

기후변화에 따른 말라리아 잠재 발생 가능성 분석: 베네수엘라를 중심으로

임노을* · 장래익** · 전성우***†

*고려대학교 환경생태공학과 석사과정학생, **고려대학교 GIS/RS센터 연구교수, ***고려대학교 환경생태공학부 교수

Impact of Climate Change on Potential Malaria Distribution in Venezuela

Lim, No Ol* · Jang, Rae Ik** and Jeon, Seong Woo***†

*Ph.D. Student, Dept. of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

**Research Professor, Environmental GIS/RS Center, Korea University, Seoul, Korea

***Professor, Dept. of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

ABSTRACT

Since climate change has become a serious problem due to continuous industrialization, abnormal phenomena (such as global warming) are being intensified. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) highlights the serious problems of climate impacts that include natural disaster, water scarcity, loss of fauna and flora, and more. Vector-borne diseases, such as malaria, are also being intensified since the change in temperature influences the possible habitat of the disease-provoking vectors. Malaria is a serious health problem globally and the prediction of its changed distribution is necessary for its prevention. Malaria in South America had been eradicated years ago, but nowadays outbreaks have been increasing again, especially in Venezuela, perhaps associated with its economic crisis. We arranged climate data and geological data for the past, present, and future of Venezuela to compare and predict future malaria distribution due to climate change using Maxent software, a widely used Species Distribution Model. According to the prediction for potential future malaria distribution, if climate change increases continuously, malaria risk will also increase and expand into the highly populated region in northern Venezuela where more than 60% of Venezuela's population lives. The Falcon and Zulia districts are especially exposed to the highest malaria risk, with an increase of approximately 12% and 23% respectively. Thus strengthening of health policies and decisions, especially concentrated in the Zulia and Falcon districts, is urgently needed.

Key words: Climate Change, Malaria, Venezuela, Species Distribution Model, Maxent

1. 서 론

최근 산업화가 활발해지며 10년 (2006-2015년) 동안 관측된 전지구 평균 표면 온도가 1850-1900년의 평균보다 약 0.87°C 올랐다 (IPCC, 2018). 이런 기후의 변화는 특히 인간과 직접적으로 연결되는 보건 측면에서 큰 스트레스 요소로 작용하며 폭염으로 인한 열사병, 대기오염으로 인한 호흡계 질환, 식량부족으로 인한 영양장애, 매개체 서식지 변화로 인한 감염병 확산 등의 건강 문제의 원인이 된다 (Balbus et al., 2009). 국내뿐만 아니라 전세계적으로 이런 건강상 위협 요소

들이 많아지면서 이를 조절하여 적응하기 위해 여러 관리대책 및 방안들이 강구되고 있다. 특히, 세계보건기구에서도 관심을 두고 지켜보는 매개체 감염병인 말라리아는 변화되는 기후에 따라 그 발병률이 증가하고 있으며, 기후변화로 인한 건강위험을 예측한 연구에서는 기후변화로 인해 2100년까지 5천만 명의 새로운 말라리아 환자가 발생할 것으로 추정했다 (McMichael et al., 2006). 말라리아나 땀기열 같은 감염병은 매개체인 모기를 통해 감염되기 때문에 모기가 서식하기 적합한 환경이 만들어질수록 이런 질병에 감염될 확률도 높아지게 된다 (Patz et al., 2005).

† **Corresponding author:** eepps_korea@korea.ac.kr (Room No. 415, College of Life Science, 145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02855, Korea)

Received October 31, 2019 / Revised November 25, 2019 1st, December 16, 2019 2nd / Accepted 1월 10, 2020

말라리아는 *Plasmodium* 원충이 적혈구와 간세포 내에 기생함으로써 발병되는 급성 감염증으로, 원충으로부터 감염된 학질모기인 *Anopheles* 모기 종의 침샘에 있는 말라리아 원충이 인간의 혈액을 통해 간으로 들어가고 잠복기를 마친 후, 적혈구로 침입하면서 질병이 발열하게 된다 (Caminade et al., 2014). 말라리아를 매개하는 학질 모기는 *Anopheles* 속 모기 중 60여 종에 의해 매개되며 지역과 원충에 따라 매개하는 말라리아의 종류가 다르다 (World Health Organization Geneva, 2018). 말라리아 매개체인 모기는 강수량이 적절해야 살아남을 수 있으며 원충은 온도가 적합해야 모기 속에서 말라리아를 발열시킬 수 있기 때문에 기후 인자들은 말라리아 발생에 중요한 역할을 한다 (CDC, 2018). 이렇듯, 말라리아 원충인 *Plasmodium*과 매개 모기인 *Anopheles*는 기후 조건의 영향을 크게 받으며 이런 특성을 이용해 말라리아의 발병 분포 변화를 예측 및 파악할 수 있다. 말라리아의 매개체인 *Anopheles* 모기 종은 특히 열대지방에 많이 분포하며 남아메리카의 경우, 약 17종의 모기 종이 기록됐는데 그중 가장 많이 기록되고 말라리아 감염에 중요한 매개체 역할을 하는 모기 종은 *A. darlingi*, *A. nuneztovari*, *A. aquasalis*, *A. marajoara*, *A. aquasalis*, *A. albimanus*, *A. trinkae*, *A. oswaldoi* 등 약 8종이다 (Lounibos and Conn, 2000).

기후변화로 인해 말라리아 발병률은 지속해서 증가하고 있지만, 2018년 세계 말라리아 보고서에 따르면 2015년부터 2017년인 최근 2년간 말라리아의 심각성에 비해 발병 감소를 위한 조치와 투여 예산은 줄어드는 추세이다 (World Health Organization Geneva, 2018). 국내 말라리아 발병은 1984년 이후로 완벽히 퇴치되어 보고되지 않았다가 1993년을 시작으로 대부분 북한 접경지역인 인천, 경기, 강원 지역에서 나타나며 주로 인근 부대 군인에게서 발생해왔다 (감염병포털 <http://www.cdc.go.kr/npt/biz/npp/portal/nppSumryMain.do?icdCd=C0001&icdgrpCd=03&icdSubgrpCd=>). 말라리아 환자 중 90% 이상이 DMZ 10 km 이내에서 발생했으며 이는 북한의 방역이 원활하지 않아 접경지로 넘어오는 말라리아 매개 모기로 인한 것으로 보고 있다 (경기도 감염병관리위원회 회의 <https://www.yna.co.kr/view/AKR201709011559000061>). 더욱이, 이런 감염병들은 기후변화와 관련성이 높으며 특히 말라리아는 모든 기상요인과 유의한 상관성을 보였다 (Kim et al., 2010). 때문에, 변하는 미래 기후와 북한에서부터 유입되는 모기로 인해 감염병이 확산되지 않도록 미래 동향을 살펴 보건 관리 대책을 세울 필요가 있다. 북한의 미흡한 방역 현황과 비슷한 사례로, 베네수엘라는 최근 극심한 경제 위기와 함께 보건 관리 시스템이 위기를 맞아 세계적으로 주목을 끌만

큼 말라리아 발병률이 급격히 증가하고 있다 (World Health Organization Geneva, 2018). 베네수엘라의 말라리아 발생률은 2007년부터 2017년까지 10년 동안 총 893% 증가했고 2017년에만 171%의 증가율을 보였다 (Pan American Health Organization, 2017). 이런 발병률은 남아메리카의 말라리아 발병률의 50% 이상을 차지하며, 베네수엘라 뿐만 아니라 쿠바 등과 같은 이웃 나라들로의 감염까지 초래하며 남아메리카 전체의 말라리아 발병률을 높이고 있다 (Pan American Health Organization, 2017). 말라리아 발병에는 사회경제적, 환경적, 지형적 등 여러 요소가 관여하지만, 사회경제적인 요소들은 그 영향에 비해 정확한 정량화가 어려우며 미래를 예측하는데 한계가 존재한다. 따라서 본 연구는, 북한과 비슷한 사회경제적 상황을 보이는 베네수엘라의 감염병 발생을 파악하여 기후변화에 따른 말라리아 확산 경향을 간접적으로 살펴, 향후 국내로 유입될 수 있는 말라리아 발병 관리와 관련된 보건 정책 수립에 이용될 것으로 보인다. 이런 간접적인 예측을 위해 온도나 강수량과 같은 환경적 요소 및 고도와 같은 지형적 요소들을 사용해 베네수엘라의 미래 말라리아 발생에 취약한 잠재 발생 지역을 파악하고 지역적 특성, 토지이용적 특성 및 사회적 특성을 분석하려 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구 대상 및 자료

2.1.1 연구 대상지

베네수엘라는 남아메리카의 북쪽 (북위 10° 30' 00" 서경 66° 55' 00")에 위치한 나라로, 면적은 916,455 km²이고 인구는 2015년 기준 30,620,404명으로 인구 밀도는 약 30.2명/km²이다 (Fig. 1). 베네수엘라는 열대 기후에 속하지만 총 25개 행정구역 및 지역간 차이가 크다. 보통 남아메리카의 우기는 가장 비가 많이 내리는 6월에서 10월 사이지만 베네수엘라 기상청 자료에 따르면 베네수엘라는 특히 9월에 태양이 베네수엘라와 수직이 되면서 가장 온도가 높고 습한 기간이 된다.

2.1.2 말라리아 발생 지점 데이터

Malaria Atlas Project (MAP)는 말라리아와 관련된 모든 데이터를 공간화된 데이터로 제공하는 사이트로 2006년 빌 게이츠 부부에 의해 만들어졌다 (<https://map.ox.ac.uk/explorer/#/>). MAP는 *Plasmodium falciparum*, *Plasmodium vivax* 외에도 말라리아 발생을 유발하는 유충의 출현 데이터, *Anopheles*



Fig. 1. Geographical location of Venezuela.

종별 출현 데이터, 말라리아 발병지점 데이터, 말라리아 퇴치 현황 등과 같이 말라리아와 관련된 정보를 세계적 범위로 제공하며 정기적으로 갱신되는 데이터이다. 본 연구에서는 MAP에서 제공하는 베네수엘라 출현 *Anopheles*종인 *A. nuneztovari* 184개, *A. darlingi* 35개, *A. aquasalis* 78개, *A. albicans* 136개 등의 출현 데이터 총 433개를 받아 포인트 데이터로 활용했다.

2.1.3 기후 데이터

말라리아 매개 모기는 습한 곳을 좋아하고 물가에 알을 낳으며 높은 온도일 때 말라리아 원충의 성장률이 높기 때문에 강수량이나 온도와 같은 기후 데이터는 말라리아 발병에 중요한 역할을 한다 (Gunda et al., 2017). 현재 스위스 연방 산림·눈·지형 연구소 (Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research; WSL)에서 주관하는 CHELSA (Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas)는 세계적으로 모든 지역의 온도와 강수량 수치를 파악하고 이를 공간화하여 제공한다. CHELSA는 다른 기후자료 제공 기관보다 정밀한 과거 기후자료를 제공하고 신뢰성 높은 예측 결과를 제공하기 때문에 (Bobrowski and Schickhoff, 2017) 본 연구에서는 1km 격자 해상도의 CHELSA 과거 기후자료 (1980년-2000년), 현재 기후자료 (2015년) 및 미래 기후자료 (HadGEM-AO_RCP 6.0_2040년-2060년)를 활용했다

(<http://chelsa-climate.org/downloads/>). Hadley Centre에서 버전 2로 제공하는 HadGEM2 모델은 IPCC AR5 참여모델이며 그 중 HadGEM-AO는 온도와 강수량 변화 예측에 뛰어나고 미래 기후변화 예측에 주로 사용되므로 본 연구에서는 HadGEM-AO 모델을 활용했다 (Baek et al., 2013; Kim et al., 2013). 또한, 앞서 설명한 바와 같이, 베네수엘라는 특히하게 9월에 가장 온도가 높고 습한 기간이 되기 때문에 이런 기후를 반영하여 본 연구에서는 9월의 기후 데이터를 중첩하여 사용했다.

2.1.4 DEM (Digital Elevation Model; 수치표고모델)

최근 기후변화로 인해 높은 지역에서의 온도 또한 변하면서 모기와 같은 생물들의 생존 가능 범위가 함께 높아지고 있다. 약 2,000 m 이상의 고도에서는 출현빈도가 낮았던 말라리아 매개 모기의 출현 범위가 넓어지면서 약 3,000 m 이상의 고도에서도 말라리아 환자가 발생한 사례가 존재한다 (Bishop and Litch, 2000; World Health Organization, 2012). 하지만 3,000 m 이상의 고도에서의 말라리아 발병은 흔치 않은 사례이며 더 높은 고도에서는 급격히 낮아지는 기온으로 인해 매개 모기가 생존하기 어렵다. 대상지인 베네수엘라에는 안데스 산맥과 더불어 약 5,000 m 높이의 산맥들 (피코 볼리바르 등)이 존재하기 때문에 이런 지역들에서는 말라리아의 발병이 어려울 것으로 판단하여 본 연구에서는 고도를 말라리아 발생 가능성 예측에 영향을 미치는 하나의 변수로 포함 시켰다. 본 연구에서는 National Centers for Environmental Information: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)에서 제공하는 1km 격자 해상도의 DEM 래스터 자료를 받아 대상 지역인 베네수엘라 지역을 추출하여 사용했다.

또한, 모기는 빛이 강한 곳보다 서늘하고 시원한 그늘에 대부분 서식하며 바람이 너무 강하게 불지 않는 곳을 선호한다 (Brown, 2013). 따라서 위와 같은 DEM 데이터를 활용하여 Aspect와 Hillshade를 도출하여 말라리아 모기의 잠재 분포를 예측하는데 사용했다.

2.1.5 수역으로부터의 거리

모기는 유속이 낮은 강이나 호수와 같은 고인 물에서 알을 낳고 번식하며 유충 과정을 거친다. 따라서 말라리아 매개체가 성충이 되기까지의 과정에서 수역은 중요한 서식지 역할을 하며 주요 활동 범위에 속하게 된다 (Asare et al., 2016). 따라서 본 연구에서는 World Wild Life (WWF), Center of

Environmental Systems Research 및 독일의 University of Kassel에서 공동으로 제작하여 제공하는 수역 데이터에서 베네수엘라 지역을 추출하여 사용했으며 제공받은 데이터는 강과 습지뿐만 아니라 인간에 의해 인위적으로 만들어진 고인물도 포함한다. 모기의 서식 가능성이 높은 지역을 포함하여 미래 말라리아 잠재 분포 지역을 파악하기 위해 강, 호수나 습지로부터의 거리를 측정하여 사용했다.

2.2 연구 방법

Maxent (Maximum Entropy) 모델은 개발자가 설정한 변수와 제한요소를 이용하여 확률분포를 예측하는 기계학습모형으로 종의 출현 데이터만을 요구하며 변수의 선형, 비모수적인 관계들을 잘 나타내주는 모형이다 (Phillips, 2017). 특히 Maxent 모형은 출현자료만을 적용할 때 다른 모형보다 비교적 높은 예측정확도를 나타내어 출현 데이터 활용에 적합하고 (Seo et al., 2008; Song et al., 2012) 자료의 입출력이 용이하며 결과의 해석이 쉽다는 장점이 있다 (Song et al., 2012). 말라리아의 주요 발병지점과 말라리아 매개체인 모기의 서식 적합 지역 간의 상관성을 분석한 여러 선행연구에서는 두 데이터가 양의 상관성을 보이며 Maxent를 통해 매개 모기의 출현 지역을 예측함으로써 말라리아의 잠재 발생지역을 예측하는 방법론의 정확성을 검증한 바 있다 (Gwitira et al., 2015; Fuller et al., 2016; Gwitira et al., 2018). 따라서 본 연구에서는 베네수엘라의 모기 출현 데이터를 통해 모기의 분포를 파악하여 말라리아의 잠재 발생 가능성을 분석하려 한다.

Maxent 모형을 구동할 때 사용하는 환경변수들이 서로 강한 상관관계를 보이면 다중공선성 (multicollinearity) 문제가

일어날 수 있기 때문에 이렇게 높은 상관성을 보이는 변수들은 제거하여 모형을 구동해야 한다. 하지만 이미 선행연구들에서 PCA (Principal component analysis)나 VIF (Variance Inflation Factor) 분석을 통해 여러 변수 간의 상관성을 확인하고 온도, 강수량, 고도 및 수역으로부터의 거리 등의 독립성을 검증했으므로, 본 연구에서는 언급한 독립 변수들에 대한 상관성 분석 과정을 생략했다 (Gwitira et al., 2015; Hasyim et al., 2018).

Maxent 모형의 정확도는 Receiver Operating Characteristic (ROC)의 AUC 면적 (Area Under Cover) 값을 통해 측정된다. 모형을 통한 분류가 정확할수록 AUC 값은 1에 가까워지고 최소값의 기준으로 0.5를 정하여 분석하며, AUC 값이 0.7 이상일 경우에 의미가 있다고 판단한다 (Seo et al., 2008; Lee et al., 2010). 본 연구에서는 말라리아 발생지점, 즉 모기의 출현자료가 존재하기 때문에 이를 활용할 수 있는 Maxent 모형을 이용하여 향후 분포를 예측했다. AUC 값을 구하기 위해, 예측값과 실제값을 비교하는 등의 과정에서 사용 및 적용된 데이터들은 서로 독립적이다.

본 연구에서는 모델 결과의 정확성을 확인하기 위해 무작위로 데이터의 일부 분석을 따로 진행하는 Random test percentage를 25%로 설정하고 정확성 향상을 위해 Maxent 분석을 몇 번 진행할지 결정하는 Replicates를 100번으로 설정하여 구동했다. Run type은 Subsample로, Maximum iteration은 1000으로 설정했고 Output format은 Logistic으로 구동하여 결과를 추출했다.

Table 1. Material and Methods

	Data	Type	Source	Description
Species Data	Malaria presence data	Point data (shp)	Malaria Atlas Project (MAP)	- Data between years 1980 and 2003. - Total of 433 points obtained.
Climate Data	Temperature	Raster	Chelsa	- Data used from past, present and future.
	Precipitation	Raster	Chelsa	- Future prediction using HadGEM-AO (RCP 6.0)
Geographic Data	DEM	Raster	NOAA	Aspect and Hillshade derived from DEM.
	Water Distance	Raster	WWF	Containing ponds, wetlands, reservoirs, etc.
Method	Maxent	.jar (SDM)	MIT	- Random test percentage of 25% - 100 Replicates - 'Subsample' Run type - 'Logistic' output format

3. 결과 및 고찰

Maxent 모델 구동 결과, 과거와 현재 데이터 구동의 AUC 값은 0.764로 나왔고 현재와 미래 데이터 구동의 AUC 값은 0.748로 나왔으며, 둘 다 정확도 0.7 이상의 값이므로 모형의 예측결과가 충분히 정확하다고 볼 수 있다 (Seo et al., 2008; Lee et al., 2010). 보통 Maxent 결과는 threshold 값을 설정하여 대상 종의 출현 및 비출현으로 나눠 분석을 진행하지만, Maxent에서 설정되는 threshold 값은 같은 대상 종이라도 적용하는 데이터와 설정에 따라 분석결과가 달라질 위험이 있다. 또한, 본 연구에서 설정되는 threshold 값에 따른 출현 분포는 너무 방대하며 과대 추정의 위험이 있으므로 구체적인 관리대책을 세우기 부적합하다고 판단했다. 따라서 threshold 설정이 아닌 표준편차와 같이 통계적인 분석에 근거한 평가등급을 진행하여 결과를 5등급으로 나누고 가장 관리가 시급한 지역을 추출했다 (Choi et al., 1998).

본 연구에서 사용한 *Anopheles* 모기 종의 출현자료가 존재하는 과거 (1980년-2003년)를 중심으로 현재와 미래의 잠재 서식지를 분석하기 위해 ArcGIS Standard Deviation Classification 툴을 통해 표준편차 (Standard Deviation)를 구한 결과, 표준편차인 0.2를 기준으로 0에서 1 사이의 결과값을 같은 간격의 5등급으로 나눠 세밀한 분포를 확인했다 (Fig. 2). 1등급은 분포 확률이 가장 낮은 지역으로, 등급이 오를수록 분포 가능성도 커지며 5등급은 말라리아 발생 잠재력이 굉장히 높은 '고위험 지역'으로 구분된다. 본 연구에서는 가장 위험한 등급이자 관리가 시급할 것으로 보이는 5등급을 중심으로 말라리아의 분포 변화를 확인했다.

등급화한 지도에서 과거, 현재, 미래의 가장 위험한 지역인 5등급 면적 사이에 유의미한 변화가 존재하는지 확인하기 위

해 25개 각 행정구역 시기별 5등급 면적의 분산 분석을 진행했다. 분산 분석 결과 (Table 2 (a)), P-값 (0.0025)이 유의수준 (0.05)보다 낮기 때문에 (Hennemuth et al., 2013) 25개 행정구역의 시기별 5등급 분포 면적 사이에 유의미한 차이가 존재한다는 것을 알 수 있으며, 이런 유의미한 차이를 보이는 행정구역을 선택하기 위해 최소유의차 (Least Significant Difference, LSD) 검정을 진행했다. LSD 검정 결과, LSD값보다 큰 평균 차이값을 보인 행정구역은 Falcon구와 Zulia구 (Fig. 3)로 나타났다 (Fig. 4).

위성영상과 관련 문헌을 확인한 결과 (Fig. 5), 베네수엘라에는 남아메리카 지역에서 세 번째로 크고 중요한 습지가 있으며 그 외에도 연안 지역과 연결되는 약 55개의 습지가 있다 (Marrero C. et al., 2017). 특히 베네수엘라의 북부 지방은 베네수엘라 만과 직접 연결된 지역으로, 습지 조성에 적합하며 곳곳에 여러 크기의 호수들도 존재한다. 말라리아 매개체인 모기는 적절한 온도와 고도뿐만 아니라 알을 낳고 성충이 되기 위한 서식지가 필요하며, 주로 습도가 높은 고인 물로 이루어진 습지나 호수 등이 이런 서식지 역할을 한다. Zulia구의 경우, 베네수엘라 만과 연결된 마라카이보호를 둘러싸는 듯한 토지 형태를 보이며 마라카이보호로부터 여러 생태적 서비스를 받고 있다 (Fig. 5 (a)). 뿐만 아니라 Embalse de Tule, Embalse Machango, Embalse de Pueblo Viejo, Represa Burro Negro 등과 같은 저수지 및 댐도 존재하여 모기 서식으로 적합한 수역이 자연적 및 인위적으로 다수 형성되어 있다. 특히 Zulia구 분석결과, 마라카이보호 주변 지역에 인구가 밀집되어 있어 특히 취약하여 말라리아 잠재 서식 가능성이 큰 것으로 나타났다 (Fig. 5 (b)). Falcon구 또한 약 17개의 습지 및 여러 호수와 더불어 Represa Maticora, Embalse El Isiro 등 모기 서식에 적합한 저수지가 존재하여 말라리아 잠

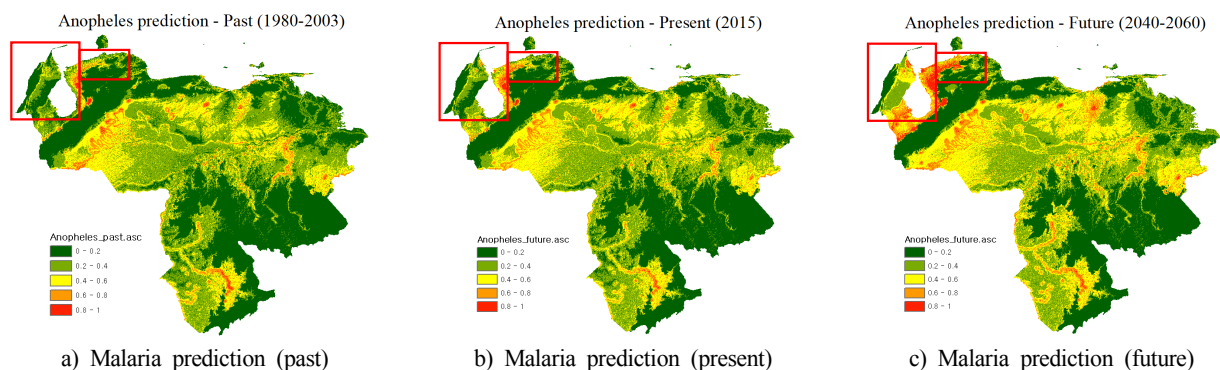


Fig. 2. Results of Maxent Modeling.

Prediction of a) Past, b) Present and c) Future Malaria potential distribution divided into 5 risk levels

Table 2. a) ANOVA test and b) LSD test of Venezuela administrative districts

(a) ANOVA test

Source of Variation	df	F	P-value	F crit	Alpha
Between Groups	24	2.55	0.0025	1.74	0.05
Within Groups	50	-	-	-	-

(b) Least Significant Difference, LSD

Administrative Districts	LSD/Difference	Administrative Districts	LSD/Difference	Administrative Districts	LSD/Difference
Amazonas	0.85	Lara	0.35	Portuguesa	0.04
Anzoategui	0.03	Merida	0.12	Sucre	0.27
Apure	0.06	Miranda	0.35	Tachira	0.09
Aragua	0.36	Monagas	0.36	Trujillo	0.33
Barinas	0.09	Nueva Esparta	0.36	Vargas	0.36
Bolivar	0.57	Guarico	0.01	Yaracuy	0.35
Carabobo	0.36	Falcon	1.04	Zulia	1.93
Cojedes	0.36	Distrito Capital	0.36		
Delta Amacuro	0.36	Dependencias Federales	0.36		



Fig. 3. Geographical location of Falcon and Zulia districts in Venezuela

재 서식지 취약지역으로 나타났다. Falcon구는 습지의 면적이 총 1,078.40 km²로, 베네수엘라에서 가장 습지 면적이 넓은 행정구역이다 (Marrero C. et al., 2017). 또한, 수역 인근

삼림도 말라리아 분포에 영향을 미치는데, 도시화로 인한 삼림 파편화는 모기의 서식지를 좁혀 모기가 인구 밀도가 높은 주거지역으로 확산하여 말라리아 발병률을 높일 가능성도 배제할 수 없다 (Park S. et al., 2012).

토지이용적 측면에서 베네수엘라 토지의 약 1/4은 농업을 위한 논밭이며 주요 농작물 중 하나인 쌀과 같은 작물 재배를 위한 논은 모기가 번식하기 매우 적합한 조건이며 대부분 인구 밀도가 높은 북부 지방에 위치한다 (Fig. 5 (d)). 또한, 최근 농업을 위한 인구 이동이 이루어지면서 논과 같은 모기 서식 지역이 늘어나 번식이 왕성해졌으며 (Arevalo-Herrera M. et al., 2012) 말라리아 잠재 서식 취약지역으로 나온 Falcon구와 Zulia구도 이에 해당된다. 농업 외에도 베네수엘라 북부 지역에서는 어업이 주 경제활동 중 하나로 이뤄지는데 특히 Falcon구에는 연안 지역과 더불어 양식장이 다수 존재한다 (Fig. 5 (c)). 여러 연구결과에 따르면, 양식장은 자연 수역보다 4배 이상의 모기 밀도를 보이며 모기가 서식하기에 비교적 더 적합한 지역이다 (dos Reis IC. et al., 2015). 분석결과, 특히 Falcon구에 5등급 취약지역으로 추출된 지역에는 넓은 양식장이 존재하므로 말라리아 잠재 발생 서식지로의 가능성이 매우 클 것으로 보인다.

앞서 언급한 농업, 인공 수역, 양식장 등은 모두 인간의 생활과 경제활동을 위한 수단이며 따라서 해당 지역의 인구분

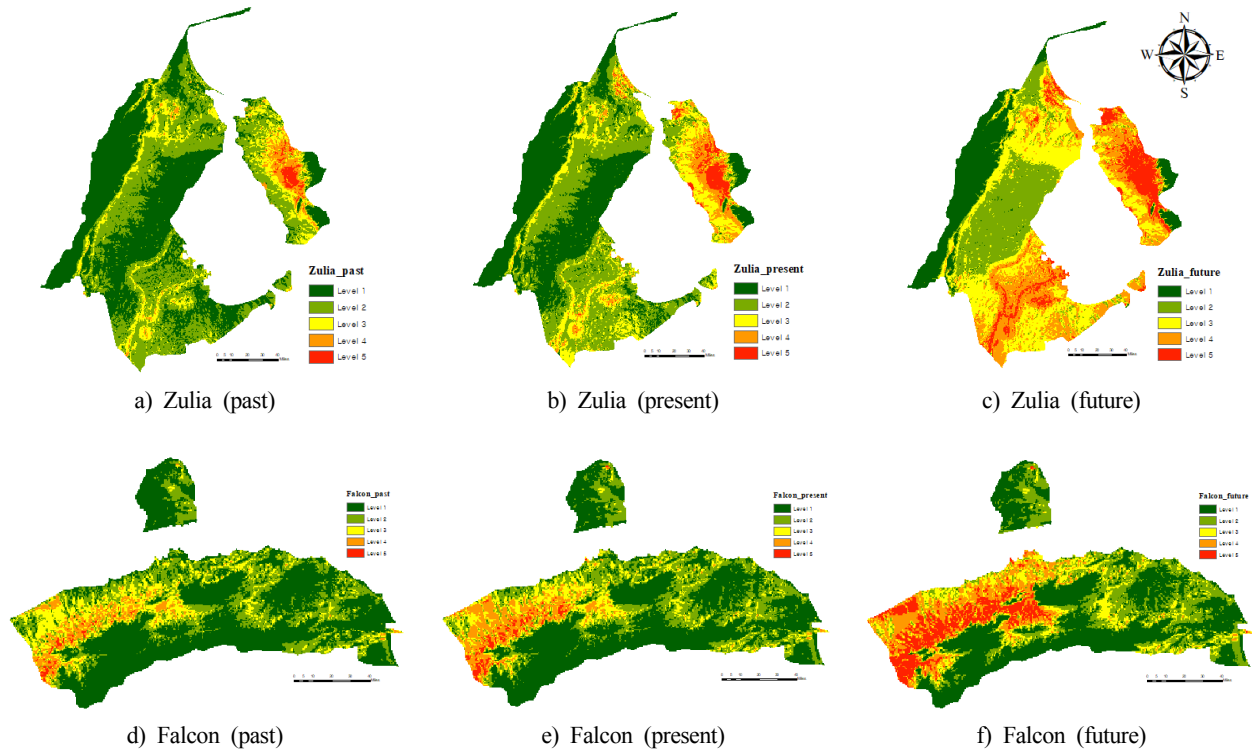


Fig. 4. Administrative districts exposed to high malaria risk extracted through Statistical Analysis.

a) Past, b) Present, c) Future distribution of Zulia district and d) Past, e) Present, f) Future of Falcon district

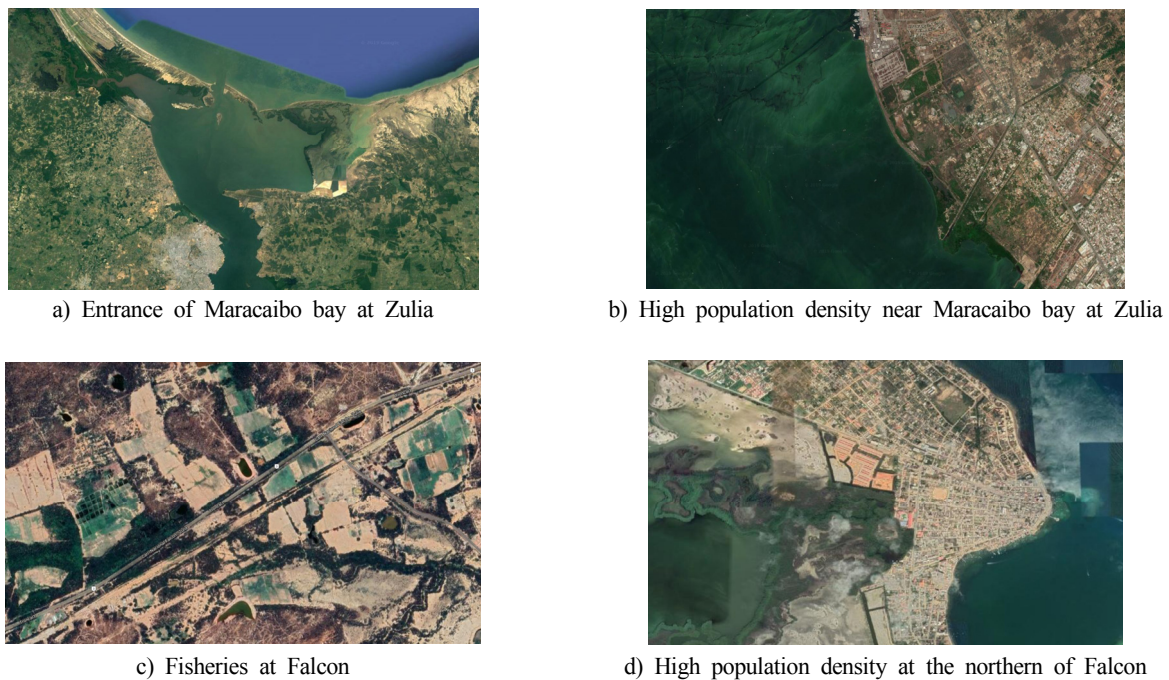


Fig. 5. Satellite images of Falcon and Zulia districts.

포 및 밀도가 높다. 베네수엘라 인구의 반 이상이 토지의 약 10%가량을 차지하는 북부 지방에 거주하며 이는 매우 높은 인구 밀도를 보인다. 모기 서식지로 매우 적합한 자연적 및 인위적 서식지가 다수 존재하며 인구 밀도 또한 높은 특성은 Falcon구와 Zulia구를 포함한 베네수엘라 북부지역의 말라리아 발생 가능성을 매우 높이며 취약지역으로 만든다. 등급별 분포 중, 위험지역에 속하는 4등급과 5등급이 과거 Zulia구와 Falcon구 전체면적에서 차지했던 면적 비율은 각각 4.49%와 6.27%였으며 현재의 면적 비율은 각각 9.35%와 10.75%로 과거에 비해 면적이 증가했다. 또한 미래의 Zulia구와 Falcon구 전체 면적 대비 4등급과 5등급의 면적 비율은 32.12%와 22.90%로, 현재 비율에 비해 Zulia구는 약 23%와 Falcon구는 약 12% 증가한 것으로 보인다. 뿐만 아니라 정치적인 측면에서 베네수엘라의 보건 정책 및 관리가 미흡해지며 밀도가 높은 지역의 말라리아 감염성이 확대해나가며 더 넓은 지역으로 퍼질 가능성과 이웃 나라로의 감염 위험까지도 존재할 것으로 보인다.

4. 결론

위성 영상으로 볼 수 있듯이 (fig. 5), 베네수엘라의 말라리아 잠재 서식 취약지역은 25개의 행정구역 중, Falcon구와 Zulia구로 나타났으며 이를 포함한 북부지역의 지역적, 토지 이용적, 사회적 특성을 고려하여 분석했다. 베네수엘라의 북부지역은 지역 특성상 여러 습지나 마라카이보호와 같은 호수 등의 자연적으로 형성된 수역이 다분하여 말라리아 매개체인 모기의 서식지 역할을 한다. 또한, 토지이용적 측면에서는 어업이나 농업 등 경제활동으로 인해 논이나 양식장으로의 토지이용이 늘어나며 매개체가 서식할 수 있는 인위적인 수역이 많아서 자연 수역과 더불어 매개 모기에 서식지를 제공한다. 마지막으로, 사회적인 측면에서 베네수엘라의 북부 지역에는 전체 인구의 약 60% 이상이 거주하여 인구 밀도가 굉장히 높다. 지역적 및 토지이용적 특성으로 인해 이미 말라리아 발생 가능성이 높은 지역에 인구 또한 밀집되어 있어 감염병의 확산이 비교적 빠르고 쉽게 일어날 것으로 예측된다. 따라서 베네수엘라의 말라리아 발병률을 낮추기 위해서는 인구 밀도가 높은 북부지역 보건 정책의 더욱 철저한 계획이 필요할 것으로 보인다. 본 논문은 베네수엘라의 말라리아 발병률을 낮추기 위해, 미래 말라리아 발생 가능 지역을 예측함으로써 향후 보건 관리 계획 수립에 이바지하려 한다.

본 연구에서는 매개체 감염 질병에 대한 베네수엘라의 취약성을 파악하려 했으며 취약성의 평가 인자로는 노출 (기후

의 변화), 민감도 (사회적 변화) 및 적응능력 (경제적 변화)이 있다. 노출은 시스템이 받는 변화이며 본 연구에서는 이와 연관된 인자들인 기후변화나 지형 인자들을 포함 시켰다. 하지만 민감도나 적응능력에 포함되는 인자들인 인구 밀도, 토지 피복의 변화, 개발지역의 변화, GDP와 같은 경제의 변화 등은 자료 구축 및 배포의 시기나 정확성 미비로 고려하지 못했다. 따라서 토지피복 및 이용 변화와 더불어 앞서 언급한 민감도와 적응능력에 해당되는 데이터를 포함하여 정밀한 말라리아 잠재 발생 가능성을 예측하고 이에 따른 취약성을 도출하는 것이 필요하다. 향후 연구로 노출뿐만 아니라 민감도 및 적응능력 인자들을 모두 포함 시켜 정확도를 높인다면 보건 관리 정책 계획 측면에서 활용성이 높을 것으로 예상된다.

REFERENCES

- Asare EO, Tompkins AM., Bomblies A. 2016. A regional model for malaria vector developmental habitats evaluated using explicit, pond-resolving surface hydrology simulations. PLoS ONE. 11 (3): e0150626.
- Baek HJ., Lee J., Lee HS., H YK., Cho CH., Kwon WT., Marzin C., Gan SY., Kim MJ., Choi DH., Lee J., Lee J., Boo KO., Kang HS., Byun YH. 2013. Climate change in the 21st century simulated by HadGEM2-AO under Representative Concentration Pathways. Asia-Pacific J Atmos Sci. 49 (5): 603-618, 2013.
- Balbus JM., Malina C. 2009. Identifying Vulnerable Subpopulations for Climate Change Health Effects in the United States. J Occup Environ Med. 2009; 51: 33-37.
- Baldwin RA. 2009. Use of Maximum Entropy Modeling in wildlife research. 2009. Entropy 2009, 11, 854-866.
- Bishop RA., Litch JA. 2000. Malaria at high altitude. J Travel Med. 7 (3): 157-158
- Bobrowski M., Schickhoff U. 2017. Why input matters: selection of climate data sets for modelling the potential distribution of the treeline species in the Himalayan region. Elsevier. 359 (2017): 92-102.
- Brown H. 2013. Good Question: Where do mosquitoes hide in the day?. CBS Minnesota. [accessed 2019 Sep 8]. <https://minnesota.cbslocal.com/2013/07/08/good-question-where-do-mosquitoes-hide-in-the-day/>
- Caminade C., Kovats S., Rocklov J., Tompkins AM., Morse AP., Colon-Gonzalez FJ., Stenlund H., Martens P., Lloyd SJ. 2014. Impact of climate change on global

- malaria distribution. PNAS. 111 (9): 3286-3291.
- Centers for Disease Control and Prevention. 2018.11. About Malaria: Biology. Global Health, Division of parasitic diseases and malaria. [accessed 2019 Sep 8]. <https://www.cdc.gov/malaria/about/biology/index.html>
- Choi SM., Han KS., Hwang HC. 1998. Resources Evaluation system for rural planning purposes (III)-Rating tabulation for rural resources evaluation items. KSRP. Vol .4, No. 1 p.75-85 (1998.3).
- dos Reis IC., Torres Codeco C., Degener CM., Keppeler EC., Muniz MM., Silva de Oliveira FG., Carvajal Cortes JJ., Monteiro AF., Albano de Souza CA., Morone Rodrigues FC., Maia GR., Honorio NA. 2015. Contribution of fish farming ponds to the production of immature *Anopheles* spp. in a malaria-endemic Amazonian town. *Malar J* (2015) 14: 452.
- Fuller DO., Alimi T., Herrera S., Beier JC., Quinones ML. 2016. Spatial association between malaria vector species richness and malaria in Colombia. *Acta Tropica* 158 (2016) 197-200.
- Gunda R., Chimbari MJ., Shamu S., Sartorius B., Mukaratirwa S. 2017. Malaria incidence trends and their association with climatic variables in rural Gwanda, Zimbabwe, 2005-2015. *Malar J.* 16 (393): PMID 28964255.
- Gwitira I., Murwira A., Zengeya FM., Masocha M., Mutambu S. 2015. Modelled habitat suitability of a malaria causing vector (*Anopheles arabiensis*) relates well with human malaria incidences in Zimbabwe. *Applied Geography* 60 (2015) 130-138.
- Gwitira I., Murwira A., Zengeya FM., Shekede MD. 2018. Application of GIS to predict malaria hotspots based on *Anopheles arabiensis* habitat suitability in Southern Africa. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation* 64 (2018) 12-21.
- Haines A., Kovats RS., Campbell-Lendrum D., Corvalan C. 2006. Climate change and human health: Impacts, vulnerability and public health. *Public Health* (2006) 120, 595-596.
- Hasyim H., Nursafingi A., Haque U., Montag D., Groneberg DA., Dhimal M., Kuch U., Muller R. 2018. Spatial modelling of malaria cases associated with environmental factors in South Sumatra, Indonesia. *Malar J* (2018) 17: 87
- Hennemuth B., Bender S., Bulow K., Dreier N., Keup-Thiel E., Kruger O., Mudersbach C., Radernacher C., Schoetter R. 2013. Statistical Methods for the analysis of simulated and observed climate data, applied in projects and institutions dealing with climate change impact and adaptation. CSC Report 13. Climate Service Center. Germany.
- Instituto Nacional de Estadística. 2011. Republica Bolivariana de Venezuela: XIV Censo nacional de poblacion y vivienda. Resultados basicos. N° de Deposito Legal: Ifi36820143102053
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. Venezuela. [accessed 2019 Jul 25]. <http://www.inameh.gob.ve/web/prensa2/noticias.php?n=1227>
- IPCC. 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate change. IPCC, Geneva, Switzerland, p.151.
- IPCC. 2018. Special report of 1.5°C global warming. 48th Session of the IPCC Incheon. Summary for policy makers. 2018.10.
- Kim MH., Kang HS., Lee J., Baek HJ., Cho CH. 2013. Estimates of the water cycle and river discharge change over the global land at the end of 21st century based on RCP scenarios of HadGEM2-AO Climate model. *Atmosphere* 23 (4), 2013.12, 425-441.
- Kim SH., Jang JY. 2010. Correlations between Climate Change-related infectious diseases and meteorological factors in Korea. *J Prev Med Public Health* 2010;43 (5): 436-444.
- Lee DK., Kim HG. 2010. Habitat potential evaluation using Maxent model-Focused on Riparian distance, stream order and land use. *J Korean Env Res Tech* 13 (6): 161-172 (2010).
- Lounibos LP., Conn JE. 2000. Malaria vector heterogeneity in south america. *AE.* 46 (4): 238-249.
- Marrero C., Rodriguez-Olarte D. 2017. Los humedales costeros venezolanos en los escenarios de cambios climaticos: vulnerabilidad, perspectivas y tendencias. p. 461-476. In: Botello AV., Villanueva S., Gutierrez J., Rojas Galaviz JL (eds.). *Vulnerabilidad de las zonas costeras de Latinoamerica al cambio climatico*. UJAT, UNAM, UAC. p.476.
- McMichael AJ., Woodruff RE., Hales S. 2006. Climate

- change and human health: present and future risks. *Lancet*. 367: 859-869.
- Pan American Health Organization. 2017. Report on the situation of malaria in the americas-2017. World Health Organization. Regional Malaria Program.
- Park S. Han D. 2012. Reviews in Medical Geography: Spatial Epidemiology of Vector-Borne Diseases. *Journal of the Korean Geographical Society* 47 (5), 2012.10, 677-699.
- Patz JA., Campbell-Lendrum D., Holloway T., Foley JA. 2005. Impact of regional climate change on human health.. *Nature*. 438 (7066): 310-317.
- Paul P., Kangalawe RYM., Mboera LEG. 2018. Land-use patterns and their implication on malaria transmission in Kilosa District, Tanzania. *Trop Dis Travel Med Vaccines*. 4 (6): PMID 29951210.
- Phillips SJ. 2017. A brief tutorial on maxent.; [accessed 2019 Aug 25]. http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/
- Seo CW., Choi TY., Choi YS., Kim DY. 2008. A study on wildlife habitat suitability modeling for Goral (*Nemorhaedus caudatus raddeanus*) in Seoraksan National Park). *J Korean Env Res & Reveg Tech* 11 (3): 28-38 (2008).
- Seo CW., Park YR., Choi YS. 2008. Comparison of species distribution models according to location data. *Journal of Korean Society for Geospatial Information Science* 16 (4), 2008.12, 59-64.
- Song W., Kim E. 2012. A comparison of machine learning species distribution methods for habitat analysis of the Korea Water Deer (*Hydropotes inermis argyropus*). *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 28, No. 1, 2012, p.171-180.
- World Health Organization. 2003. Climate change and human health: risks and responses. Geneva. In: McMichael AJ., Campbell-Lendrum DH., Corvalan CF., Ebi KL., Githeko AK., Scheraga JD., Woodward A. (Eds.).
- World Health Organization. 2012.1. International travel and health. Geneva: World Health Organization:Malaria. 144-167.
- World Health Organization. 2018. World Malaria Report 2018. Geneva: World Health Organization. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.