른 증가 형태를 보이고 있는데 이는 상부사면과 중부사면의 영향으로 인해 토양수분이 하부사면으로 유입이 되므로 증가의 형태가 다소간 완만함을 볼 수 있다. 또한 토양수분의 증가 후 계속된 상부로부터의 유입으로 하부사면에서는 토양수분의 감쇄현상이 아주 완만하며 상당한 충전효과를 오랫동안 지속하고 있다. 이는 하부사면 지하층에서도 비슷한 경향을 보이고 있다. 하지만 상부에서의 유입과 지표에서의 유입으로 인하여 지표면에서 감쇄현상을 보임에도 불구하고 오히려 증가현상을 보이거나 좀 더 높은 토양수분 값을 나타내고 있다.

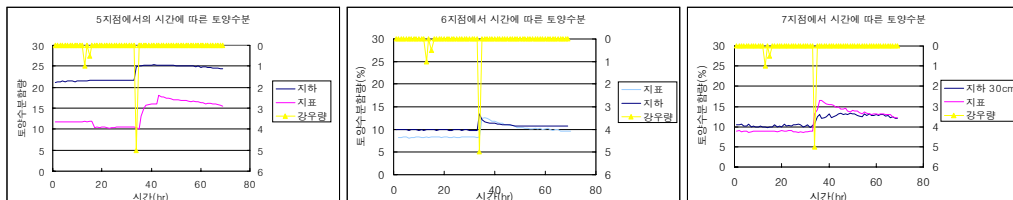


그림 9. 하부사면의 토양수분 변화

4.2 고찰

본 실험은 흐름분배 알고리즘으로 도출된 주된 흐름경로에 토양수분 측정 시스템을 구축하였고 TDR을 이용하여 강우사상에 의한 수직적, 수평적 토양수분의 변화를 측정하였다. 또한 흐름분배 알고리즘의 유의성 또한 알 수 있었다. 그리고 사면에 따른 토양수분의 변화 특성과 초기조건的重要性을 알 수 있었다. 이로 인해 흐름분배 알고리즘과 토양수분 측정결과를 이용하여 감쇄곡선, 안정성, 재충전성을 대표하는 위치선정의 잠재성 또한 확인할 수 있었다. 하지만 일반적으로 토양의 수분함량은 전적으로 지형에 의존하기 보다는 토양층의 깊이(Pellenq 등, 2003)나 토양 내에 존재하는 대공극 흐름 혹은 모세관현상(Beven 등, 1982)에 따라서도 많은 변화를 일으킨다고 알려졌다. 이번 연구로 인하여 상당히 많은 결과와 더불어 문제점과 향후 연구과의 방향을 얻을 수 있었다.

토양수분과 관련된 연구를 수행함에 있어서 개선되어야 하는 것을 요약하면 다음과 같다. 첫째, 측정이 매우 국소적인 스케일에서 이루어졌고 점 측정 한계로 인하여 이번 연구 결과가 전체 유역을 대표할 수 있

는지에 대한 것이다. 둘째, 연구기간 전의 강우사상이 매우 적어 아주 건조한 상태에서 초기 실험을 실시하였으므로 확실한 토양수분의 변화량을 측정하기 어려웠다. Pellenq 등(2003)은 현실적인 토양 내 수분함유량의 분포경향은 일반적으로 토양의 상태가 습한 조건일 때, 토양층의 깊이와 지형적인 정보 등을 함께 이용할 때 그 신뢰도가 높아진다고 주장한다. 셋째, 연구 기간이 상당히 짧은 기간이었으므로 연구 대상유역을 대표할 수 있는 월별, 계절별 토양수분의 변화를 알 수 없었다.

이에 따라 보다 효율적인 토양수분관련 연구수행을 위해서는 유역내의 토양층의 깊이분포에 대한 자료, 측정지점에 대한 토양구성성분의 도출 및 TDR 등을 이용한 토양수분의 수직적 분포에 대한 측정을 통한 대공극 흐름이나 모세관 현상 등의 파악 등이 중요한 과제로 대두된다.

5. 결 론

1. 산지가 대부분인 국내의 유역에서는 지형적인 특색이 DEM을 통해 잘 반영될 수 있으므로 대상유역에 대하여 흐름분배알고리즘을 적용하여 토양수분의 분포경향을 추정하는 과정이 효율적임을 확인할 수 있었다.
2. 연구 대상 유역에서 측정 사면의 위치에 따른 토양수분의 변화가 상당히 뚜렷함을 알 수 있었다. 상부사면에서는 강우사상에 의해 토양수분의 급격한 증가와 더불어 상당히 빠른 배수곡선을 관찰할 수 있었다. 중부사면에서는 강우사상에 의한 토양수분의 급격한 증가는 관찰되었지만, 상부사면과는 다른 배수특성을 지니고 있었으며, 하부사면에서는 상부에서의 유입으로 인한 재충전 효과를 뚜렷이 확인할 수 있었다.
3. 본 연구를 통하여 국내 유역에서 흐름분배 알고리즘과 토양수분 값의 실측을 통하여 감쇄현상, 안정성, 재충전성을 대표할 수 있는 위치선정의 잠재성 확인을 통해 시공간을 대표할 수 있는 토양수분 모니터링 시스템의 구축 및 운영에 대한 밑거름이 될 것으로 판단된다.

감 사 의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술 개발사업단의 연구비지원(과제번호 2-1-1)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 김상현, 김경현, 정선희 (2001) “수치 고도 분석 : 분포형 흐름 분배 알고리즘.” 한국수자원학회 논문집, 제 34권, 제3호, pp. 241-251.
2. 한국건설기술연구원, (2000) “시험유역의 운영 및 수문특성 조사·연구”, 연구보고서, 건기연 98-077.
3. Beven K, Germann P(1982).“Macropores and Water Flow in Soils.” *Water Resour. Res.*, vol. 18(5), pp. 1311-1325.
4. Gary C. Heathman, Patrick J. Starks, Lajpat R. Ahuja, Thomas J. Jackson. “Assimilation of surface soil moisture to estimate profile soil moisture content”, *J.Hydrol.*, vol 279, p. 1-17
5. O’Callaghan, JF., Mark D.M.(1984).“The extraction of drainage networks from digital elevation data.” *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, vol. 28, pp.323-344
6. Pellenq J, Kalma J, Boulet G, Wooldrudge S, Kerr y, Chehbouni A(2003).“A disaggregation scheme for soil moisture based on topography and soil depth.” *J. Hydrol.*, vol. 276, pp. 112-127.
7. Topp GC, Davis JL, Annan AP(1980). “Electromagnetic determination of soil water content:measurements in coaxial transmission lines.” *Water Resour. Res.*, vol. 16, pp. 574-582.
8. Quinn, P., K. Beven, P. Chevallier, and O. Planchon (1991). “The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models.” *Hydrol. Process.*, vol. 5, pp. 59-79.