



2024 기후과학 합동보고서

미래를 위한 최신의 날씨, 기후, 물 관련
환경 및 사회 과학에 관한 다자기구 고품질
편집본



이 보고서는 세계기상기구(WMO)가 유엔 사무총장의 지시에 따라 주요 글로벌 파트너 조직들의 최신 기후 과학 업데이트를 종합하여 작성한 것이다. 2024년 미래 정상회의와 연계하여, 이 보고서에서는 기후 과학의 현황과 미래를 위한 최신 기상, 기후, 물, 관련 환경 및 사회 과학에 대한 업데이트를 제공한다. 보고서에 기여한 파트너는 다음과 같다; WMO, Met Office UK, the Official Children and Youth Constituency of the United Nations Framework Convention on Climate Change (YOUNGO), WMO Global Atmosphere Watch (GAW), WMO World Weather Research Programme (WWRP), World Climate Research Programme (WCRP), Global Carbon Project (GCP), United Nations Environment Programme (UNEP), European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), United Nations Office for Outer Space Affairs (UNOOSA), European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT), International Telecommunication Union (ITU), United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD), International Science Council (ISC), United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies (IFRC) and Future Earth.

이 보고서의 전자파일은 다음에서 확인할 수 있다: <https://library.wmo.int/idurl/4/69018>

Cover photo: Kampan - Adobe Stock

Design and layout: Lagrua Studios

기여 저자

Overall coordination and editing by WMO – Lauren Stuart, Claudia Pusch, Isha Bhasin, Ilaira Gallo

Executive summary – Simon McLellan (Met Office, UK), Michel Jean (WMO; Environment and Climate Change Canada), Melissa Jiménez Gómez Tagle (YOUNGO), Shaurya Patel (YOUNGO), Chaitanya Reddy (YOUNGO)

기후과학 현황 : 긴급하고 야심 찬 기후 행동의 필요성 – Melissa Seabrook (Met Office, UK), Leon Hermanson (Met Office, UK), Adam Scaife (Met Office, UK; University of Exeter, UK), Doug Smith (Met Office, UK), Anne Olhoff (UNEP Copenhagen Climate Centre), John Christensen (UNEP Copenhagen Climate Centre), Maarten Kappelle (UNEP), Jian Liu (UNEP), Joeri Rogelj (Imperial College London, UK; International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Austria), Omar Baddour (WMO), Claire Ransom (WMO), Yohanna Villalobos (GCP), Yolandi Ernst (GCP), Yuhui Wang (GCP), Ana Bastos (GCP), Ben Poulter (GCP), Robert B. Jackson (GCP), Pep Canadell (GCP), John Kennedy (WMO), Frederic Chevallier (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), France), Andrew Croftwell (National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Global Monitoring Laboratory and Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences, University of Colorado Boulder, USA), Christoph Gerbig (Max Planck Institute for Biogeochemistry, Germany), Armin Jordan (Max Planck Institute for Biogeochemistry, Germany), Xin Lan (NOAA Global Monitoring Laboratory, USA), Zoë Loh (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia), Ingrid Luijckx (Wageningen University and Research, Netherlands), John Miller (NOAA Global Monitoring Laboratory, USA), Yousuke Sawa (Japan Meteorological Agency, World Data Centre for Greenhouse Gases (WDCCG), Japan), Oksana Tarasova (WMO), Alex Vermeulen (Integrated Carbon Observing System – European Research Infrastructure Consortium (ICOS ERIC)/ Lund University, Sweden), Ray Weiss (Scripps Institution of Oceanography, University of California San Diego, USA), Thorsten Warneke (University Bremen, Germany), Camille Yver (LSCE, France)

인공지능과 기계학습: 날씨 예보 혁신 – Florian Pappenberger (ECMWF), Nils Wedi (ECMWF), Matthew Chantry (ECMWF), Christian Lessig (ECMWF), Simon Lang (ECMWF), Peter Dueben (ECMWF), Mariana Clare (ECMWF), Linus Magnusson (ECMWF), Estíbaliz Gascón (ECMWF), Florence Rabier (ECMWF), Amy McGovern (AI2ES, University of Oklahoma, USA), Hèou Maléki Badjana (Red Cross Red Crescent Climate Centre), Catherine de Burgh-Day (Bureau of Meteorology, Australia), Jürg Luterbacher (Justus Liebig University of Giessen, Germany), Monique M. Kuglitsch (Fraunhofer Institute for Telecommunications, Heinrich Hertz Institute, Germany), Hannah L. Cloke (University of Reading, UK)

우주 기반 지구 예측: 날씨, 기후, 물, 그리고 관련 환경 응용분야의 향상 – Jumpei Takami (UNOOSA), Anne-Claire Grossias (UNOOSA), Lorant Czaran (UNOOSA), Gemechu Jebeso Morketo (Central European University), Ajadi Sodiq (Central European University), Paolo Ruti (EUMETSAT)

가상과 물리적 영역의 연결: 물과 토지 관리를 위한 물입형 기술 활용 – Nakul Prasad (WMO), Stefan Uhlenbrook (WMO), Hwirin Kim (WMO), Celine Cattoen (National Institute of Water and Atmospheric Research (NIWA), New Zealand), William Scharffenberg (USA), Monique M. Kuglitsch (Fraunhofer Institute for Telecommunications, Heinrich Hertz Institute, Germany), Abd Salam El Vilaly (UNCCD), Bilel Jamoussi (ITU)

지속 가능한 미래로 가는 길: 기상, 기후, 물, 관련 환경 및 사회 과학에 대한 초학문적 접근의 역할 – Irasema Alcántara-Ayala (Institute of Geography, National Autonomous University of Mexico), Coleen Vogel (Global Change Institute, University of the Witwatersrand, South Africa), Motoko Kotani (Tohoku University, Japan; ISC), Carla Mooney (Bureau of Meteorology, Australia), Mandira Singh Shrestha (International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD), Nepal), Osvaldo Luiz Leal de Moraes (CEMADEN, São Paulo, Brazil)

모두의 생명을 구하는 조기경보 시스템으로 보호받는 미래 – Daniela Cuéllar Vargas (WMO), Salla Himberg (IFRC), Vanessa Gray (ITU), Rosie McDonald (ITU), Amélie Grangeat (ITU)

© World Meteorological Organization, 2024

인쇄물, 전자 형식, 기타 모든 형태와 언어로의 출판 권리는 WMO에 있다. WMO 출판물의 짧은 발췌 내용은 전체 출처를 명확히 표시하는 조건 하에 별도의 허가 없이 재생산할 수 있다. 이 출판물(기사)의 일부 또는 전체를 출판, 재생산, 또는 번역하고자 하는 편집 관련 문의 및 요청은 다음의 주소로 보내야 한다:

Chair, Publications Board
World Meteorological Organization (WMO)
7 bis, avenue de la Paix
P.O. Box 2300
CH-1211 Geneva 2, Switzerland
Tel.: +41 (0) 22 730 8403
Email: publications@wmo.int

주의: WMO 출판물에 사용된 명칭과 이 출판물에서 사용된 자료 제시는 국가, 영토, 도시 또는 지역, 또는 해당 당국의 법적 지위나 국경 또는 분계선의 한계에 관한 WMO 측의 의견 표현을 전혀 의미하지 않는다.

특정 회사 또는 상품에 관한 언급은 본문에서 언급되지 않았거나 광고되지 않은 다른 유사한 성격의 회사 또는 제품보다 우선하여 WMO에서 승인하거나 추천한다는 의미가 아니다.

저자의 이름이 적혀 있는 WMO 출판물에 나타난 결과, 해석, 결론은 저자의 단독 소유이며 WMO 또는 WMO 회원국의 해석 및 결론을 반드시 반영하지 않는다.

세계기상기구 사무총장 Celeste Saulo

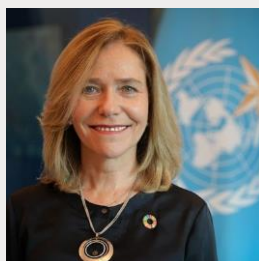
과학은 명확합니다. 온실가스 배출량이 증가하고 있고, 전 세계 기온은 과거 기록을 계속 깨고 있으며, 극한 기상 현상은 우리의 생명과 경제에 큰 피해를 주고 있습니다. 지속 가능한 발전, 기후행동, 재해 위험 감소를 지원하기 위해 시급하고 야심 찬 행동이 필요합니다. 오늘 우리가 내리는 결정은 혼돈의 미래와 사람과 지구를 위한 더 나은 세계로의 돌파구 사이에서의 차이를 의미할 수 있습니다.

자연 및 사회 과학, 기술과 혁신은 이러한 글로벌 목표를 달성하는 데 막대한 잠재력을 가지고 있습니다. 인공지능과 기계학습의 급속한 발전은 날씨 예보를 혁신하고 있습니다. 우주 기반 지구 관측의 혁신은 온실가스의 배출원과 흡수원을 더 잘 모니터링하는 데 도움을 줄 수 있습니다. 디지털 트윈과 가상현실과 같은 기술은 지속 가능한 발전을 달성하고 재난 대비를 강화하기 위한 혁신적인 맥락에서 적용될 수 있습니다.

그러나 과학과 기술만으로는 충분하지 않습니다. 점점 더 복잡해지는 세계에서 우리는 다양한 지식, 경험, 관점을 포용하여 함께 해결책을 공동으로 창조해야 합니다. 유엔 사무총장의 획기적인 '모두를 위한 조기 경보' 이니셔티브는 자연 및 사회 과학, 기술, 다학제 간 접근 방식을 활용하여 생명을 구하고 지속 가능한 발전 성과를 보호하기 위해 우리가 어떻게 협력할 수 있는지를 강조하고 있습니다.

'미래 정상회의'는 우리의 행동을 제고하고, 재구상, 재정비하며, 다양한 지식과 경험을 활용하고, 거버넌스 메커니즘과 기관에 대한 신뢰를 강화할 기회를 제공합니다. 우리가 글로벌 목표를 달성하려면 과학과 기술의 혜택이 모든 사람에게 접근 가능하도록 보장해야 합니다.

날씨, 기후, 물, 그리고 관련 환경 및 사회 과학의 미래가 오늘날과 미래 세대를 위한 더 나은 세상을 실현하는 데 어떻게 기여할 수 있는지를 강조하기 위해 이 보고서를 준비하는 과정에서 참여한 많은 파트너 기관과 전문가들에게 감사를 전합니다



A stylized, handwritten signature in black ink, appearing to be 'C. Saulo'.

Prof. C. Saulo
세계기상기구 사무총장

요약

'미래 정상회의'는 파리 협정, 재난위험경감을 위한 센다이 프레임워크, 그리고 2030 지속가능발전 의제와 같은 글로벌 목표를 집단적으로 달성할 수 있음을 보여줄 수 있는 절호의 기회를 제공한다. 지구 온도가 사상 최고치를 기록하고 있으며, 기후 변화와 위험 기상 현상의 영향이 개발 성과를 상쇄시키면서 모든 사람을 위한 지속 가능한 미래가 위협받고 있다. 그러나 자연 과학과 사회 과학, 기술, 혁신의 힘을 활용하면 글로벌 목표를 다시 달성하고 현재와 미래 세대를 위한 더 나은 세상을 만들 수 있는 전례 없는 기회가 제공될 것이다.

2024년 기후과학합동보고서는 기상, 기후, 수자원 및 관련 환경 및 사회 과학 분야에서 새로운 기술과 혁신적인 접근 방식의 변혁적 영향을 강조한다. 인공지능(AI)에서 첨단 위성 기술, 물리적 세계와 디지털 세계를 연결하는 가상 현실에 이르기까지, 과학적 및 기술적 진보는 기상, 기후, 수자원 및 관련 환경적 응용 프로그램을 강화하고 있으며, 기후 변화와 지속 가능한 발전과 같은 글로벌 문제에 대응하기 위한 전략을 수립하는 데 중요한 역할을 하고 있다. 이 보고서는 또한 다양한 지식, 관점, 경험을 수용하여 과학과 기술을 지역적 맥락에 적용하고, 공동으로 해결책을 개발하고 구현할 수 있도록 하는 학제간 접근의 필요성을 강조한다. 비록 여전히 상당한 격차와 도전 과제가 남아 있지만, 각기 다른 규모의 협력을 강화하는 것은 기상, 기후, 수자원 및 관련 환경 및 사회 과학의 잠재력을 최대한 활용하고 그 혜택을 모두가 누릴 수 있도록 하는 데 필수적이다.

과학은 명확하다 – 우리는 글로벌 기후 목표 달성에서 크게 벗어나 있고, 이는 모든 사람의 지속가능한 미래를 위협하고 있다.

인간이 초래한 기후변화는 대기, 해양, 빙권, 생물권에 광범위하고 급격한 변화를 일으켰고, 많은 극한 기상 및 기후에 영향을 미치고 있다. 전 세계 온실가스(GHG) 배출량은 2021년에서 2022년 사이에 1.2% 증가하여, 이산화탄소(CO₂) 당량으로 환산하면 574억 톤에 도달하였다. 이산화탄소, 메테인(CH₄), 아산화질소(N₂O)의 전 세계 평균 대기 농도도 새로운 최고치를 기록했다. 2023년은 기존 기록치와 큰 차이를 보이며 가장 더운 해로 기록되었고, 해양 열 함량도 사상 최고치를 기록했다. 반면, 북극과 남극의 해빙 면적은 최저치를 기록했다. 2024년 상반기에는 전세계가 이례적으로 높은 기온과 여러 극한 기상 현상을 목격하였다. 아시아 대륙의 대규모 폭염, 남아프리카의 가뭄, 남부 브라질의 기록적인 홍수, 그리고 카리브해에서 발생한 전례 없는 5등급 허리케인 베릴(Beryl)까지 극단적인 기상 현상이 이어졌다. 극한 기상 및 기후 현상의 빈도 증가와 사회 전반에 걸친 그들의 파괴적인

영향은 긴급하고 야심찬 기후 행동의 필요성을 강조한다. 앞으로 다가올 5년 내에 2023년보다 더 따뜻한 해가 나올 확률은 86%이며, 지구 평균 지표 온도가 최소 한 해 동안 산업화 이전 수준보다 1.5°C를 초과할 확률은 80%이다. 글로벌 온실가스 배출량을 줄이기 위한 노력에 어느 정도 진전은 있었으나, 여전히 배출 격차는 크다. 현재의 정책이 계속된다면, 금세기 내에 3°C까지 지구 온난화가 유지될 확률은 66%이다. 2°C와 1.5°C 이하로 제한하려면 2030년까지 현재 정책이 예상하는 배출량 대비 온실가스 배출을 각각 28% 및 42% 줄여야 한다. 또한, 기후 위기의 복잡하고 가속화되는 성질에 따라 다양한 지식과 포괄적인 참여에 기반한 견고한 적응이 필요하다는 것을 강조한다. 결과적으로, 야심찬 적응 행동이 생태계와 사회 전반에 걸쳐 기후 변화의 부정적인 영향을 줄이고, 손실과 피해를 최소화하며, 지속 가능한 발전 목표를 보호하는 데 기여할 수 있다.

기상, 기후, 수자원 및 관련 환경 및 사회 과학의 발전은 지구 시스템에 대한 이해를 증진시키고, 모두를 위한 지속 가능한 미래를 향한 진전을 가속화하는 데 중요한 역할을 할 수 있다.

인공지능(AI)과 기계학습(ML)은 기상 예보에서 혁신적인 기술로 떠오르며, 기후 변화 적응, 재해 위험 감소 및 지속 가능한 발전을 위한 도구로 변화될 수 있다. 인공지능과 기계학습은 성능 좋은 기상 모델링을 더 빠르고 저렴하게 만들며, 전산 용량이 제한된 저소득 국가도 더욱 쉽게 접근 가능하게 한다. 또한, 혁신적인 위성 기반 지구 관측을 통해 기상, 기후, 수자원 및 관련 환경 분야 적용에 새로운 프론티어 기회를 열어 줄 수 있다. 공공-민간 파트너십과 국제 협력을 통해, 우주 기반 지구 관측의 혁신은 기상 예측을 개선하고 기후 시스템에 대한 이해를 심화하며 환경 모니터링을 더욱 견고하게 할 수 있다.

또한, 실감형 기술은 물과 토지 자원에 대한 복합적인 사회경제 및 기후 변화 영향을 해결하기 위한 혁신적인 솔루션을 제공하고 있다. 예를 들어, 디지털 트윈, 가상 현실, 메타버스와 같은 기술은 물리적 세계와 디지털 세계를 연결하는 실감형, 상호작용형, 데이터 기반의 솔루션을 제공함으로써 토지 및 물 관리 방식을 혁신할 수 있다. 이러한 기술이 지속 가능한 기금 메커니즘과 효과적인 거버넌스 체계로 지원될 때, 의사결정 과정을 개선하고 다양한 주체들의 참여를 촉진할 수 있다.

Box 1. 국제 협력과 견고한 거버넌스를 통한 데이터 활용 촉진

기후와 날씨의 국경이 없기 때문에 글로벌 데이터 격차를 해소하고 적시의 의사 결정을 지원하기 위해 기상 데이터 교환을 촉진하는 국제 협력이 필수적이다. 과학기술의 발전은 데이터 양의 급격한 증가와 사회 전반에 걸쳐 필수 서비스를 지원하기 위한 데이터 수요의 폭발적인 증가를 가져오고 있다. 비록 데이터를 활용해 사회에 걸친 혜택을 제공할 수 있는 잠재력이 크지만, 데이터 격차가 커질 경우 혜택의 불평등한 분배와 데이터 오용 및 오해가 발생할 수 있다.

국제 협력의 한 예로, 체계적관측기금기구(Systematic Observations Financing Facility, SOFF)는 기본적인 지표 기반의 기상 및 기후 관측의 지속적인 수집과 국제적 교환을 가속화하기 위해 재정적 지원을 제공하며, 특히 최빈국과 소규모 도서 개발국을 대상으로 한 글로벌기초관측네트워크(Global Basic Observing Network, GBON) 실행을 지원한다. 또한, WMO 통합 데이터 정책은 자유롭고 제한 없는 데이터 교환을 기본 원칙으로 하는 견고한 데이터 거버넌스의 필요성을 인식하고 있다. 이 정책은 WMO 회원국 간의 데이터 교환에 대한 지침으로 지구 시스템 구성 요소의 모니터링과 예측을 강화 및 유지하며, AI/ML을 활용한 기상 및 기후 예측의 대규모 발전을 위한 필수적인 틀을 제공한다. 이러한 이니셔티브들은 기상, 기후, 물 및 관련 환경 데이터와 서비스의 제공을 개선하여 지속 가능 발전 목표 (SDGs) 달성에 기여하고, 데이터 상호운용성과 접근성을 향상시켜 글로벌 디지털 컴팩트의 목표 달성에도 기여할 수 있다.

그러나 기후 변화와 지속 가능 발전과 같은 글로벌 도전 과제는 과학과 기술만으로 해결할 수 없으며, 해결책을 공동으로 창출하고 실행하기 위한 학제 간 접근이 필요하다.

기후 변화, 재해 위험 감소, 지속 가능 발전과 같은 복잡한 글로벌 도전을 해결하려면 다양한 관점, 지식, 경험이 어떻게 해결책을 공동으로 창출하고 실행할 수 있도록 도울 수 있는지에 대해 더 깊이 재고하는 것이 필요하다. 학제 간 접근법은 과학자, 정책 입안자, 실무자, 시민 사회(지역 및 토착민 공동체 포함)와 같은 다양한 행위자들을 통합하고, 자연 및 사회 과학을 지역 맥락에 적용하는 데 점점 더 많이 사용되고 있다. 이러한 접근법은 기상, 기후, 수자원 및 관련 환경 및 사회 과학이 제공하는 관점의 영향을 증대시키고, 국가 기상 및 수문학 서비스(NMHS)를 포함한 다양한 행위자와 기관에 대한 신뢰를 강화할 수 있다. 또한 다양한 행위자 참여와 정치적 기여, 기후 행동을 위한 글로벌 노력의 확대는 지속 가능한 발전과 재해 위험 감소를 가속화하여 점점 어려워지고 있는 글로벌 도전에 직면하여 더욱 강력하고 회복력 있는 공동체를 만드는 데 기여할 수 있다.

'모두를 위한 조기 경보(EW4All)' 이니셔티브는 자연 및 사회 과학, 기술 발전, 학제 간 접근 방식을 통합하여 자연재해로부터 생명, 생계 및 환경을 보호할 수 있음을 보여준다.

EW4All 이니셔티브는 2027년 말까지 전 세계 모든 사람들이 위험 기상, 수자원 또는 기후 현상으로부터 보호받을 수 있도록 생명을 구하는 조기 경보 시스템을 구축하는 혁신적인 노력이다. 자연 및 사회 과학, 기술 발전 및 학제 간 접근 방식, 그리고 견고한 파트너십과 적절한 자원, 역량 강화는 다중 재해 조기 경보 시스템(MHEWS)의 효과적인 기반이 된다. AI, 우주 기반 지구 관측, 실감형 기술의 발전은 기상 예보를 개선하고, 복잡한 정보를 의사 결정 과정에서 상황에 맞게 전달하며, 다양한 재해 시나리오와 잠재적 영향을 시각화하는 상호작용적인 교육 시뮬레이션을 통해 예상 행동을 지원하는 중요한 이니셔티브에 기여할 수 있다. 또한 시민 과학과 같은 참여적 방법을 포함한 학제 간 접근 방식은 지역 맥락에 맞는 지식과 솔루션을 공동 개발함으로써 NMHS의 효율성을 높인다.

다양한 규모에서의 협력은 격차와 도전 과제를 해결하고, 기상, 기후, 수자원 및 관련 환경 및 사회 과학의 잠재력을 최대한 활용하여 그 혜택이 모든 사람에게 접근 가능하도록 하는데 필수적이다.

기상, 기후, 수자원 및 관련 환경 및 사회 과학의 발전은 파리협정, 2030 아젠다, 재해 위험 경감을 위한 센다이 프레임워크, '모두를 위한 조기 경보(EW4All)'와 같은 글로벌 목표의 완전한 달성을 지원할 수 있는 막대한 잠재력을 가지고 있다. 그러나 데이터 격차, 제한된 재정 자원, 신기술을 활용할 수 있는 역량 부족, 그리고 거버넌스 문제는 이러한 발전의 잠재력이 온전히 실현되지 못하게 하고, 디지털 격차를 더욱 악화시킬 위험이 있다. 앞으로 나아가기 위해서 정부, 민간 부문, 국제 기구, 시민 사회, 학계, 청년 및 지역 사회 간의 글로벌 파트너십이 이러한 도전 과제를 해결하고, 자연 및 사회 과학, 기술 및 혁신의 혜택이 모든 사람에게 제공되도록 보장하는 데 필수적일 것이다.

Box 2. 청년과 초기 경력 연구자 포용하기

청년과 초기 경력 연구자(ECRs)는 현재와 미래 세대에 속하며, 따라서 과학적 노력, 정책 결정 및 기후 행동에 그들을 참여시키는 것이 중요하다. 변화의 주체로서 청년들은 종종 신선한 관점, 혁신적인 접근 방식을 제시하며, 복잡한 글로벌 문제를 이해하고 해결하는 데 있어 기존의 상태에 도전하여 돌파구를 마련한다. 그들은 새로운 기술과 디지털 도구에 대한 적응력이 뛰어나 급변하는 사회에서 다양한 지식을 확산하고 적용하는 데 기여한다. 또한, 청년들의 참여는 과학적 탐구와 문제 해결의 지속성을 보장하며, 장기적인 영향력을 발휘하기 위해 과학 및 사회적 문제에 대한 책임감과 주인의식을 함양한다. 2024년 기후과학합동보고서 개발에 13명의 초기 경력 연구자가 적극적으로 참여하였으며, 그들의 관점과 혁신적인 아이디어가 보고서 전반에 걸쳐 반영되었다. 초기 경력 연구자의 참여는 청년들이 지속 가능한 미래와 회복력 있는 사회를 형성하는 데 중요한 역할을 한다는 WMO와 이 보고서에 참여한 파트너 기관들의 헌신을 보여주는 사례이다.



A man in a plaid shirt is standing outdoors, pointing upwards at a light fixture on a utility pole. The background shows a white fence and green foliage.

제언

- **데이터의 품질, 가용성, 접근성 및 상호 운용성 향상**
지구 관측 자료 등 신뢰할 수 있고 투명하며 쉽게 접근할 수 있는 데이터는 과학기술적 변혁의 핵심이며, 전 세계의 기술 격차를 해소할 수 있다. 국제 협력은 데이터 격차를 해소하고 데이터의 가용성과 품질을 향상시키는 데 기여할 수 있으며, 강력한 거버넌스 메커니즘은 데이터의 자유롭고 제한 없는 교환을 가능하게 하여 데이터 접근성을 높일 수 있다(Box 1). 또한, 다양한 공공 및 민간 출처의 데이터 통합이 원활하게 이루어지면 데이터 상호 운용성이 향상되어 다양한 참여자가 실시간 통찰력을 활용하여 글로벌 목표를 달성하는 데 크게 기여할 수 있다.
- **신기술 및 과학에 대한 투자 및 접근성 촉진**
과학기술의 발전은 환경 모니터링을 혁신하고 의사 결정에 정보를 제공하고 효과적인 기후 변화 완화 및 적응을 지원할 수 있는 엄청난 잠재력을 가지고 있다. 그러나 이러한 기술과 관련된 중요한 과학적 질문을 다루고 잠재적 위험과 기회를 더 잘 이해하기 위해서는 추가적인 연구와 분석이 필요하다. 혁신적인 금융 모델, 공공-민간 파트너십 및 모든 수준에서의 강력한 거버넌스는 연구, 혁신 및 초학제적 접근 방식을 확대하고 가속화하는 데 도움이 되는 환경을 조성하고 그 혜택이 모두에게 접근 가능하도록 보장할 수 있다.
- **특히 개발도상국의 교육, 트레이닝, 역량 개발 확대**
교육, 트레이닝, 역량개발은 과학과 기술, 혁신이 제시하는 기회를 포착하여 다음 세대가 미래 도전과제를 해결할 수 있도록 준비시키는 데 필수적인 역할을 한다(Box 2). 특히 기상, 기후, 물, 관련 환경 및 사회 과학이 제시하는 관점의 영향을 촉진시키기 위해 다양한 지식과 해결책을 수용할 수 있는 초학제적 접근에 대한 교육과 트레이닝을 장려해야 한다. 또한, 기술 이전을 가속화하는 것은 디지털 격차를 해소하고 기후행동을 촉진하며 모든 수준에서 지속가능한 발전을 지원할 수 있다.

CHAPTER 1

기후과학 현황 : 긴급하고 야심찬 기후 행동의 필요성

과학은 명확하다 - 증가하는 온실가스 배출량과 대기 중 농도가 주요 기후 지표의 변화를 초래하고 극한 사건에 영향을 미치며, 이는 전 세계적으로 파괴적인 영향을 초래하고 있다. 이러한 상황은 지속가능한 미래를 달성하기 위한 긴급하고 야심찬 행동의 필요성을 강조한다.

Authors: Melissa Seabrook (Met Office, UK), Leon Hermanson (Met Office, UK), Adam Scaife (Met Office, UK; University of Exeter, UK), Doug Smith (Met Office, UK), Anne Olhoff (UNEP Copenhagen Climate Centre), John Christensen (UNEP Copenhagen Climate Centre), Maarten Kappelle (UNEP), Jian Liu (UNEP), Joeri Rogelj (Imperial College London, UK; International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Austria), Omar Baddour (WMO), Claire Ransom (WMO), Yohanna Villalobos (GCP), Yolandi Ernst (GCP), Yuhui Wang (GCP), Ana Bastos (GCP), Ben Poulter (GCP), Robert B. Jackson (GCP), Pep Canadell (GCP), John Kennedy (WMO), Frederic Chevallier (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), France), Andrew Crotwell (NOAA Global Monitoring Laboratory and Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences, University of Colorado Boulder, USA), Christoph Gerbig (Max Planck Institute for Biogeochemistry, Germany), Armin Jordan (Max Planck Institute for Biogeochemistry, Germany), Xin Lan (NOAA Global Monitoring Laboratory, USA), Zoë Loh (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia), Ingrid Lujckx (Wageningen University and Research, Netherlands), John Miller (NOAA Global Monitoring Laboratory, USA), Yousuke Sawa (Japan Meteorological Agency, WDCGG, Japan), Oksana Tarasova (WMO), Alex Vermeulen (ICOS ERIC/Lund University, Sweden), Ray Weiss (Scripps Institution of Oceanography, University of California San Diego, USA), Thorsten Warneke (University Bremen, Germany), Camille Yver (LSCE, France)

Photo: Freepik

주요 메시지

- 전 세계 총 온실가스(GHG) 배출량은 2021년에서 2022년 사이에서 1.2% 증가하여 574억 톤의 이산화탄소에 해당하는 기록을 세움
- 2023년은 기록적으로 가장 더운 해였으며, 2024년 상반기 동안 세계는 예외적으로 높은 전지구 기온과 많은 극한 기상 사건으로 사회에 파괴적인 영향을 미침
- 현재의 완화 정책이 지속된다면, 전 세계 온난화가 세기 전반에 걸쳐 최대 3°C로 유지될 확률은 66%로 추정됨

온실가스(GHG) 배출량 및 농도

2011년에서 2020년 사이의 10년 동안, 온실가스(GHG) 배출과 관련된 인류의 활동은 명백하게 지구 온난화를 초래하였으며, 전지구 지표 온도는 1850-1900년 대비 1.1 °C에 도달하였다(IPCC, 2023). 2021년에서 2022년 사이에 온실가스 배출량은 1.2% 증가하여 574억 톤의 이산화탄소에 해당하는 양(GtCO₂e)으로 기록적인 수치에 도달했다. 지구온난화에 대한 잠재력이 더 높으며 현재 온실가스 배출의 1/4를 차지하고 있는 메테인(CH₄), 아산화질소(N₂O), 플루오린 가스(fluorinated gas)의 배출량도 빠르게 증가하고 있다. 플루오린 가스의 배출량은 2022년에 5.5% 증가하였고, CH₄는 1.8%, N₂O는 0.9% 증가하였다(UNEP, 2023a).

배출량이 증가함에 따라 온실가스의 대기 농도도 상승하고 있다. WMO의 Global Atmosphere Watch의 현장 관측 네트워크에서의 관측 분석에 따르면, CO₂, CH₄ 및 N₂O의 전 세계 평균 표면 농도가 2022년에 새로운 최고치를 기록했으며, CO₂는 417.9 ± 0.2 ppm, CH₄는 1,923 ± 2 ppb, N₂O는 335.8 ± 0.1 ppb에 도달했다(*WMO Greenhouse Gas Bulletin (GHG Bulletin), No. 19*). 이 값들은 각각 산업화 이전(1750년 이전) 수준의 150%, 264%, 124%에 해당한다. 2021년에서 2022년 사이의 CO₂ 증가는 2020년에서 2021년 사이의 증가보다 약간 낮았고, 지난 10년간의 평균 연간 성장률보다도 약간 낮았다. 이는 자연 변동성에 부분적으로 기인했을 가능성이 있으며, CO₂ 배출량은 계속해서 증가하고 있다.

메테인(CH₄)의 경우, 2021년에서 2022년 사이의 증가는 2020년에서 2021년 사이의 증가보다 약간 낮았지만, 지난 10년간의 평균 연간 성장률보다는 상당히 높았다. 아산화질소(N₂O)의 경우, 2021년에서 2022년 사이의 증가는 현대 기록상에서 이전에 관측된 어떤 때보다도 높았다. 그러나 온실가스(GHG)의 대기 농도는 인위적인 배출 뿐만 아니라 기후 변동성과 변화에 매우 민감한 CO₂를 흡수하는 생태계와 같은 자연적인 배출원과 흡수원에 의해 좌우된다.

현재 및 과거 온실가스 배출량은 지역, 국가 및 국가 그룹에 따라 상당히 다르며, 이는 전세계 불평등의 패턴과 기후 행동에서의 다양한 진행 상황을 반영한다. 예를 들어, 전 세계적으로 상위 10%의 소득을 가진 인구가 배출량의 거의 절반(48%)을 차지하며, 이 그룹의 3분의 2는 선진국에 거주하고 있는 반면, 하위 50%의 세계 인구는 전체 배출량의 12%만을 기여했다. 또한, 과거 누적 화석연료 이용 및 토지 이용, 토지 이용 변화 및 임업에 의한 CO₂ 배출의 거의 80%가 G20 국가에서 발생하였으며, 가장 큰 기여자는 중국, 미국 및 유럽연합(EU)이다. 반면, 최빈국의 기여는 단지 4%만에 그쳤다(UNEP, 2023a). 국가 및 지역 간 온실가스 배출의 불평등이 계속해서 증가함에 따라, Box 1에서 강조하는 것처럼, 이러한 배출량에 대한 과학적 보고가 효과적인 탈탄소화 경로를 지원하고 완화 목표를 추적하는 데 점점 더 중요해지고 있다.



Photo: Freepik

1. 이산화탄소 및 기타 온실가스와 같은 대기 화학물질 양에 대한 정확한 과학 용어는 건조 공기의 물분율로, 건조한 공기 중 각 기체의 물 수치로서 표현되고, 보통 ppm²이나 ppb³로 표현된다
2. ppm - 백만 분율. 건조 공기 백만개 분자 중 기체 물 수
3. ppb - 십억 분율. 건조 공기 십억개 분자 중 기체 물 수

Box 1. 지역 및 국가 온실가스 예산 분석

전세계 탄소 프로젝트(Global Carbon Project)의 REgional Carbon Cycle Assessment and Processes (RECCAP2)는 더 높은 공간 해상도와 지역별로 관련있는 배출원과 흡수원을 고려하여 CO₂, CH₄, N₂O 예산을 분석한다. 또한, 각 과정에 대한 세부적인 기여도를 분석함으로써 대기 중 농도 변화에 대한 인간과 자연의 영향을 더욱 정밀하게 추적한다(Canadell et al., 2022; Friedlingstein et al., 2023; Saunio et al., 2024; Tian et al., 2024). 예를 들어, 호주에서는 화석 연료가 인간 활동에서 발생하는 CO₂ 배출의 가장 큰 원인으로, 연평균(2010-2019년) 4억 3백만 톤의 CO₂를 배출하고 있다(그림 1).

자연 산불 및 인위적 화재(인간이 유발한 화재)로 인한 CO₂ 배출은 평균적으로 연간 5.68억 톤에 달한다. 그러나 화석연료 배출과는 다르게 화재에서 발생하는 배출은 식생 재생장에 의해 대부분 상쇄되어 대기 중 평균 CO₂의 순 축적량은 연간 3천6백만 톤이다(Villalobos et al., 2023). 자연 CO₂ 흡수원을 고려할 때, 호주의 순탄소 균형은 2010-2019년 동안 대기 중에 연간 1.4억톤의 CO₂를 배출한 것이다. 놀랍게도 분석 결과 호주는 어떤 해에는 대규모 순 CO₂ 배출원이 되었다가 다음 해에는 대규모 CO₂ 흡수원이 될 수도 있어, 장기적인 추세를 감지하고 자연 탄소 흡수원이 증가하는지 감소하는지를 이해하기 어렵게 만든다.

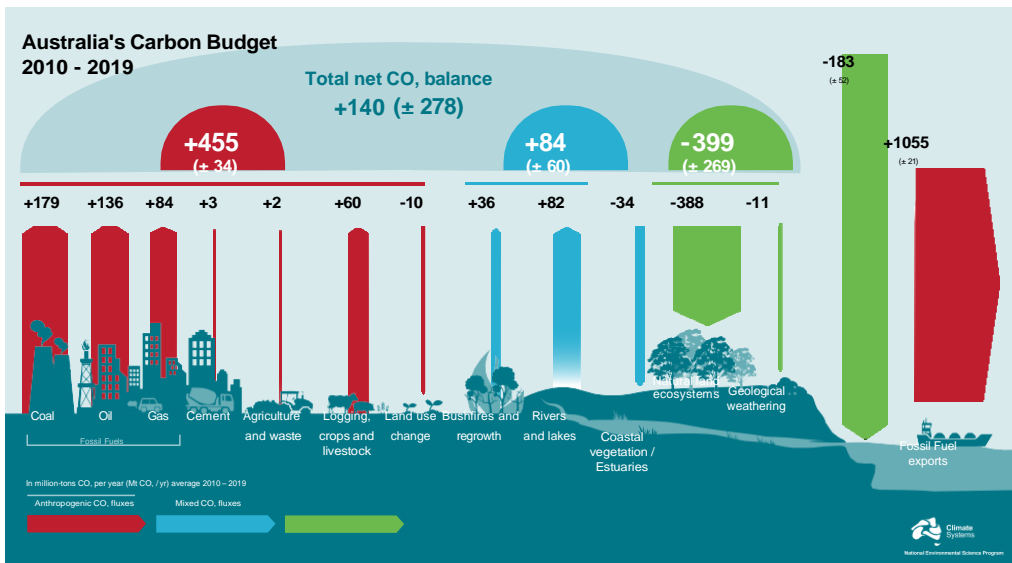


그림 1. 2010-2019년까지 호주의 연평균 인위적 및 자연적 배출원 및 흡수원을 포함한 탄소 예산(연간 백만 톤)
출처: 국가환경과학프로그램 - 기후시스템 허브

지역 차원에서 아프리카 대륙은 인위적 및 자연적 온실가스 배출원과 흡수원의 복잡한 시스템을 포함하고 있다(Ernst et al., 2024). 토지 이용 변화로 발생하는 배출량은 연평균 이산화탄소 17억 톤에 해당하는 양에 달하며(2010-2019년), 이는 화석 연료에서 발생하는 배출량인 17.4억 톤의 이산화탄소와 비슷한 규모이다.

특히, 육상 생태계는 평균 8억 톤의 탄소를 지원하는 대규모 이산화탄소 흡수원을 제공하며, 이는 전 세계 육상 이산화탄소 흡수원의 20%를 차지한다. 그러나 토지 이용 변화와 화석 연료에서 발생하는 인위적 배출량이 계속 증가함에 따라 대륙은 대기 중의 순탄소 배출원이 되고 있다(그림 2).

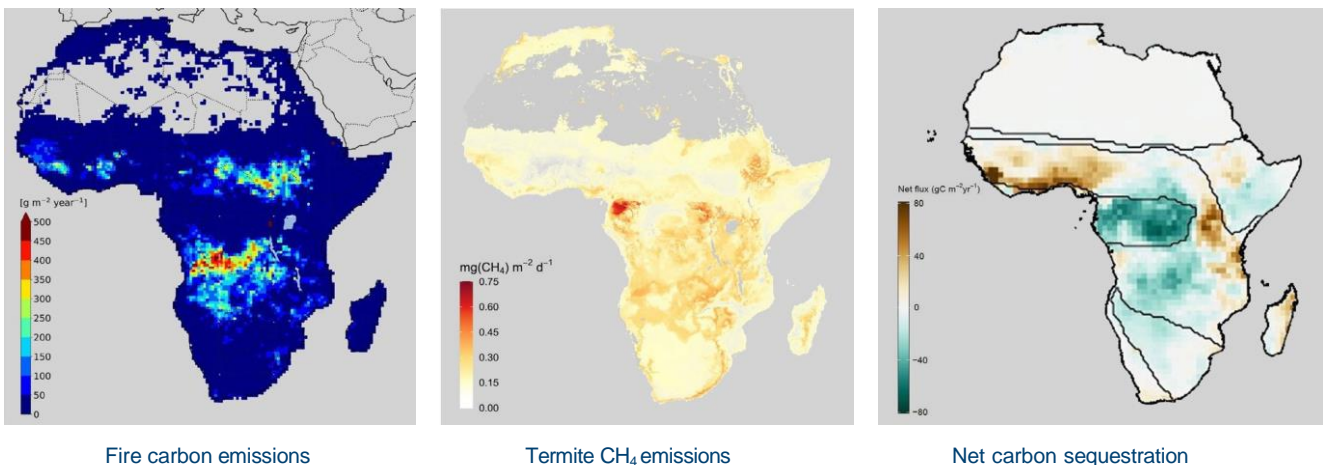


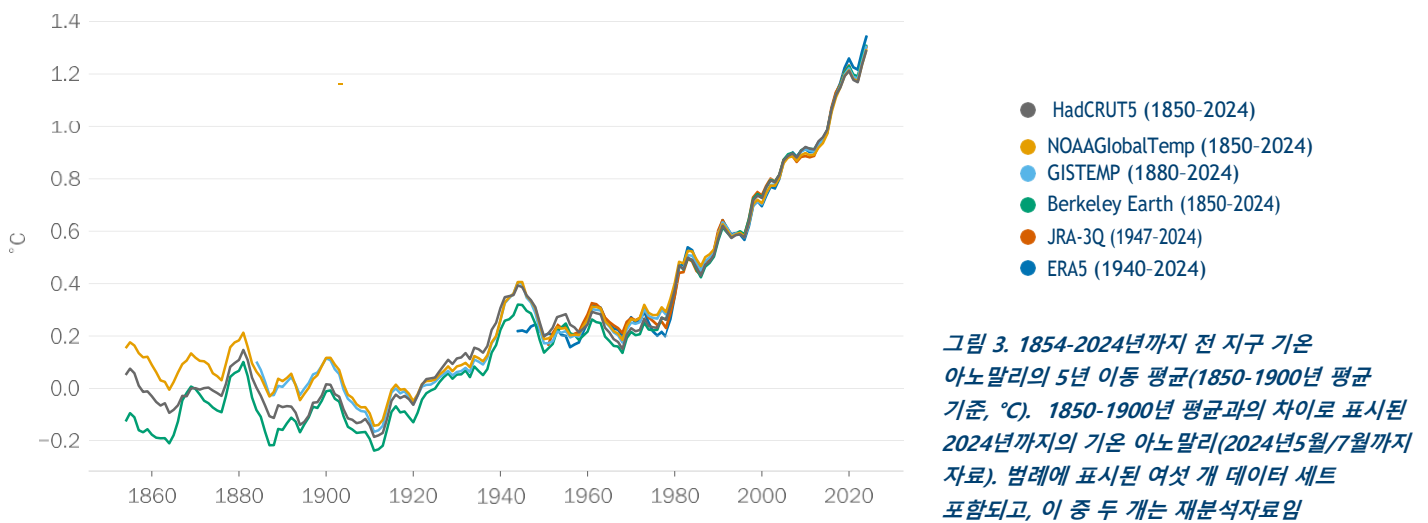
그림 2. 2010-2019년 아프리카의 온실가스 예산 구성 요소: 화재로 인한 이산화탄소 배출, 흰개미 메테인 배출, 생물권 순 탄소 흡수량
출처: Ernst et al., 2024

전 세계 기후 지표

인간이 초래한 기후 변화는 대기, 해양, 빙권 및 생물권에서 광범위하고 급속한 변화를 초래하여 많은 극한 기상 및 기후 현상에 영향을 미치고 있다(IPCC, 2023). WMO의 전지구 기후 현황 보고서는 전 세계 기후 지표의 상태에 대한 요약を提供하고(Trewin et al., 2021), 여기에는 글로벌 온도, 해양 열 및 빙권 지표 등이 포함된다.

전지구 기온

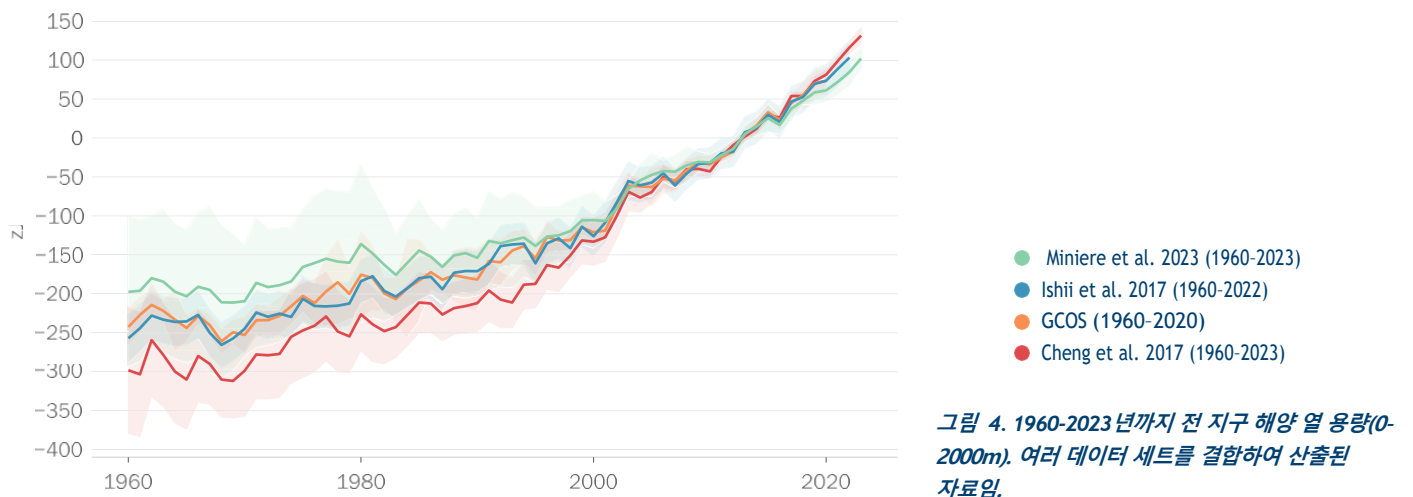
2015년부터 2023년까지는 기록상 가장 더운 9년였으며, 2015년부터 2024년까지는 가장 더운 10년이 될 가능성이 높다.



해양 열 용량

지구 시스템에서 대기 중 온실가스 농도의 증가로 인해 축적되는 초과 에너지의 약 90%가 해양에 흡수된다. 이 추가 에너지는 해양을 따뜻하게 하고, 그로 인해 물의 열 팽창이 발생하여 해수면 상승을 초래한다. 그림 4는 1960년부터 2023년까지 0~2000m의 해양에서 축적된 열을

측정한 전 세계 해양 열 함량을 보여준다. 해양의 상위 2000m는 2023년에도 계속 따뜻해져 기록상 가장 높은 열 함량에 도달했다. 이러한 변화는 수세기에서 수천 년에 걸쳐 불가역적일 것으로 예상된다(Cheng et al., 2017; IPCC, 2019).



빙권

인간의 영향은 1979-1988년과 2010-2019년 사이 북극 해빙 면적 감소의 주요 원인으로 매우 높게 평가된다(IPCC, 2023). 현재 북극의 해빙 면적(연간 및 여름 말)은 최소 1850년 이후 가장 낮은 수준에 있으며, 2050년 이전에 여름 최소 시점에서 사실상 얼음이 없는 조건에 도달할 가능성이 크다. 2019-2023년 기간 동안 9월 북극 해빙 면적은 1991-2020년 평균보다 평균적으로 약 100만km² 낮았다(그림 5). 남극에서는 1979년부터 2020년까지 지역적으로 상반되는 변화와 큰 내부 변동성 때문에 해빙 면적에 대한 유의미한 추세가 없었다(IPCC, 2021). 위성 시대의 시작부터 그 최대치에 이른 2014년까지 남극 해빙 면적은 천천히 증가했지만, 2015년과

2017년 사이에 급격히 감소하였고 2023년 2월에는 기록상 가장 낮은 연간 최소치를 기록했다. 2023년 9월의 연간 최대 해빙 면적은 기록상 가장 낮은 수준으로, 이는 남부 대양의 온난화와 관련이 있을 가능성이 높다(Purich and Doddridge, 2023). 해빙 면적 외에도, 2022/2023년 빙하학 연도에 대한 53개의 기준 빙하에 대한 초기 데이터는 평균 전 세계 질량 균형이 -1.2m 물 등가(m w.e.)임을 나타내며, 이는 기록상 가장 큰 얼음 손실로 보인다(WGMS, 2023). 빙하 손실은 특히 북미와 유럽에서 극단적으로 나타났으며, 스위스의 빙하는 지난 2년 동안 남은 얼음의 10%를 잃었다.

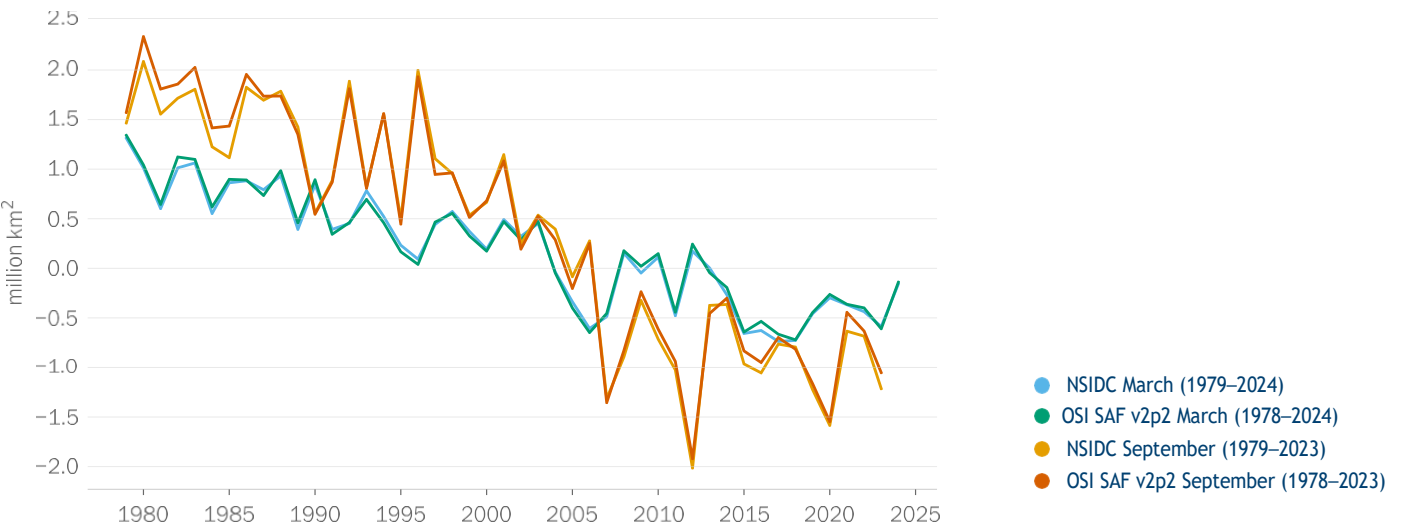


그림 5. 1979-2024년 3월까지 북극의 최대 해빙 면적(3월)과 최소 해빙 면적(9월)의 1991-2020년 평균 대비 차이. 출처: 미국국립적설및얼음 자료센터(NSIDC) 및 유럽기상위성활용기구(EUMETSAT) 해양 및 해빙 위성 응용 시설(OSI SAF)

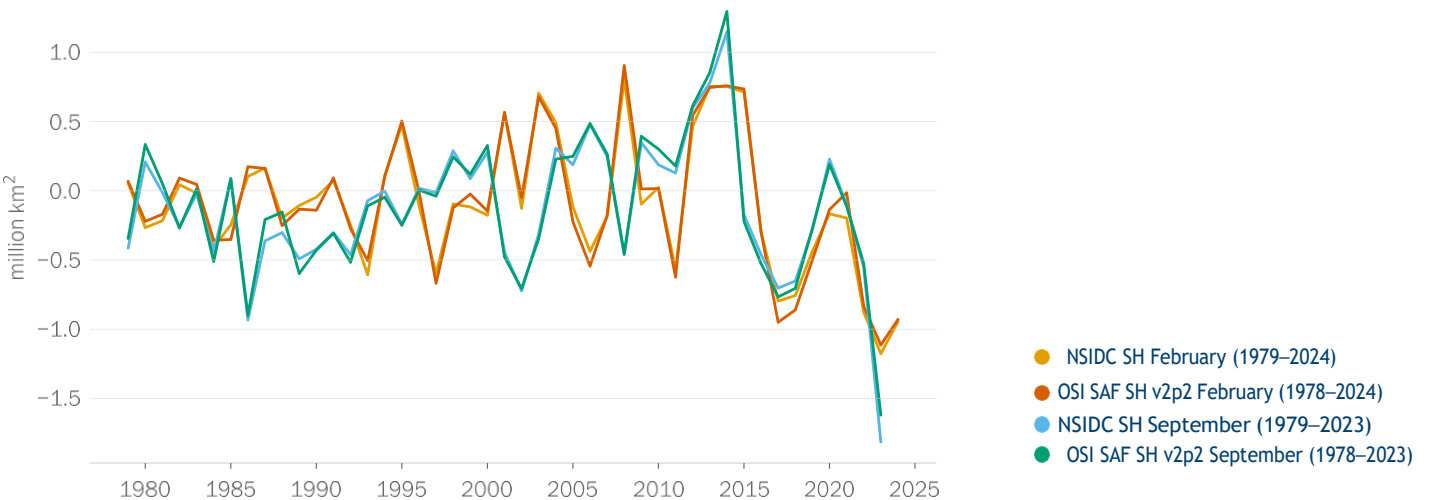
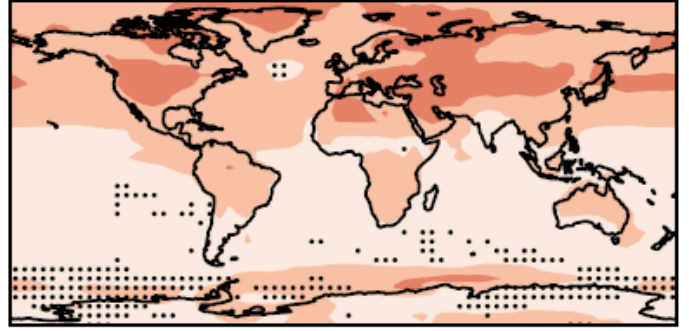


그림 6. 1979-2024년 2월까지 남극의 최대 해빙 면적(9월)과 최소 해빙 면적(2월)의 1991-2020년 평균 대비 차이. 출처: NSIDC, EUMETSAT OSI SAF

2024년 극한 현상

2024년이 절반을 지나면서, 세계는 이미 폭염, 홍수, 열대 사이클론 등 수많은 극단적 기상 사건을 목격했으며, 이로 인해 사회에 심각한 영향을 미쳤다. 2024년 4월과 5월, 아시아의 넓은 지역은 폭염에 시달렸고, 2024년 4월 30일 인도에서는 47.2°C의 최고 기온이 기록되었다. 이로 인해 학교가 폐쇄되었고, 난민 캠프와 비공식 주택에 거주하는 사람들, 그리고 야외 근로자들은 특히 힘든 상황에 처하게 되었다(WMO, 2024a). 브라질의 리우 그란데 두 술(Rio Grande do Sul) 주에서는 기록상 가장 심각한 홍수가 발생했다. 420mm 이상의 강우량이 주의 90% 이상에 영향을 미쳤고, 이로 인해 386,000명이 이재민이 되었다(OCHA, 2024). 수백만 명이 전기와 물 없이 남겨졌으며, 비공식 정착촌과 원주민 마을이 특히 불균형적인 영향을 받았다. 세계 기후 변화를 기록한 연구인 World Weather Attribution의 신속한 연구는 이 홍수가 자연적으로 발생하는 엘니뇨 현상과 인간에 의한 기후 변화의 강한 영향을 받았으며, 이는 사건의 강도 가능성을 증가시켰다는 것을 발견했다(Clarke et al., 2024). 아프리카에서는 World Weather Attribution이 엘니뇨가 2024년 초 취약한 남부 아프리카 국가들에서의 가뭄의 주요 원인이라는 것을 발견했다. 짐바브웨, 잠비아, 말라위, 앙골라, 모잠비크, 보츠와나는 2월에 예상되는 일반적인 강우량의 20% 미만을 기록하며 지역 사회에 파괴적인 영향을 미쳤다(Kimutai, 2024). 카리브해에서는 대서양 허리케인 시즌이 전례 없는 조기 시즌 5등급 허리케인 베릴로 시작되었다. 이 허리케인은 급속히 강화되어 기록상 가장 강력한 6월 허리케인이 되었고, 남부 원위도 제도에 재앙적인 바람과 폭풍 해일을 가져오며, 이후 허리케인 시즌이 평소보다 더 활발할 것으로 예상되는 불길한 예고를 남겼다(Thiem, 2024).

MJJAS 2024-2028



NDJFM 2024/2025-2028/2029

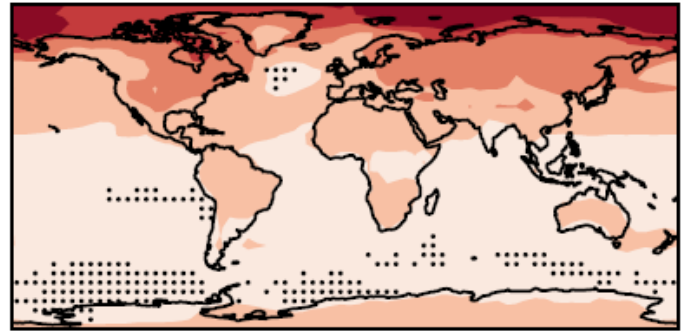


그림 7. 5년간의 기온 예측. 1991-2020년 대비 2024-2028년 5월부터 9월(왼쪽)의 5개 연장 계절 및 2024/2025-2028/2029년 11월부터 3월(오른쪽)의 지표면 근처 기온 편차의 양상별 평균 예측. 모델 1/3 이상이 아노말리 사인과 불일치하는 영역은 점선으로 표시. 출처 :WMO, 2024c

앞으로의 전망: 2024-2028년 기후 예측

2023년은 여러 요인, 특히 온실가스(GHG) 배출의 지속적인 증가와 엘니뇨 현상으로 인해 기록적으로 가장 따뜻한 해가 되었다(WMO, 2024b). WMO 연간-수십년 기후예측 선도센터에 따르면, 전 세계 온도가 상승하는 추세는 계속될 것으로 예상되며, 향후 5년 중 최소한 한 해가 현재 가장 따뜻한 해인 2023년을 초과할 확률은 86%에 달한다. 또한, 향후 5년(2024-2028)의 평균 기온이 이전 5년(2019-2023)보다 높을 가능성도 매우 높다(90% 확률). 이 5년 기간 동안의 연평균 지표 온도는 산업화 이전 수준(1850년부터 1900년까지의 평균)보다 1.1°C에서 1.9°C 더 높을 것으로 예측된다

추가로, 향후 5년 중 적어도 한 해의 지구 평균 표면 온도가 산업화 이전 수준보다 1.5°C를 초과할 가능성이 80%에 달하며, 이 확률은 시간이 지남에 따라 증가하고 있다. 5년 평균이 이 임계값을 초과할 가능성은 약 47%로, 절반 정도이다.

파리 협정의 1.5°C 임계값은 20년 동안 평균된 장기 온난화를 지칭하므로, 단일 월, 계절 및 연도의 일시적인 초과는 장기 글로벌 온도가 이 수준에 접근함에 따라 점차 빈번하게 발생할 것으로 예상된다(WMO, 2024c).

그림 7에서는 2024년부터 2028년까지 연장된 계절 두개(5월-9월 및 11월-3월)의 예상 온도 패턴을 1991-2020 평균에 대비하여 제시하고 있다. 두 계절 모두에 있어 온도는 전 지역에서 평균보다 높을 가능성이 크며, 특히 육지에서 온난화가 강화될 것으로 보인다. 11월부터 3월까지의 기간 동안 북반구에서 온난화가 더욱 증가할 것으로 예상되며, 북극(북위 60° 이상)의 지표 근처 온도는 전 세계 평균 온난화의 3배일 것으로 예측된다(WMO, 2024c).

기후 행동을 위한 과학

파리 협정이 채택될 당시, 온실가스(GHG) 배출량은 2015년 대비 2030년까지 16% 증가할 것으로 예상되었다. 현재 그 예상 증가율은 3%로, 전 세계가 GHG 배출량을 줄이기 위한 진전을 보였다. 파리 협정 하에, 각국은 매 5년마다 국가적으로 정해진 기여(NDC)를 제출하여 지구 온난화를 2°C 이하로 제한하기 위한 노력을 보고하고 있다. 2023년 말까지 149개의 NDC가 업데이트되었으며(유럽연합과 27개 회원국을 하나의 당사자로 간주), 이들이 완전히 이행될 경우 2030년까지 전 세계 GHG 배출량이 약 5.0 GtCO₂e(범위: 1.8–8.2 GtCO₂e) 줄어들 것으로 예상된다(UNEP, 2023a).

그러나 2030년의 배출량 차이는 여전히 높다. 현재의 무조건적⁴ NDC는 66%의 확률로 지구 온도를 2°C 이하로 유지하기 위해 14 GtCO₂e의 차이를 의미하며, 1.5°C 이하로 유지하기 위해서는 22 GtCO₂e의 차이가 필요하다. 조건부 NDC의 추가 이행은 이 추정치를 3 GtCO₂e 만큼 줄인다(그림 8). 무조건적 및 조건부 NDC의 완전한 이행은 각각 현재 정책 전망 대비 2030년까지 전 세계 배출량을 2% 및 9% 줄일 것으로 예상된다. 그러나 지구 온난화를 2°C 및 1.5°C 이하로 제한하기 위해서는 2030년까지 전 세계 GHG 배출량을 각각 28% 및 42% 줄여야 한다(UNEP, 2023a).

현재 정책이 지속될 경우, 전 세계 온난화는 2100년까지 최대 3°C(범위: 1.9–3.6°C, 66% 확률)로 유지될 것으로 예상되며, CO₂ 배출량은 2100년까지 탄소 중립(Net Zero)에 도달할 것으로 보이지 않으므로 2100년 이후에도 계속 증가할 것이다. 모든 조건부 NDC와 탄소 중립 약속이 완전히 달성될 경우 가장 낙관적인 시나리오에서는 지구 온난화가 이 세기 동안 2°C(범위: 1.8–2.5°C, 66% 확률)로 제한될 것으로 예상된다. 그러나 탄소 중립 약속은 여전히 높은 불확실성을 가지며, 지구 온난화를 1.5°C로 제한할 가능성은 14%에 불과하고, 지구 온난화가 2°C 또는 심지어 3°C를 초과할 가능성이 크다. 따라서 배출량 차이를 좁히고 모든 탄소 중립 약속의 완전한 이행을 위한 길을 마련하기 위해 긴급한 완화 조치가 필요하다(UNEP, 2023a).

기후변화의 부정적인 영향을 줄이고 손실과 피해를 최소화하며 지속가능한 발전 성과를 보호하기 위해서는 야심찬 적응 행동이 필수적이다. 기후 위험의 복잡하고 점차 심화되는 특성은 다양한 지식에 기반하고 포괄적인 참여를 촉진하는 강력한 적응 행동의 필요성을 강조한다. 이는 생태계와 사회 전반의 취약성을 효과적으로 줄이는 데 도움이 된다. 적응 계획 및 실행은 진전을 보이고 있지만, 대부분의 관찰된 적응 반응은 파편적 및 점진적이며 부문별로 한정되어



Photo: Frédéric Couziniér

4. 무조건적 NDC(Unconditional NDC)는 국가 입법기관이 필요한 법안을 제정할 수 있는 능력, 다른 국가의 야심 찬 행동, 재정 및 기술 지원의 실현 또는 기타 요인과 같은 다양한 조건에 의존하지 않는다. 반면, 여러 조건에 따라 달라지는 NDC는 조건부 NDC(Conditional NDC)로 알려져 있다(UNEP, 2023a).

있으며 지역 간 불균형하게 분포되어 있다(IPCC, 2023). 예를 들어, 6개국 중 1개국은 여전히 국가 적응 계획 도구가 없고, 2020년 이후 국제 공공 적응 재원의 흐름이 감소함에 따라 상당한 재정 격차가 존재한다(UNEP, 2023b). 또한, 부적응의 증거가 증가하고 있으며, 이는 특히 소외된 인구 사이에서 기존의 불평등과 취약성을 고착시킬 수 있다. 오늘날 실행 가능한 효과적인 적응 옵션이 있지만, 많은 옵션은 지구 온난화가 증가하고 일부 인적 및 자연 시스템이 적응 한계를 초과하게 되면 효과가 감소할 것이다(IPCC, 2023).

과학은 명확하다. 온실가스(GHG) 배출량과 대기 중 농도의 증가가 주요 기후 지표의 변화로 이어지고 있으며, 이는 극단적인 사건에 영향을 미치고 전 세계적으로 파괴적인 영향을 초래하고 있다. 특히 가장 취약한 지역 사회에서 이러한 영향이 두드러진다. 전 세계 온도가 계속 상승할 것으로 예상됨에 따라, 온실가스 배출을 줄이고 기후 변화의 부정적인 영향에 적응하며 손실과 피해를 최소화하기 위해 긴급하고 야심찬 기후 행동이 필요하다. 자연과 사회 과학, 기술 및 혁신의 신형 동력을 활용하여 기후 행동은 2030 지속 가능한 개발 목표를 달성하고 미래 세대를 위한 우리의 미래를 보호하는 데 기여할 수 있다.

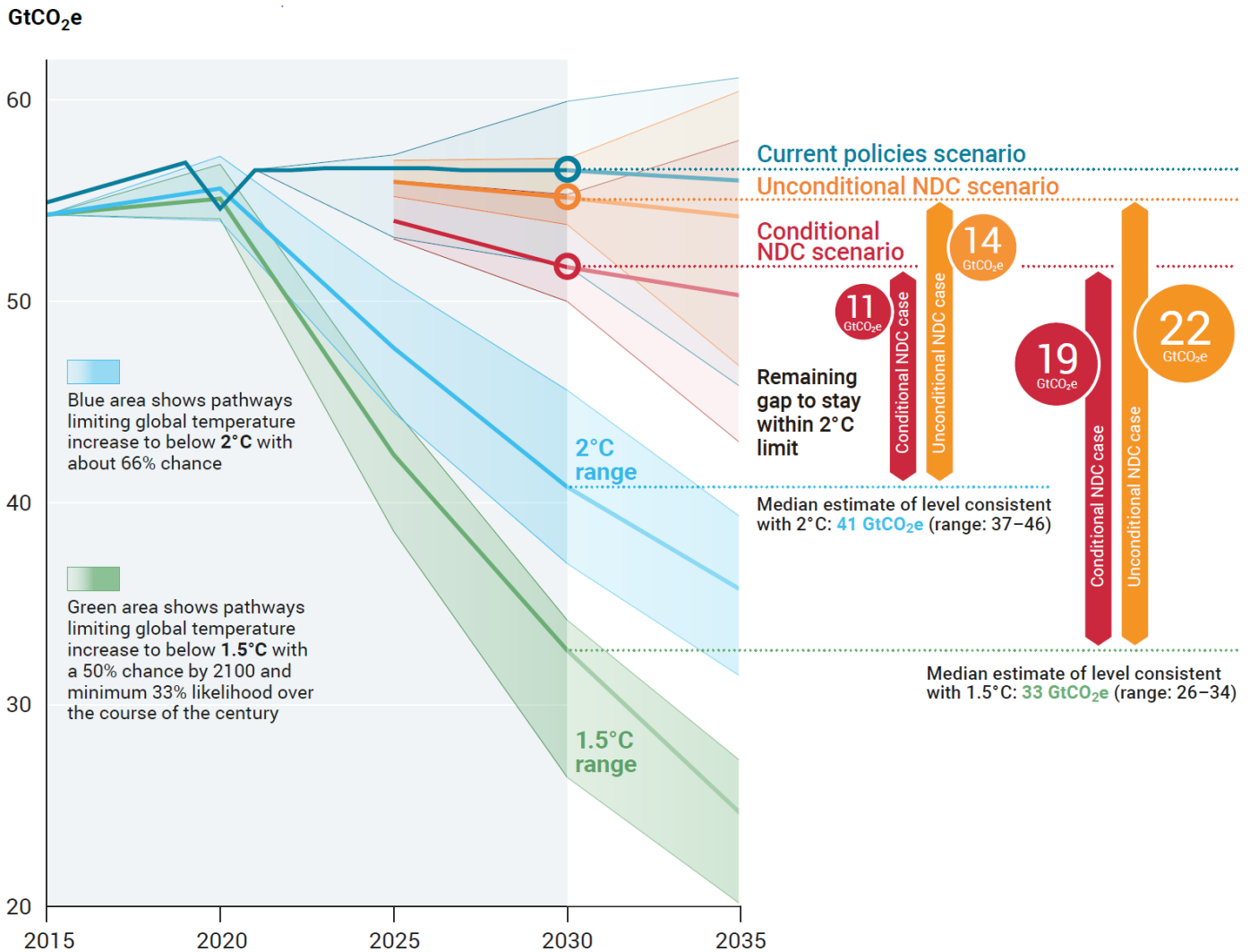


그림 8. 다양한 시나리오에 따른 전 세계 온실가스(GHG) 배출량과 2030년 및 2035년 배출 격차(중앙값 추정치 및 10~90번째 백분위 범위)
참고: GtCO₂-eq - 이산화탄소 환산 역톤. 출처: UNEP, 2023a

CHAPTER 2

인공지능과 기계학습: 날씨 예보 혁신

인공지능(AI)과 기계학습(ML)은 날씨 예보를 혁신할 수 있는 잠재적 혁신 기술로 부상하고 있으며, 사회가 기후 변화 적응, 재해 위험 감소 및 지속 가능한 발전을 향한 진전을 이끌기 위한 더 나은 도구를 갖추는 데 기여할 수 있다.

Authors: Florian Pappenberger (ECMWF), Nils Wedi (ECMWF), Matthew Chantry (ECMWF), Christian Lessig (ECMWF), Simon Lang (ECMWF), Peter Dueben (ECMWF), Mariana Clare (ECMWF), Linus Magnusson (ECMWF), Estíbaliz Gascón (ECMWF), Florence Rabier (ECMWF), Amy McGovern (AI2ES, University of Oklahoma, USA), Hèou Maléki Badjana (Red Cross Red Crescent Climate Centre), Catherine de Burgh-Day (Bureau of Meteorology, Australia), Jürg Luterbacher (Justus Liebig University of Giessen, Germany), Monique M. Kuglitsch (Fraunhofer Institute for Telecommunications, Heinrich Hertz Institute, Germany), Hannah L. Cloke (University of Reading, UK)

Photo: Stefano Marzoli (ECMWF)

주요 메시지

- 인공지능(AI)과 기계학습(ML)은 예측성이 좋은 기상 모델링을 더 빠르고 저렴하게 수행하여 극단적이고 위험한 기상 사건을 예측하는 패러다임 전환을 가능하게 함
- 데이터 가용성의 격차, 모델 해상도의 부족, 불충분한 투명성과 불평등한 접근 등 윤리적 우려는 날씨 예보를 위한 AI/ML의 적용을 제한하는 도전 과제임
- 과학적 발전, 역량 개발 및 글로벌 협력이 AI/ML의 기후 변화 적응, 재해 위험 감소 및 지속 가능한 발전 지원에서의 잠재력을 완전히 열어줄 수 있으며, 글로벌 기술 격차를 해소할 수 있음

서론

인공지능(AI)과 기계학습(ML)은 기후 변화, 재해 위험 관리, 지속 가능한 발전과 같은 글로벌 문제에 대응하는 방식을 혁신하고 있다. 인공지능은 수십 년 동안 존재해왔지만, 최근 기술 발전은 전례 없는 속도로 가속화되고 있다(유엔 인공지능 자문 기구, 2023). AI와 ML은 밀접하게 관련되어 있지만 서로 다른 기능을 제공한다. AI는 일반적으로 인간의 지능이 필요한 작업(예: 추론, 학습, 자기 수정)을 수행할 수 있게 하는 다양한 기술을 지칭하는 광범위한 개념이다. 반면, ML은 데이터 처리, 학습 및 데이터를 기반으로 한 결정 또는 예측을 위해 알고리즘을 사용하는 AI의 특정 하위 집합이다. 이 과정을 훈련(training)이라고 하며, 대량의 데이터에서 학습하여 음성을 인식하고 이미지를 식별하며 트렌드를 예측하는 등의 작업을 수행하는 컴퓨터 모델을 교육하는 것을 포함한다. 기상학에서 AI/ML은 날씨 예보를 혁신할 수 있는 잠재적 변화 기술로 떠오르며, 사회가 기후 변화에 대응하고 적응하는 데 필요한 더 나은 도구로서 제공될 수 있다.

이 장에서는 AI/ML이 어떻게 기상 모델을 저렴하고 빠르게 저소득 국가에서도 접근성을 높여 극단적이고 위험한 날씨 사건을 예측하는 방식에서 패러다임 전환을 가능하게 하는지에 대해 설명한다. 데이터 기반 AI/ML 기상 모델은 많은 예보 작업에서 좋은 성능을 보였으며, AI 도구는 기후 변화 적응 및 재해 위험 감소를 지원하기 위한 의사 결정 과정에서 복잡한 정보를 맥락화하고 전달하는 데 도움을 줄 수 있다. 그러나 데이터 가용성의 격차, 모델 해상도 부족, 투명성 부족 및 불평등한 접근과 같은 윤리적 우려 등, 날씨 예보에서 AI/ML의 잠재력을 최대한 실현하는 것을 제한하는 도전 과제가 존재한다.

과학적 및 기술적 발전과 함께 국제 협력이 강화되면 AI 기반 날씨 예보를 발전시킬 수 있으며, 이를 통해 글로벌 목표를 지원하는 형평성을 촉진할 수 있다.

인공지능 및 기계학습: 날씨 예보 혁신

전통적으로 날씨 예보는 수치 기상 예보(NWP)라는 과정을 통해 대기의 행동을 예측하기 위해 물리 기반 모델에 의존한다. 이 모델들은 유체 역학과 열역학과 같은 물리적 과정을 나타내는 방정식을 해결하여 단기적인 날씨 상태를 모의한다. 그러나 복잡한 수학 방정식을 전 세계 및 지역 규모에서 해결하기 위해서는 상당한 컴퓨팅 자원이 필요하다. 이로 인해 NWP는 컴퓨팅 파워와 재정 및 인적 자원 측면에서 비용이 많이 들며, 이는 많은 국가 기상 및 수문 서비스에게 장애물이 된다.

하지만 AI와 ML은 날씨 예보의 미래를 혁신하고 있다. 고비용의 물리 기반 수치 모델 대신, AI/ML 모델은 재분석 및 관측 데이터 세트를 기반으로 훈련되어 날씨 예보를 더 빠르고 저렴하게 만든다. 현재 AI는 주로 날씨 예측을 지원하지만, 미래에는 날씨 예측이 AI에 의해 주도되는 방식으로 역할이 전환될 가능성이 있다. 실제로 일부 평가에서는 AI/ML 모델이 열대성 사이클론과 같은 특정 날씨 변수 및 극단적이거나 위험한 사건을 예측하는 데 있어 물리 기반 모델을 초월하고 있음을 보여주고 있다(예: Keisler, 2022; Pathak et al., 2022; Bi et al., 2023; Lam et al., 2023; Lang et al., 2024).



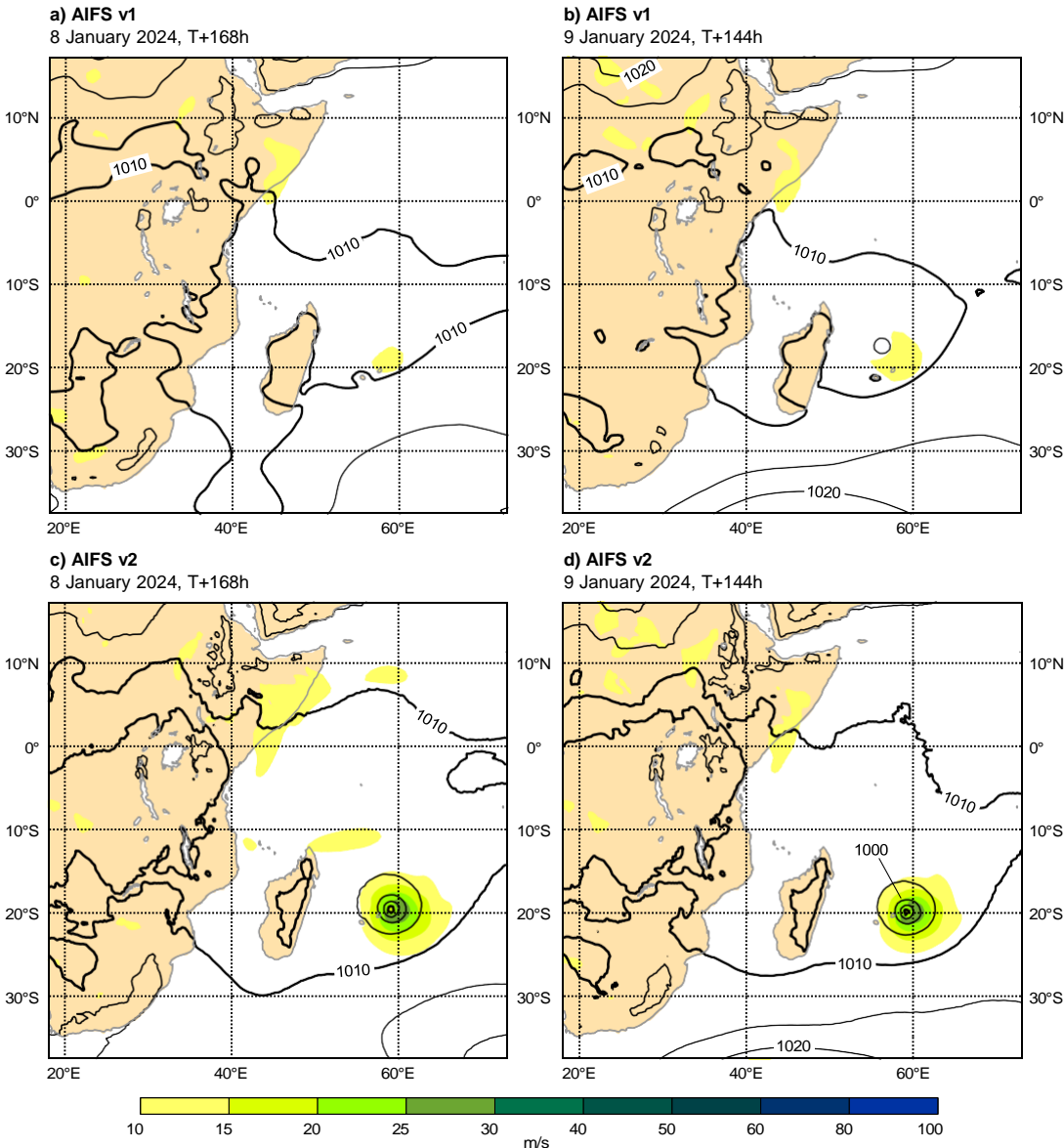


그림 1. 인공지능 및 통합 예보 시스템(AIFS)의 최근 발전으로 AI/ML 모델의 사이클론 탐지 능력 향상 2024년 1월, 열대성 사이클론 벨랄(Tropical Cyclone Belal)은 레위니옹과 모리셔스를 강타하며 강한 비와 강풍을 동반했으나, AIFS 버전 2(아래)는 수평 해상도의 큰 개선으로 인해 버전 1(위)보다 2일 앞서 이를 탐지함. 그림은 AIFS 버전 1에서 T+168h에 해당하는 2024년 1월 8일(a)과 9일(b)의 평균 해수면 기압(MSLP) 및 850hPa 풍속을 보여주며, 동일한 검증 시간에 대한 AIFS 버전 2의 결과는 1월 8일(c)과 9일(d)을 나타냄. 출처: ECMWF, 2024

AI와 ML 모델은 단기 예측뿐만 아니라 엘니뇨 남방진동(ENSO)을 최대 3년까지 예측할 수 있는 잠재력을 보여주고 있다(예: Ham et al., 2021; Patil et al., 2023). 이러한 날씨 예보를 위한 AI/ML의 발전은 주로 Google DeepMind, NVIDIA, Huawei와 같은 대형 기술 회사와 유럽중기예보센터(ECMWF) 및 미국 해양대기청(NOAA)과 같은 기상 예보 기관에 의해 주도되고 있다. 그러나 이러한 AI 모델에 대한 일부 평가에서는 성능 한계가 발견되었다(Box 1 참조).

AI/ML 모델은 예측에 필요한 기본 데이터셋을 생성하는 데 관련된 상당한 컴퓨팅 비용을 줄이는 데 도움을 줄 수 있다. 예를 들어, AI/ML 방법은 날씨 데이터 품질을 점검하고(Sha et al., 2021), 다양한 데이터 소스를 융합하며, 기상 모델 아웃풋을 상세화하여 기상 예측성을 향상시킬 수 있다(예: Harris et al., 2022). 이러한 기능은 이전에 대규모 글로벌 기상 예보 센터에

한정되어 있었으나, 이제는 충분한 자원이 없는 국가기상수문서비스(NMHSs)에서도 접근할 수 있게 되었다. 결과적으로, 많은 NMHSs가 기술력 있는 예측 모델을 운영하는 진입 장벽이 크게 낮아진 것이다. 비용 절감은 또한 작은 공공 및 민간 기관이 NMHS의 기상 예측을 모방하는 데 AI를 사용할 수 있게 해주었다.

ChatGPT와 같은 대형 언어 모델을 통해 AI는 복잡한 정보를 맥락화하고 의사결정 과정을 지원할 수 있다(예: Koldunov and Jung, 2024). 이러한 도구들이 적절히 사용될 경우, 세계적인 이니셔티브인 "모두를 위한 조기 경보"(EW4All), 지속 가능 목표(SDGs), 파리 협정 및 샌다이 재해 위험 감소 프레임워크를 지원하는 데 있어 재난 대비, 대응 및 적응 능력을 향상시킬 수 있다. 잠재적 재난의 촉발 요인은 위험한 기상 사건일 수 있지만, 위험, 적응 또는 완화에 대한 결정 및 행동 변화는

다양한 출처의 정보를 종합적으로 요구한다. 이는 ML 도구로 더 쉽게 탐색, 개선할 수 있으며, 지역 실무자들이 글로벌 정보를 지역적 영향으로 전환할 수 있도록 힘을 실어줄 수 있다.

Box 1. 기계학습 모델은 얼마나 좋을까?

유럽중기 예보 센터(ECMWF)는 관측 데이터와 모델을 결합하여 대기 조건에 대한 시간별 업데이트를 제공하는 글로벌 기후 재분석 자료인 ERA5를 기반으로 훈련된 AI 날씨 모델의 정기적인 평가를 수행했다(그림 2 참조). 폭풍(windstorm), 폭염, 한파 및 열대 폭풍과 같은 심각한 기상 사건에 대한 예측을 분석한 결과, 현재의 기계 학습(ML) 모델들이 일관되게 잘 수행되고 있지만 몇 가지 한계도 있음을 보여주었다. 예를 들어, ML 모델은 열대 폭풍의 경로를 정확하게 예측할 수 있지만 폭풍의 강도를 과소 평가하는 경향이 있다. AI 모델은 또한 강력한 폭풍(windstorm)을 며칠 전에 예측할 수 있지만, 최대 풍속을 과소 평가하는 경우가 있다. 추가로, ECMWF의

9킬로미터 해상도 예측에서 초기화된 AI 예측은 여름과 겨울의 온도 패턴을 포착할 수 있지만, 극단적인 온도를 정확하게 포착하는 데는 실패하며, 특히 최저 관측 온도를 포착하는 데 어려움을 겪고 있다. 이는 전통적인 수치 기상 예측(NWP) 예측에서도 나타나는 문제이다. 표준 기준에 대한 비교 결과, ECMWF 현업의 9킬로미터 분석에서 초기화된 AI 예측이 전통적인 방식으로 생성된 기존의 글로벌 예측보다 일반적으로 더 정확한 것으로 나타났다. 그러나 AI 예측과 전통적인 물리 기반 모델 예측의 오류는 종종 상관관계가 있어 특정 기상 상황을 예측하는 데 공통적인 도전 과제가 있음을 강조한다.

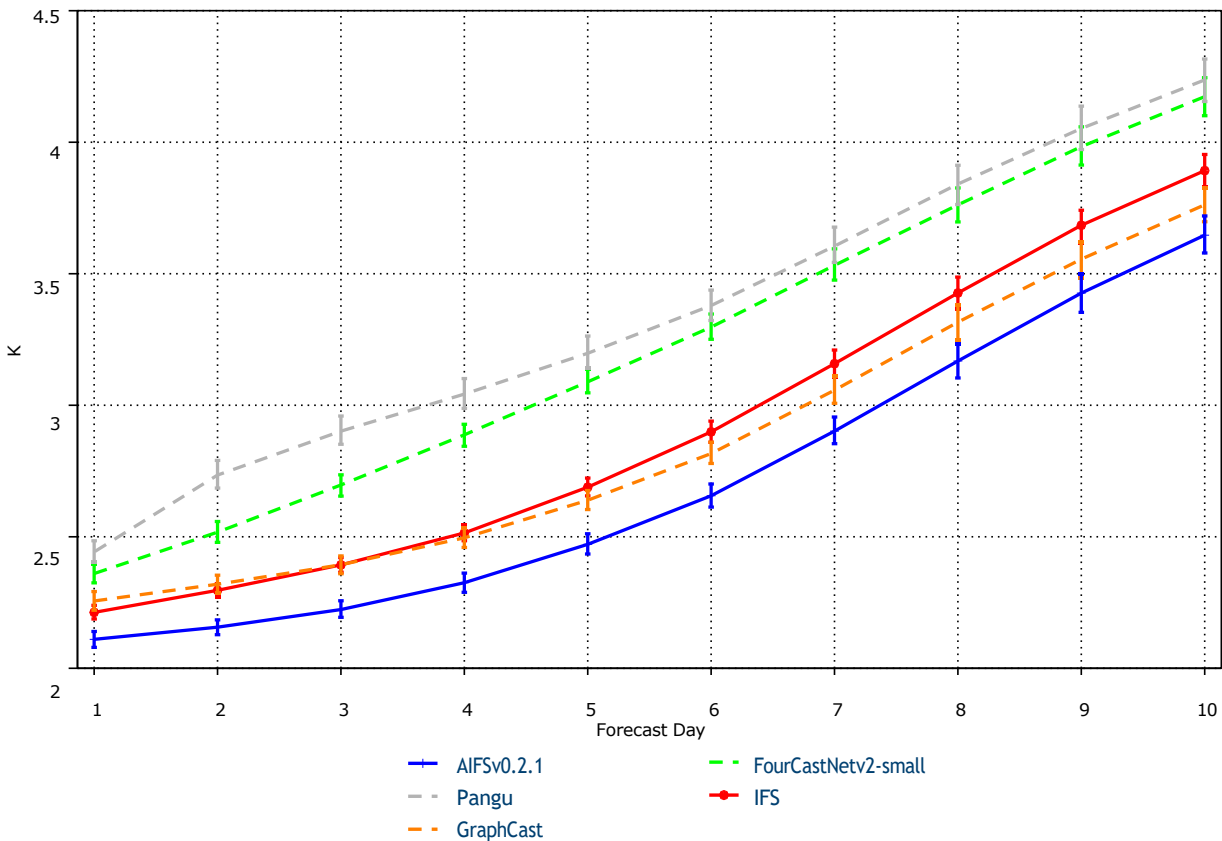


그림 2. 2022년 동안 남반구 평균 10일 예보에서 2미터 기온 오차의 변화. 다양한 AI 모델링 시스템(Huawei의 Pangu-Weather (Bi et al., 2023), NVIDIA의 FourCastNet (Pathak et al., 2022), AIFS (Lang et al., 2024), Google Deepmind의 GraphCast (Lam et al., 2023))의 예측 결과를 물리적 모델 IFS와 비교(오차가 낮을수록 우수). 특히, 각 AI 기반 10일 예보는 단일 그래픽 처리 장치(GPU)에서 1분 이내에 생성 가능. 출처: ECMWF, 2024

격차 및 도전과제

기상 예측에서 AI/ML의 발전으로 인해 많은 기회가 생기고 있지만, 이러한 기술의 전체적인 적용과 잠재력 실현을 저해하는 많은 도전 과제가 있다. 특히, 제한된 데이터 품질과 가용성이 주요 도전 과제로 남아 있다. 현재, 정확한 AI/ML 모델은 대규모의 고품질 및 일관된 데이터 세트를 필요로 하며(예: ERA5 (Hersbach et al., 2020)), 특히 훈련 단계에서 그러하다. 글로벌 관측 시스템은 방대한 양의 과거 및 현재 데이터를 제공하지만, 훈련에 필요한 데이터의 방대한 양을 처리하는 데 여전히 어려움이 있으며, 국가 간의 경제적, 정치적, 지리적 차이로 인해 데이터 가용성이 불균형하게 나타난다. 또한, 소규모 기상 현상에 대한 데이터 부족 및 고해상도 글로벌 재분석 데이터의 부재와 같은 데이터의 공간적 및 시간적 변동성의 격차는 훈련에 영향을 미치고 AI/ML 모델의 효과성을 제한한다. 이로 인해 훈련은 모델 출력이나 직접 관측에 의존해야 하며, 이는 더 어렵고 계산 비용이 많이 드는 과제이다. 이 문제는 신속하고 정확하며 실행 가능한 예측의 필요성과 균형을 이루어야 한다.

문제를 더욱 복잡하게 만드는 것은 현재 AI/ML 모델에서 예측하기 어려운 변수, 예를 들어 해양, 육지, 빙권 및 탄소 순환 변수의 부재이다. 이러한 변수들은 서로 깊이 연결되어 있지만, 이들의 부재는 특히 지역 규모에서 확장된 범위의 기상 예보, 계절 예측 및 장기 기후 예측의 정확성을 제한한다(Woolnough et al., 2007; Vellinga et al., 2020).

지역적 특수성을 우선시하면서 포괄적인 글로벌 해상도 업그레이드 없이 모델 해상도를 타겟으로 강화하는 방향으로 변화가 있었다(Nippen and Chantry, 2024). 그러나 모델 해상도를 향상시키기 위한 다운스케일링 방법은 상당한 계산 자원을 필요로 하며, 이는 여전히 도전 과제로 남아있다.

또한, 불충분한 투명성과 불평등한 접근성 같은 윤리적 도전 과제는 AI/ML 기상 모델의 수용과 효과성을 제한한다(McGovern et al., 2022). 예를 들어, ML 모델의 경우 모의하는 물리적 프로세스를 명시적으로 나타내지 않아 AI/ML 예측에 대한 공공의 신뢰와 확신을 약화시킬 수 있다. ML 모델의 해석 가능성을 개선하기 위한 노력이 진행되고 있으며 (Ghaffarian et al., 2023), 여기에는 물리 기반 제약 통합(예: Harder et al., 2022) 및 훈련되지 않은 물리적 프로세스 표현을 테스트하는 방법 개발(Hakim and Masanam, 2024)이 포함된다. 그러나 신뢰와 확신을 보장하기 위해 투명성을 향상시킬 필요가 있고, 이는 사회가 중요한 정보를 수용할 수 있도록 한다. 또한, 가용 데이터를 효율적으로 활용할 수 있는 AI/ML 도구가 모두에게 접근 가능하지 않아, 이는 특히 글로벌 디지털 격차와 관련된 불평등을 더욱 악화시킬 위험이 있다. 데이터와 컴퓨팅 계산, 사용자 역량의 한계는 이러한 신기술에 대한 접근을 계속해서 방해하고 있으며, 모든 사람이 사회 전반에 걸쳐 이러한 기술이 제공하는 많은 혜택을 누릴 수 있도록 해결되어야 한다.



Photo: Bruno Fanulin



Photo: UNDP Cambodia

미래 전망: 기상 및 기후를 위한 인공지능과 기계학습의 미래

앞으로 AI/ML은 기상 및 기후 분야에서 경계를 계속 확장할 것이다. 다음 단계는 데이터 동화(data assimilation)와 단일 특정 작업을 염두에 두지 않고 대규모, 다양한 데이터 세트에 훈련된 강력한 기초 모델의 개발을 포함할 가능성이 크다. 이러한 모델은 추출이 가능하여 보다 구체적인 응용 프로그램에 적용할 수 있다. 또한, 기존의 대기 AI/ML 모델을 전체 지구 시스템을 포함하도록 확장하는 것이 중요하며, 이를 통해 날씨 예보뿐만 아니라 기후예측 능력을 향상시킬 수 있다(예: Wang et al., 2024; Watt-Meyer et al., 2023). 상업 위성 제곱체의 미활용 데이터와 크라우드(crowd) 소싱 데이터(사물인터넷 포함)를 포함한 데이터 범위를 넓히는 것은 AI/ML 모델의 성능을 향상시킬 수 있는 유망한 잠재력을 지니고 있으며, 일반적으로 훈련 데이터의 양과 다양성이 증가할수록 모델의 성능이 향상된다. 이 훈련(training) 데이터가 저렴한 연합 데이터 저장 플랫폼과 컴퓨팅 인프라를 통해 공개적으로 이용 가능하도록 하고, 기상 예측을 위한 데이터를 활용하고 ML 애플리케이션을 구축하는 표준화된 도구를 결합하면, 전 세계적으로 NWP에서 ML의 사용과 활용을 민주화하는 데 도움이 될 수 있다.

우리는 의사 결정을 지원하고 전 세계 커뮤니티가 기후 변동성과 극단적이고 위험한 기상과 관련된 위험을 완화하도록 AI 기반 통찰력에 권한을 부여하는 미래로 나아가고 있다. 강력한 글로벌 거버넌스와 프레임워크가 필요하며, AI/ML이 인류의 이익을 최우선으로 하여 개발되고 모두가 접근할 수 있도록 해야 한다. AI/ML 기상 모델의 투명성을 높이고 훈련 데이터의 개방성과 추적 가능성을 향상시키는 것은 신뢰를 구축하고 이러한 도구의 책임 있는 사용을 위한 기준을 개발하는 데 중요하다. 또한, 윤리적인 AI 개발은 시스템적 편견과 불평등한 접근을 해결해야 하며, 모든 커뮤니티, 특히 가장 취약한 커뮤니티를 고려해야 한다. 디지털 격차를 해소하고 효과적이고 책임감이 있고 공평한 적용을 보장하기 위해 AI/ML 도구에 대한 교육 및 역량 개발이 필요하다. 이러한 기술의 발전은 AI/ML의 잠재력을 극대화하여 기후 행동을 강화하고, 지역 주체에 권한을 부여하며, 기술 격차를 해소하여 모두를 위한 지속 가능하고 회복력 있는 미래를 지원하는 글로벌 협력의 중요성을 강조한다.



CHAPTER 3

우주 기반 지구 예측: 날씨, 기후, 물, 그리고 관련 환경 응용분야의 향상

우주 기반 지구 관측의 혁신은 기상, 기후, 수자원 및 관련 환경 응용 분야에서 새로운 지평을 열고, 글로벌 목표 달성을 가속화하며, 모두에게 평화롭고 지속 가능한 혜택을 증진시킬 수 있다.

Photo: NASA

Authors: Jumpei Takami (UNOOSA), Anne-Claire Grossias (UNOOSA), Lorant Czarán (UNOOSA), Gemechu Jebeso Morketo (Central European University), Ajadi Sodiq (Central European University), Paolo Ruti (EUMETSAT)

주요 메시지

- 지구 시스템의 고해상도 및 고빈도 관측은 효과적인 기상 예측, 기후 예측, 환경 모니터링에 필수적임
- 공공-민간 파트너십을 활용하고, 초고해상도 이미징 및 메가-위성군과 같은 우주 기반 지구 관측의 혁신은 새로운 가능성을 열고, 글로벌 목표 달성을 가속화할 수 있음
- 국제 협력, 포괄적인 거버넌스 프레임워크, 그리고 혁신적인 금융 모델은 기상, 기후, 물, 관련 환경 응용 분야를 위한 우주 기반 지구 관측을 지원할 수 있음

서론

비둘기부터 풍선, 위성까지, 지난 100년간 지구 현상을 관측하고 측정하려는 인간의 노력은 빠르게 발전해 왔다. 오늘날 위성은 점점 더 높은 해상도와 빈도로 지구의 육지, 해양, 대기를 관측할 수 있게 해주며, 이는 사회에 필수적인 서비스를 제공한다(Emery and Camps, 2017). 기상, 기후, 물, 환경 응용 분야에서 새로운 위성 기술은 기상 데이터를 향상시키고 장기적인 기후 데이터 기록을 생성하는 데 기여할 수 있으며, 이는 특히 취약 지역에서 중요한 기후 서비스에 필수적이다. 또한 위성 기술은 파리 협정, 재난 위험 경감에 관한 샌다이 프레임워크, 2030 지속 가능 발전 의제와 같은 글로벌 목표 달성에 있어 비용 효율적인 도구가 될 수 있다(Lemmens, 2011; Hegglin et al., 2022).

이 장에서는 기상, 기후, 물 및 관련 환경 응용 분야를 위한 우주 기반 지구 관측에 대한 고차원적인 개요를 제공하며, 위성 관측과 관련된 최신 과학 및 기술 발전 중 일부를 강조한다. 또한 이러한 발전의 잠재력을 완전히 실현하는 데 방해가 되는 격차와 과제들을 식별하고, 우주 기반 지구 관측이 모두에게 지속 가능한 혜택을 제공할 수 있도록 해결해야 할 문제들을 다룬다.

날씨, 기후, 물, 관련 환경 응용을 위한 우주 기반 지구 관측

세계 최초의 기상 위성은 1960년 4월 1일에 발사되어 새로운 시대의 시작을 알렸다(WMO, 2023). 그 이후로 놀라운 기술 발전이 이루어졌다. 분광계는 이제 과거에 비해 수천 개의 파장 채널에서 방출된 지구의 복사 에너지를 측정할 수 있으며, 산란계와 고도계의 발전은 해양 모니터링을 향상시켰다. 이러한 발전은 기상 예측을 개선하고 기후 시스템에 대한 이해를 향상시켜, 더욱 강력한 환경 모니터링을 가능하게 했다.

위성 이미지와 관측 데이터의 증가로 인해 몇 시간에서 며칠까지의 시간 규모에서 고영향 기상 현상을 예측하는 능력이 향상되었으며, 특히 복잡한 지형이나 지상 관측 데이터가 부족한 지역에서도 이와 같은 능력이 개선되었다(Du et al., 2021). 예를 들어, 마이크로파 탐지기는 대기를 수직으로 "절단"하여 대기 내 기상 예측의 핵심 변수들이 어떻게 변화하는지를 더 잘 이해할 수 있도록 한다. 폭풍과 관련된 변수를 측정하는 위성 데이터는 천둥 번개와 같은 빠르게

진행되는 대기 현상을 6시간 이내의 시간 규모로 예측하는 나우캐스팅에 필수적이다(Box 1 참조).

또한 위성 관측은 기후 상태를 모니터링하고 기후 변화의 미래 변화를 더 적은 불확실성으로 예측하는 능력을 향상시킨다(Guo et al., 2015). 예를 들어, 위성 관측과 데이터는 극지방의 빙하 변화를 모니터링하고 기후 모델에 정보를 제공하며, 기후 영향에 대한 이해를 돕는 데 필수적이다(Hall, 1988). 국제 협력을 통해 정지 궤도 위성을 사용하여 필수 기후 변수와 주요 지표의 장기 기록을 수집할 수 있으며, 이를 통해 지구 기후 시스템의 상태를 평가할 수 있다(Trewin et al., 2021). 이러한 정보는 지역 차원에서도 효과적인 의사결정과 적응을 지원하고, 잘못된 적응의 위험을 줄여준다(*United in Science 2023: Sustainable Development Edition*).

Box 1. 우주 기반 지구 관측: 남아프리카의 뇌우 나우캐스팅 역량 구축

시간적 및 공간적으로 높은 해상도를 가진 우주 기반 지구 관측은 나우캐스팅 역량을 향상시킨다. 그 결과, 기상 예보관은 뇌우가 형성되는 순간을 관측하고, 그 심각성을 평가하며, 대중이 예상되는 영향을 최소화하기 위해 선제적으로 대응할 수 있도록 조기 경보를 제공한다. 예를 들어, 남아프리카에서는 강력한 뇌우가 생명을 위협하고, 특히 도시 지역에서 재산과 생계에 상당한 피해를 입힌다. '남아프리카를 위한 기상 및 기후 정보 서비스(WISER) 조기 경보 프로젝트(EWSA)'는 실시간 위성 이미지를 활용하여 도시 지역의 고위험 수문 기상 재해를 예측하는 나우캐스팅 역량을 구축하는 것을 목표로 한다(Symonds, 2023). 또한 이 프로젝트는 재난 위험 관리 기관 및 비정부기구(NGO)와 협력하여 도시 거주자, 특히 여성과 장애인과 같은 취약 계층과 함께 공동으로 결과물을 만들어간다. 이러한 방식으로 WISER EWSA 프로젝트는 나우캐스팅 기술 발전뿐만 아니라 모든 사람들이 이러한 조기 경보를 받고, 부정적인 영향의 위험을 줄이기 위해 어떤 조치를 취해야 하는지 알 수 있도록 돕는 것을 목표로 하고 있다.

마지막으로, 우주 기반 지구 관측은 환경 모니터링에서도 중요한 역할을 한다. 예를 들어, 합성 개구 레이더(SAR) 이미징은 위성이 레이더 신호를 방출하고 반사된 신호를 같은 위성에 장착된 기기에서 기록하는 방식으로 작동하는데, 이는 SAR 이미징이 어둡거나 흐린 날씨에도 이미지를 생성할 수 있기 때문에 전천후, 주야간 지구 관측이 가능하며, 이는 산림 벌채 추적, 해빙 모니터링, 재난 위험 감소 및 대응과 같은 다양한 분야에서 매우 중요하다. 우주 기반 지구 관측을 활용한 환경 모니터링은 토양 상태를 측정하고 모니터링하여 가뭄 조건을 감지하고, 전 세계 취약 지역에서 식량 및 물 부족 문제를 완화하기 위한 선제적 조치를 지원함으로써 물과 토지 관리에도 기여할 수 있다(Schollaert Uz et al., 2019; Dube et al., 2022).

우주 기반 지구 관측의 과학 및 기술 발전

과학과 기술은 최근 몇 십 년 동안 우주 기반 지구 관측에서 놀라운 발전을 이루었으며, 기상, 기후, 물 및 관련 환경 응용 분야에 큰 혜택을 주고 있다. 예를 들어, 급변하는 기상 현상을 예측하려면 온도, 습도, 바람과 같은 대기 변수를 파악하는 정보가 필요하다. 곧 출시될 정지궤도 위성의 새로운 초분광 기술은 고해상도 온도 및 습도 데이터를 자주 제공할 예정이며, 우주 기반 레이더 기술은 풍속 측정을 향상시키고 있다.

또한, 다양한 유형의 센서 데이터를 결합하는 멀티 센서 접근 방식을 통해 강수량 추적 및 분석을 개선하고, 수문 순환에 대한 이해를 높여 기후 변화 예측과 평가에 중요한 역할을 한다. 위성 이미지 해상도도 과학 기술의 발전 덕분에 계속 향상되고 있다. 최신 초고해상도(VHR) 지구 관측 위성은 픽셀당 최대 30cm의 해상도를 제공하여, 전 세계에서 지역 규모까지 환경 변화 모니터링을 더욱 정밀하게 수행할 수 있다(Neigh et al., 2019). 현재는 정부가 자금을 지원하는 기존의 지구 관측 시스템을 보완하는 수많은 상업적 VHR 데이터 소스가 있으며, 이러한 이니셔티브는 우주 기반 지구 관측에서 민간 부문의 투자가 얼마나 중요한지를 보여주고 있으며, 공공 및 민간 부문의 협력이 지구 관측 데이터를 발전시킬 수 있음을 나타낸다.

수십 년 동안 위치, 내비게이션 및 타이밍 서비스를 제공해온 글로벌 내비게이션 위성 시스템(GNSS)은 점점 더 혁신적인 방식으로 해양 관측을 향상시키는 데 사용되고 있다. 예를 들어, GNSS 반사 측정 기술은 반사 신호를 사용하여 해수면 높이와 온도, 풍속 및 파도 높이를 추론하는 등 다양한 변수를 파악할 수 있으며, 이는 대기와 해양의 상호작용을 이해하고 기상 및 기후 예측을 개선하는 데 중요하다(Xing et al., 2022). 또한, GNSS 전파 굴절 기술은 대기 온도 프로필을 분석하여 수치 기상 예측 기술을 향상시키는 데 중요한 역할을 한다.

또한, 대기 구성 모니터링을 위한 위성 관측 능력도 빠르게 발전하고 있다. 예를 들어, 코페르니쿠스의 인위적 이산화탄소 모니터링 위성 군은 고해상도 위성 CO₂ 및 CH₄ 배출 측정을 지상 기반 측정 및 모델링과 결합하여 인위적 배출을 자연적 배출과 구별할 수 있다(ESA, 2022). NASA의 궤도 탄소 관측소-3(OCO-3)와 같은 다른 이니셔티브 및 민간 부문의 우주 임무도 고해상도의 전 세계 온실가스(GHG) 모니터링을 제공한다. 이러한 발전은 국제 정책에 정보를 제공하고(Box 2) 특히 공중 보건 분야에서 의사결정 및 적응을 위한 대기 질 정보를 요구하는 사회적 응용 분야를 촉진하는 새로운 이니셔티브의 발판이 되고 있다(2023 State of Climate Services: Health).

마지막으로, 개발 중인 대규모 위성 군, 레이저 통신 및 엣지 컴퓨팅을 포함한 최신 기술 발전은 우주 기반 지구 관측 데이터 수집, 연결성 및 데이터 가용성을 향상시킬 수 있다. 예를 들어, 상업적 제공업체들은 기기 부품의 소형화를 통해 기술적 장벽을 허물고 있으며, 이는 위성의 크기, 무게 및 비용을 줄였다. 이로 인해 더 민첩하고, 제작 및 발사가 더 저렴하며, 조정이 쉬운 소형 위성(SmallSats)의 새로운 시대가 열렸다. 이러한 소형 위성들은 대규모 위성 군을 형성하여 다양한 유형의 기상 및 환경 데이터를 더 빠르고 더 유연하게 수집하는데 기여하고 있다. 그들은 또한 전세계에 광대역 접속을 제공하고 지구 관측 데이터 배포를 강화하며, 위성에서 수신한 원격 감지 데이터를 거의 실시간으로

Box 2. 국제 기후 정책에 정보를 제공하는 글로벌 온실가스 감시(G3W)

파리협정의 성공적인 이행을 위해서는 당사국들이 수행하는 감측 노력의 영향을 평가하고 전반적인 효과를 판단하기 위해 온실가스(GHG) 플렉스와 농도를 실시간에 가깝게 모니터링하는 것이 필요하다. 세계기상기구(WMO)의 전지구 온실가스 감시(G3W) 이니셔티브는 CO₂, CH₄, N₂O의 플렉스를 추정하기 위해 우주 기반 및 지상 기반 관측과 모델링 제품을 국제적으로 교환할 수 있는 플랫폼을 제공한다. 이 과정에서는 인위적 영향과 자연적 영향을 모두 고려한다. WMO는 국제 협력을 촉진하는 경험과 오래된 글로벌 대기 감시 프로그램을 바탕으로, G3W를 통해 온실가스 순환에 대한 우리의 이해를 개선하고 장기적인 기후 궤적을 더 잘 예측할 수 있는 정량적 데이터를 제공할 것이다. 이를 통해 이니셔티브는 감측 조치에 관한 의사결정을 지원하고, 약속 이행 여부를 모니터링하는 데 필요한 정보를 제공하게 될 것이다.

더 쉽게 액세스할 수 있도록 한다. 그러나 우주 물체의 증가로 인해 우주 파편이 늘어나고 있으며, 이는 궤도에 있는 다른 우주선을 손상시키거나 파괴할 위험이 있다(UNOOSA 및 ESA, 2023). 또한, 연구에 따르면 레이저 통신의 사용은 위성과 지상 기반 인프라 간의 데이터 전송 속도를 크게 향상시킬 수 있으며, 이를 통해 이미지 데이터에 더 빠르게 접근할 수 있게 된다(Marbel et al., 2022). 엠티 컴퓨팅은 점점 더 위성에서 직접 데이터를 처리하는 데 사용되고 있으며, 이를 통해 원시 데이터를 지구로 전송하여 분석하는 대신 더 빠르게 의사 결정을 내릴 수 있는 통찰력을 제공할 수 있다(Leyva-Mayorga et al., 2023).



Photo: NASA

격차와 도전과제

과학적 발전과 새로운 우주 기술에 대한 투자가 확대되고 있음에도 불구하고, 중요한 해양, 기후, 에어로졸 및 수문학적 변수의 정확한 측정과 극지방과 같은 관측이 부족한 지역을 포괄하는 데에는 여전히 격차가 존재한다. 또한, 데이터 접근성과 표준화는 특히 저소득 국가에서 상당한 도전 과제로 남아 있는데, 이들 국가는 우주 기반 데이터를 효과적으로 활용할 수 있는 인프라, 자원 및 전문 지식이 부족하다(Macphail, 2009). 데이터 형식과 수집 방법의 차이는 상호 운용성 문제를 발생시키며, 이는 다양한 출처에서 수집된 데이터를 통합하는 것을 복잡하게 만든다. 또한 위성 데이터의 정확도를 높이기 위해서는 고품질의 데이터와 지상 관측을 통한 검증이 필요한데(Militino 외, 2018), 이는 특히 원격 지역이나 저소득 지역에서 지상 관측이 제한적이기 때문에 위성으로부터 얻은 정보의 일관성과 정확성이 떨어질 수 있다.

기술적 및 자금 조달의 한계 또한 중요한 장벽이다(Andries 외, 2019). 많은 위성들이 아직 전통적인 데이터 전송 방법에 의존하고 있으며, 이는 새로운 기술적 솔루션이 아직 완전히 운영되지 않거나 비용 효율적이지 않기 때문이다. 이러한 문제는 특히 저소득 국가에서 두드러진다. 전통적인 방법은 데이터 전송 및 처리에 지연을 초래할 수 있으며, 이는 특히 조기 경보 시스템을 지원하는 단기 기상 예보 서비스에서는 시급성이 중요하다. 또한 통신 산업에서 무선 주파수에 대한

수요가 증가하면서 위성 데이터 전송 방식에 대한 위협도 커지고 있다. 게다가 소형 위성(SmallSat) 별자리와 상업적 지구 관측 회사의 증가에도 불구하고, 위성을 발사하고 유지하는 것은 여전히 많은 국가와 조직에게 지나치게 높은 비용을 수반한다. 자금 조달의 한계는 위성 데이터의 비용을 줄이려는 유엔의 협상 노력에도 불구하고 데이터 접근을 저해하고 있다.

마지막으로, 우주 기반 지구 관측을 위한 국제적 프레임워크를 수립하고 시행하는 데에도 여전히 어려움이 있다. 글로벌 데이터 공유 규정을 수립하는 데는 진전이 있었지만, 지정학적 긴장은 각 국가가 중요한 지구 관측 및 정보를 공유하려는 의지에 영향을 미쳐 국제 협력과 데이터 접근을 방해할 수 있다(Harris 및 Baumann, 2021). 또한 우주 물체와 활동 주체가 증가하는 상황에서, 국제 협력을 통해 우주의 안전하고 지속 가능한 이용을 보장하고 글로벌 목표를 지원하기 위한 규제 프레임워크를 강화할 필요가 있다.

앞으로의 전망: 우주 기반 지구 관측의 미래

앞으로는 특히 저소득 국가에서 우주 기반 지구 관측 및 데이터의 질, 범위, 양 및 접근성을 향상시키기 위한 다각적 접근이 필요하다. 위성 데이터의 품질을 향상시키려면 지상 관측과의 엄격한 교정 및 검증을 통해 불확실성을 줄이고 기후 모델과 재해 평가의 정확도를 높일 수 있다(Yamamoto 외, 2010). 또한, 새로운 기술과 국제적 이니셔티브를 통해 데이터 접근성을 향상시킬 수 있다. 예를 들어, 지구 관측 데이터와 관련 서비스는 점점 더 "클라우드"로 이동하고 있으며, 이는 전 세계 다양한 위치에서 컴퓨팅 자원을 주문형으로 사용할 수 있게 한다. 클라우드를 활용하면 데이터 저장, 처리 및 접근성이 향상되어 비용을 절감하고 신속한 데이터 전파가 가능해진다. 그러나 인터넷 접근이 어려운 저소득 국가에서는 여전히 접근성에 대한 장벽이 남아 있다. 혁신적인 자금 조달 모델, 공공-민간 협력 및 투자 증대는 자금 부족 문제를 해결하고 비용을 줄이며, 도구의 사용을 확대하고 새로운 관측 방법에 대한 연구를 가능하게 하여 지구 관측 및 데이터에서 새로운 영역을 열 수 있다(Salcedo-Sanz 외, 2020).

마지막으로, 보다 강력한 국제 협력은 데이터 공유의 개방성, 역량 강화, 교육 및 기술 이전을 촉진하는 데 중요하며, 이는 각국이 위성 데이터를 처리하고 분석하여 기후 행동과 재해 위험 감소에 활용할 수 있도록 돕는다. 또한 협력은 데이터 공유, 보안 및 우주 파편 문제와 같은 문제에 대한 명확한 규정을 수립하고, 기상, 기후, 물 및 관련 환경 서비스의 관측 요구를 다루는 WMO 통합 글로벌 관측 시스템(Vision for WIGOS in 2040 (WMO-No. 1243))과 같은 포괄적인 규제 프레임워크를 촉진하는 데 필수적이다. 이로 인해 우주 기반 지구 관측의 발전이 최적화되어 모든 사람에게 평화롭고 지속 가능한 혜택을 제공할 수 있다.

CHAPTER 4

가상과 물리적 영역의 연결: 물과 토지 관리를 위한 몰입형 기술 활용

디지털 트윈, 가상 현실, 메타버스와 같은 몰입형 기술은 물리적 세계와 디지털 세계를 연결하는 상호작용적이고 데이터 기반의 솔루션을 통해 토지 및 물 관리 방식을 혁신할 수 있으며, 이를 통해 다양한 주체들의 의사결정과 참여를 향상시킬 수 있다.

Photo: Dan Raizer - Unsplash

Authors: Nakul Prasad (WMO), Stefan Uhlenbrook (WMO), Hwirin Kim (WMO), Celine Cattoen (NIWA, New Zealand), William Scharffenberg (USA), Monique M. Kuglitsch (Fraunhofer Institute for Telecommunications, Heinrich Hertz Institute, Germany), Abd Salam El Vilaly (UNCCD), Bilel Jamoussi (ITU)

주요 메시지

- 사회경제적 영향과 기후 변화는 물과 토지 자원을 압박하여 식량 및 물 안보를 위협하고 있으며, 지속 가능한 개발과 기후 행동을 지원하기 위한 통합된 물 및 토지 관리의 필요성을 강조함
- 디지털 트윈, 가상 현실, 메타버스와 같은 몰입형 기술은 물리적 세계와 디지털 세계를 연결하는 몰입적이고 상호작용적이며 데이터 기반의 솔루션을 제공함으로써 토지 및 물 관리 방식을 혁신할 수 있으며, 이를 통해 다양한 주체들의 의사결정과 참여를 향상시킬 수 있음
- 국제 협력, 지식 공유 및 강력한 다자간 체계는 토지와 물 자원을 더 잘 관리하고 지속 가능하고 공평한 미래를 보장하기 위해 이러한 혁신적인 솔루션을 채택하는 데 필수적임

서론

인류 역사 초기부터 토지는 인간 거주에의 기초가 되었고, 물은 지구 표면을 형성하며 문명의 흥망성쇠에 중요한 역할을 해왔다(Roberts 외, 1998; DGB Group, 2023; Pacific Institute, 2023). 오늘날 인구 증가, 복잡한 사회경제적 영향, 그리고 변화하는 기후로 인해 물과 토지 자원에 막대한 압박이 가해지고 있으며, 이는 사회에 위협을 주는 광범위한 자원 황폐화를 초래하고 있다. 예를 들어, 토지 황폐화와 부적절한 물 관리는 홍수 위험을 더욱 악화시켜 특히 농촌 지역의 취약성을 높이고 있다. 또한, 현재 연구에 따르면 심각한 물과 토지 황폐화가 일어나는 지역과 높은 수준의 농촌 빈곤 및 영양실조가 문제시되는 지역은 밀접한 관련이 있으며, 이는 지속 가능한 개발을 위협하고 있다. 따라서 물과 토지 관리의 통합은 지속 가능 발전 목표(SDGs)인 2030 아젠다를 달성하는 데 필수적이다.

물과 토지 황폐화 위기의 심각성을 인식한 이 장에서는 디지털 트윈, 메타버스, 가상 현실(VR)과 같은 신기술의 가능성을 강조한다. 이러한 기술은 몰입적이고 상호작용적이며 데이터 기반의 솔루션을 제공하여 물과 토지 자원을 지배하는 복잡한 과정을 이해하고 관리하는 데 기여할 수 있다. 홍수와 가뭄 현상을 시뮬레이션하고 물 흐름 및 축적을 예측하며 토지 황폐화를 예측하는 등, 디지털 트윈과 몰입형 기술은 혁신과 해결책을 이끌어낼 수 있다. 그러나 이러한 기술이 잠재력을 완전히 발휘하기 위해서는 데이터의 가용성, 품질, 상호 운용성의 한계, 자금 및 법적·규제적 틀의 격차와 같은 문제들이 해결되어야 한다. 국제 협력, 다양한 이해관계자와의 협력, 데이터 수집 및 표준화 이니셔티브를 통해, 우리는 디지털 트윈과 몰입형 기술을 활용하여 전 세계적인 문제를 해결하기 위한 노력을 진전시킬 수 있다.

위기 증가: 토지와 물 황폐화로 위협받는

물과 식량의 연계성

물, 토지 자원 관리는 사회경제적 발전의 중심에 있다. 지표수 및 지하수의 고갈과 토지 황폐화와 같은 상호 연관된 문제는 지속 가능 발전 목표(SDGs) 달성 노력을 방해할 수 있다. 예를 들어, 농업은 전 세계 담수 자원의 약 70%를 소비하며, 저소득

국가에서는 이 비율이 90%까지 증가한다(Fujs와 Kashiwase, 2023). 그러나 많은 국가에서는 여전히 지속 불가능한 물 사용 관행을 따르고 있으며, 이는 지하수와 지표수를 오염시키는 주요 원인 중 하나로 남아 있다. 또한 수십 년간 부문 간 이해관계가 물 자원 할당을 지배해 왔으며, 하루에 미치는 영향이나 물 자원의 지속 가능성을 고려하지 않았다. 게다가 부적절한 관행은 토양을 유실시켜 침식을 초래하며, 이는 토양의 깊이, 영양소 함량, 물 보유 능력을 감소시킨다. 방치된 침식은 생산적인 농업 지역을 불모지로 변모시키고, 오염된 식수, 침적된 강과 관개 수로, 황폐화된 해안 생태계 등 심각한 하류 영향을 초래하며 산사태의 위험을 높인다(Jinendradasa, 2002).

토지 황폐화와 기후 변화도 깊은 연관이 있다. 예를 들어, 토지 황폐화는 지구가 탄소를 흡수할 수 있는 능력을 감소시키는데, 이는 건강한 토양과 식물이 탄소 싱크 역할을 할 수 있기 때문이다. 또한, 토지가 산림 파괴나 침식으로 황폐화되면 저장된 탄소가 대기 중으로 방출되어 CO₂ 수치가 증가한다. 식생 덮개의 상실은 지표면의 알베도를 변화시켜 온도 조절에 영향을 미치며 기후 시스템을 교란시킨다. 기후 극단은 이러한 문제를 더욱 악화시키며, 전 세계적으로 토지와 물 자원의 관리는 선진국과 최빈국 모두에게 심각한 거버넌스 과제가 된다. 또한, 국가 경계를 넘나드는 유역에서는 상류에서 이루어진 물 관리 결정이 평화와 글로벌 안보를 위협하는 연쇄적인 영향을 미칠 수 있다.

신기술의 약속: 메타버스, 디지털 트윈 및 가상 현실

역사적으로 물을 모으는 저수조, 수로 및 댐과 같은 기술뿐만 아니라 보전 경작, 윤작과 같은 토지 이용 관행의 발전은 지역 사회가 물 자원을 확보하고 관리하며 토지 황폐화를 완화하는 데 기여해왔다. 오늘날 물 자원과 토지에 대한 압박이 커지면서, 새로운 기술을 활용해 관측 데이터를 수집하고 다양한 시나리오를 시각화하려는 관심이 증가하고 있다. 인공지능(AI), 드론 및 사물인터넷(IoT)과 같은 기술이 인기를 끌고 있는 가운데, 디지털 트윈과 메타버스를 활용한 새로운 기술이 등장하고 있으며, 이는 실제 환경을 매우 상세하고 상호작용적인 디지털 복제로 재현한다.

디지털 트윈은 물리적 객체 또는 시스템을 정확하게 반영하도록 설계된 가상 표현으로 정의된다(What Is a Digital Twin?). 한편, 메타버스는 가상 세계를 통합한 생태계로 몰입형 경험을 제공하며 경제적, 환경적, 사회적, 문화적 관점에서 새로운 가치를 창출한다(ITU FG-MV, 2023). 디지털 트윈은 메타버스의 핵심 구성 요소로, 다양한 시나리오를 시각화하고 사용자에게 몰입형 경험을 강화해준다.

디지털 트윈은 수십 년 동안 존재해왔다. 미국 항공우주국(NASA)은 1960년대 우주 탐사 임무 동안 우주선의 복제품을 지구에서 제작하여 비행 승무원들이 연구하고 시뮬레이션할 수 있도록 하는 디지털 트윈 기술의 초기 개척자 중 하나였다(Allen, 2021). 그러나 최근에 들어서야 날씨, 기후, 물 및 관련 환경 분야, 특히 토지 및 물 자원 관리에서 주목받기 시작했다.

한 예로, 호주의 Beetaloo 하위 분지에서 토지와 격렬한 지표수 흐름 간의 상호작용을 예측하는 방법을 개발하는 연방과학산업연구기구(CSIRO)의 프로젝트가 있다(Huth 외, 2023). 이 프로젝트의 목표는 지표수와 식생을 보호하면서 토양 침식 및 피해를 완화하는 것이다. 고해상도 항공 사진을 사용하여 수십억 개의 데이터 포인트가 수집되었으며, 이를 통해 정확한 지리적 위치 지정과 해당 지역의 정확한 3차원(3D) 디지털 모델을 생성할 수 있었다. 이러한 고해상도 모델은 토지 소유자와 기업이 침식 위험이 높은 지역을 식별하고 주요 피해가 발생하기 전에 문제를 해결하는 데 도움을 준다. 일반적으로 소가 풀을 뜯거나 토양 건강이 좋지 않아 풀의 덮개가 적은 지역은 침식 위험이 더 크다. 이 디지털 트윈은 연구자들이 모델링 소프트웨어를 사용하여 강우가 어디에서 유출되어 하천으로 모이는지 시각화하고 상류 집수 지역을 계산할 수 있도록 해준다. 이러한 모델을 고해상도 지도 위에 겹치면 풍경에서 물 흐름과 축적을 명확하게 시각화할 수 있으며, 침식에 취약한 지역을 식별하고 이를 사전에 해결할 수 있다.

또 다른 예로는 2026년까지 대한민국 전역의 모든 강 유역에 대한 종합적인 디지털 트윈 개발이 있다(그림 1). 환경부가 주도하는 이 프로젝트는 고해상도 3D 공간 정보와 댐 및 유역의 실시간 모니터링을 활용하여 홍수 대응 작전의 정확한 시뮬레이션을 생성하는 것이다. 이 디지털 트윈은 사용자가 다양한 시나리오에서 홍수 깊이와 범위를 시각화할 수 있게 해주며, 이는 지역 주민들에게 신속한 대피를 위한 중요한 정보를 제공하고 보상을 위한 정확한 피해 평가를 지원한다. 또한, 기존 댐에 대한 디지털 트윈도 제작되었다. 이러한 디지털 모델은 댐 운영자들이 쉽게 볼 수 없는 구조적 손상이나 누수를 디지털로 평가할 수 있게 하여 홍수 예방 및 예측 기능을 크게 향상시킨다. 디지털 트윈 시스템을 보완하는 것은 인공지능(AI) 시스템으로, 유역 전역에 배치된 다양한 센서에서 수집된 데이터를 활용하여 잠재적인 홍수 사건을

예측하는 데 도움을 줌으로써 전반적인 홍수 관리 및 대응 능력을 향상시킨다

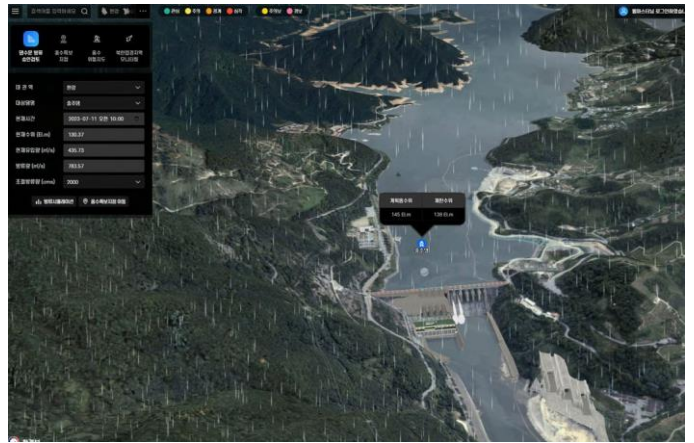


그림 1. 대한민국에서 디지털 트윈을 활용한 홍수 예보의 예. 출처: 한강홍수통제소, 환경부, 대한민국

몰입형 기술(메타버스 및 가상 현실)과 관련하여, 복잡하고 구체적인 수문학 데이터를 통합하는 것은 상당한 기술적 과제를 안고 있다. 그 결과, 지금까지의 대부분의 노력은 수자원 관리에 대한 다양한 이해관계자를 교육하기 위한 상호작용적이고 교육적인 시뮬레이션을 만드는 데 집중되어 있다. 예를 들어, 말레이시아는 최근 고등교육 학생들을 대상으로 메타버스 환경을 활용한 홍수 대비 교육을 연구했다(Sa Don 외, 2023). 이러한 연구는 몰입형 도구가 사용자가 홍수 위험 개념을 더 잘 이해하는 데 도움이 된다는 점을 입증했으며, 이는 실제 홍수 경험이 없는 사람들에게는 이해하기 어려울 수 있다. 전통적인 테이블탑 연습과 달리, 가상 현실(VR)은 상황의 심각성을 효과적으로 전달하고 홍수 관련 위험과 그 영향에 대한 인식을 높이는 데 사용될 수 있다. 최근 몇 년 동안, VR 및 시뮬레이션 기술은 재난 대비 및 대응을 강화하기 위해 더욱 널리 사용되고 있으며, 이는 정보 공유 시스템의 개발을 지원하는 샌다이 프레임워크의 목표와 일치한다(Alizadeh 외, 2023; Hsu 및 Gourbesville, 2023).

그러나 미래는 디지털 트윈이나 메타버스와 같은 단일 기술이 지배하는 것이 아니라, 여러 기술이 통합되는 방향으로 나아갈 가능성이 높다. 다양한 기술 발전을 결합하는 것이 혁신을 이끌고 복잡한 과제를 해결하는 열쇠가 될 것이다. 예를 들어, 핀란드 탐페레시는 여러 첨단 기술을 통합하는 메타버스 비전 2040을 발표했다(그림 2). 이 비전은 메타버스 환경이 AI, 디지털 트윈 및 가상 현실과 같은 기술을 통합하여 도시 관리, 지속 가능성, 평등 및 시민들의 복지를 향상시키는 방법을 탐구한다. 이 비전은 AI와 메타버스가 개인 맞춤형 서비스와 참여적 거버넌스를 촉진하는 미래 시나리오를 제시한다.



그림 2. 인지 도시의 개념도. 출처: Rantanen, 2023

격차와 도전과제

이러한 기술은 우리가 토지 및 수자원을 관리하는 능력을 크게 향상시키지만, 여전히 여러 격차와 과제가 남아 있다(Botai 외, 2023). 특히, 원격지 및 농촌 지역에서 데이터의 가용성과 품질의 제한이 이러한 기술의 효과를 저해한다. 또한, 다양한 출처의 데이터 형식과 기존 시스템, 도구 및 플랫폼과의 통합 문제로 인한 데이터 상호운용성의 부족이 중요한 과제가 될 수 있다. 이러한 기술로의 전환을 위해서는 충분한 디지털 인프라를 갖추고 교육 및 역량 강화가 필요하다.

지속 가능한 자금 조달 메커니즘 및 효과적인 거버넌스 프레임워크에 대한 접근이 부족하며, 대중의 신뢰와 이해가 개선되어야 한다. 또한, 기존의 법적 및 규제 프레임워크는 데이터 공유, 소유권, 의사 결정, 책임 및 지적 재산권과 같은 문제를 다루기 위해 이러한 기술의 사용에 맞게 조정될 필요가 있다. 이러한 기술을 채택할 때 데이터 거버넌스, 표준화, 교육 및 대중 인식을 다루는 강력한 정책을 마련하는 것이 중요하다(Amarnath, 2024).

앞으로의 전망: 디지털 트윈, 가상 현실 및 메타버스의 미래

미래를 내다보면, 토지 및 수자원 관리를 위해 이러한 신흥 기술에 투자하고 의존하기 전에 그 부가 가치와 한계를 이해하는 것이 중요하다. 그 결과, 이러한 기술의 원활한 채택을 보장하기 위해서는 다각적인 접근이 필요하다.

정부와 국제기구, 학계, 민간 부문을 포함한 조직은 고품질 데이터의 가용성을 개선하기 위한 종합적인 데이터 수집 이니셔티브에 투자해야 한다. 또한, 표준화 노력이 데이터 상호운용성 및 플랫폼과 시스템 간 통합 문제를 해결하는 데 도움이 될 수 있다(ITU, 2024).

투명한 의사소통 전략과 교육 캠페인은 이러한 기술 사용에 대한 대중의 신뢰와 이해를 구축하는 데 필수적이다. 기술이 발전함에 따라, 국제 협력과 지식 공유를 촉진하는 것이 점점 더 중요해지며, 이는 모범 사례와 혁신적 솔루션의 채택을 용이하게 한다. 이와 관련하여, 유엔과 세계기상기구(WMO) 및 국제전기통신연합(ITU)과 같은 전문 기관은 디지털 트윈과 메타버스를 SDGs를 해결하는 데 통합하는 노력을 발전시킬 수 있다. 이는 2024년 6월에 열린 첫 번째 유엔 가상 세계의 날에서 중점적으로 다루어진 주제였다(ITU, 2024).

디지털 트윈, VR 및 메타버스 간의 시너지는 우리가 가상 및 물리적 세계와 상호작용하는 방식을 혁신할 수 있는 잠재력을 가지고 있으며, 토지 및 수자원 관리에 있어서 의사 결정을 위한 모델링, 시뮬레이션, 시각화 및 실시간 상호작용에 대한 포괄적인 솔루션을 제공할 수 있다. 이러한 신흥 기술을 강력한 다자간 프레임워크 내에서 수용함으로써 우리는 토지 및 수자원을 더 잘 관리하고, 미래 세대를 위해 지속 가능하고 공정한 미래를 보장할 수 있다.

CHAPTER 5

지속 가능한 미래로 가는 길: 기상, 기후, 물, 관련 환경 및 사회 과학에 대한 초학문적 접근의 역할

기후 변화, 재난 위험 감소, 지속 가능한 발전과 같은 복잡한 글로벌 과제를 해결하려면 다양한 관점, 지식 및 경험이 지식 공동 창출과 해결책 구현에 어떻게 기여할 수 있는지에 대한 새로운 사고와 상상이 필요하다. 이러한 과제는 초학문적 접근을 통해 해결할 수 있다.

Authors: Irasema Alcántara-Ayala (Institute of Geography, National Autonomous University of Mexico), Coleen Vogel (Global Change Institute, University of the Witwatersrand, South Africa), Motoko Kotani (Tohoku University, Japan; ISC), Carla Mooney (Bureau of Meteorology, Australia), Mandira Singh Shrestha (International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD), Nepal), Osvaldo Luiz Leal de Moraes (CEMADEN, São Paulo, Brazil)

Photo: Dipayan Bose

주요 메시지

- 기후 변화, 재난 위험 감소 및 지속 가능 발전과 같은 글로벌 도전 과제는 단일 형태의 지식으로 해결할 수 없으며, 이들은 환경, 사회 및 문화적 맥락에서 실무자들이 협력하여 해결책을 공동 창출하고 구현하는 초학제적 접근 방식을 요구함
- 초학제적 접근 방식은 적절히 사용할 경우 기상, 기후, 물 및 관련 환경 및 사회 과학에서 제시된 관점의 영향을 증대시킬 수 있는 잠재력을 가지고 있으며, 다양한 관점, 지식 및 해결책을 가능하게 함
- 차세대가 미래 도전과제를 해결할 수 있도록 준비시키기 위해, 교육 및 훈련을 포함한 초학제적 철학 강화 및 장려 필요

서론

빈곤, 기아, 불평등 및 환경 악화와 같은 글로벌 도전 과제가 지속 가능한 발전을 위협하고 있다. 이러한 복합적인 도전 과제는 극한 기상 현상과 기후 변화의 영향으로 더욱 악화되는 경우가 많으며, 이는 세계에서 가장 취약한 지역 사회에 불균형적으로 영향을 미친다. 전통적인 접근 방식은 종종 자연 및 사회 과학, 정책 및 사회의 차원을 별개로 이해하는 데 초점을 맞추어 문제를 다룬다. 그러나 기후 변화, 재난 위험 감소 및 지속 가능 발전과 같은 복잡한 글로벌 도전 과제를 해결하기 위해서는 다양한 관점, 지식 및 경험이 어떻게 해결책을 공동 창출하고 구현하는 데 기여할 수 있는지를 재고하고 재구성하는 것이 필요하다.

이 장에서는 초학제(transdisciplinarity)의 개념을 소개하고 기상, 기후, 물 및 관련 환경 및 사회 과학의 맥락에서 초학제적 접근 방식이 어떻게 적용될 수 있는지를 탐구한다. 이러한 접근 방식은 과학을 지역 맥락에 적용하고 글로벌 목표 달성을 지원하기 위해 그 영향을 증대시키는 데 도움이 될 수 있다. 여기에는 파리 협정, 센다이 프레임워크 및 2030 지속 가능 발전 의제가 포함된다. 초학제적 접근 방식의 완전한 활용과 효과성을 제한하는 간극과 도전 과제가 존재하지만, 초학제성을 강화하기 위해 이해, 거버넌스, 협업 및 교육을 증진하고 이를 지원하는 환경을 조성할 기회가 확인되고 있다.

초학제성의 이해

초학제적 접근 방식은 과학자, 정책 입안자, 실무자 및 지역 사회, 토착민 공동체를 포함한 시민 사회와 같은 다양한 행위자를 모아 지식을 공동 창출하고 지역 맥락에 적합한 해결책을 개발하는 것이다. 이는 전문가들이 각기 다른 분야에서 동일한 문제를 별도로 작업하는 다학제적 접근 방식과는 다르다. 또한, 다양한 분야의 전문가들이 방법론과 연구 결과를 공유하여 더 나은 통합을 이루는 학제적 접근 방식과도 다르다. 초학제적 접근 방식은 자신의 분야를 넘어 협력하며 해결책을 찾기 위해 다양한 인식의 방식과 현실을 이해하는 것이 필요하다(Matsuura and Razak, 2019).

초학제적 접근 방식은 과학-정책-사회 인터페이스 전반에 걸쳐 적용될 수 있으며, 예를 들어 연구 방법(그림 1) 또는 정책이나 실천을 위한 프레임워크로 사용될 수 있다. 이 접근 방식은 문제를 집합적으로 정의하고, 해결 지향적인 지식을 공동 창출하며, 복잡한 사회적 문제를 해결하기 위해 이 지식을 통합하고 적용하는 것을 포함한다(Klein, 2001; Walter et al., 2007; Lang et al., 2012; Brandt et al., 2013; Bréthaut et al., 2019; Hoffmann et al., 2019; Norström et al., 2020; Bergmann et al., 2021; Kaiser and Gluckman, 2023). 이 과정 전반에 걸쳐, 참여적 방법이 자주 활용되어 행위자의 목소리, 경험, 관점 및 가치가 정당화되고 포함된다.



Photo: Indonesia Meteorological and Geophysical Agency, BMKG

집단 문제 정의는 다양한 행위자와 협력하여 문제에 대한 공유된 맥락 이해를 개발하는 것으로, 다양한 관점, 세계관 및 가치를 통합하는 과정을 포함한다(Brandt et al., 2013; Norström et al., 2020). 이 과정 전반에 걸쳐 행위자 간의 권력 비대칭 문제를 해결해야 하며, 이를 통해 그들의 관점, 문화적 규범 및 가치가 포함될 수 있도록 해야 한다 (Bréthaut et al., 2019; Hoffmann et al., 2019; Barth et al., 2023). 문제에 대한 이러한 공유된 이해는 해결 지향적인 지식의 공동 창출을 위한 기초를 마련하며, 이는 참여적 연구 또는 시민 과학과 같은 방법을 통해 달성될 수 있다. 이 과정에서 생성된 지식은 맥락화되고 지역 현실에 기반을 두어야 하며, 복잡한 문제를 효과적으로 해결하는 데 기여할 수 있어야 한다(Norström et al., 2020).

기상, 기후, 물, 관련 환경 및 사회 과학에 대한 초학제적 접근방식

기상, 기후, 물 및 기타 환경 시스템은 사회의 모든 측면에서 깊게 연결되어 있다. 따라서 기후 변화, 재난 위험 감소 및 지속 가능 발전과 같은 글로벌 도전 과제를 해결하기 위해서는 협력이 필수적이다. 초학제적 접근 방식은 다양한 행위자들이 기후 행동을 지원하기 위해 그들의 관점, 지식 및 해결책을 기여할 수 있도록 함으로써, 기상, 기후, 물 및 관련 환경 및 사회 과학에서 제공하는 관점의 영향을 증대시킬 수 있는 잠재력을 가지고 있다. 다양한 행위자를 참여시키면 기후 변화 문제를 해결하기 위한 정치적 약속과 글로벌 노력을 가속화할 수 있다(IPCC, 2023).

예를 들어, 과학자, 정책 입안자, 실무자, 지역 사회 및 토착민 공동체 등 다양한 행위자들을 초기에 참여시키면 기후 변화의 현장 영향에 대한 맥락적 이해를 발전시키는 데 기여할 수 있다. 이 과정에서 기상, 기후, 물 및 관련 환경 및 사회 과학의 범위를 넘어서는 경험과 지식이 의미 있는 관점을 제공할 수 있음을 인정하는 것이 중요하다. 이러한 관점은 기후 영향, 취약성 및 적응 능력에 대한 더 깊고 완전한 이해를 발전시키기 위해 인식되고 정당화되며 포함되어야 한다.

또한 일부 맥락에서는 시민 과학과 같은 참여적 방법을 사용하여 다양한 행위자가 과학 연구에 참여함으로써 기후 행동을 위한 지식의 공동 생산을 지원할 수 있다. 기상, 기후, 물 및 관련 환경 및 사회 과학의 맥락에서 이러한 방법은 지역 데이터를 식별하고 수집하여 기상 예보 및 기후 예측을 개선하고, 사용자의 피드백을 촉진하여 이러한 예보와 예측을 평가하고 검증하는 데 사용되었다(WMO, 2023).

지역 사회 참여는 과학을 향상시킬 뿐만 아니라 지역 사회의 환경 인식과 회복력을 높여 보다 포괄적이고 공정한 결과를 이끌어낸다(Paton and Buergett, 2019). 예를 들어, 프랑스의 기후 변화 적응에 관한 연구에서, 초학제적 접근 방식이 정책 입안자, 토지 관리자 및 지역사회 구성원 과 같은 적극적인 이해관계자 참여를 통해 과학적 연구와 지역지식을 통합하는데 사용되었다.



그림 1. 초학제적 접근의 기본 단계는 과학-정책-사회 인터페이스 전반에 적용될 수 있으며, 이 그림에서 강조된 연구의 맥락에서도 활용 가능. 출처: Irasema Alcántara

이 접근 방식은 기후 도전에 대한 포괄적인 이해를 촉진하여 지역 필요에 맞춘 동적인 적응 프레임워크를 결과로 이끌어냈다. 그 결과는 즉각적인 환경 문제를 해결하고 비슷한 기후 도전에 직면한 다른 산악 지역을 위한 확장 가능한 솔루션을 제공하는 강력하고 적응 가능한 모델이었다(Tschanz et al., 2022). 또 다른 예로, 아프리카 도시와 지역의 미래 회복력(FRACTAL) 프로젝트는 여러 아프리카 국가에서 초학제적 접근 방식을 사용하여 기후 과정과 정부 및 지역 사회의 복잡한 의사 결정을 더 잘 이해하기 위해 학습 실험실을 활용(Box 1)했다.

초학제적 접근 방식은 또한 다양한 행위자와 기관에 대한 신뢰를 향상시키고, 기상, 기후, 물 및 관련 환경 및 사회 과학, 다양한 지식, 데이터 및 정보를 활용하여 기후 행동을 위한 솔루션을 다양한 규모에서 구현할 수 있도록 권한을 부여한다. 예를 들어, 초학제적 접근 방식을 수용하고 다양한 행위자와 협력함으로써 국가기상기후 서비스(NMHSs)는 기상, 기후 및 물에 대한 권위 있는 목소리로서 신뢰를 구축할 수 있다. 공식 과학 외의 다양한 지식과 관점을 고려하는 것은 이러한 기관을 강화하고, 국가 기후 및 재난 위험 감소 우선 사항을 뒷받침하는 중요한 과학 정보를 제공할 수 있는 능력을 향상시키며, 파리 협정 및 재난 위험 감소를 위한 샌다이 프레임워크와 같은 글로벌 목표에 기여할 수 있다. 또한, 초학제적 접근 방식은 다양한 맥락에서 행위자들이 협력하고 지역 현실에 의해 정보가 제공되고 공감할 수 있는 잠재적인 과학 기반 솔루션을 구현할 수 있도록 권한을 부여한다. 결과적으로, 기후 행동, 지속 가능 발전 및 재난 위험 감소 이니셔티브가 보다 효과적이 되어 변화하는 글로벌 도전에 직면한 더 강력하고 회복력 있는 지역 사회를 이끌어낸다(Ismail-Zadeh et al., 2017).

Box 1. FRACTAL: 초학제적 접근방식의 실행

다양한 행위자와의 참여를 통해 아프리카 도시와 지역의 미래 회복력(FRACTAL) 프로젝트는 협력 기회를 창출하고, 문화적 및 제도적 통찰력을 드러내며, 기후 회복력을 강화하는 데 기여했다. 이는 도시 및 물 부문에서도 포함된다(Taylor et al., 2021; McClure et al., 2023). 이 프로젝트의 한 요소는 학습 실험실(Learning Labs)의 설립으로, 이는 다양한 지식 보유자와 협력하여 기후 과학이 다양한 행위자에 의해 어떻게 더 잘 제공되고 더 쉽게 공유될 수 있는지와 같은 중요한 문제를 식별하고 탐구하는 것을 포함했다(Jack et al., 2021). 예를 들어, 위험 정보가 데이터와 과학에 집중되는 대신, 과학적, 지역적 및 사회경제적 증거로 뒷받침된 그럴듯한 시나리오를 설명하는 서사적 접근 방식이 더 효과적임을 입증했다.

그 결과, 다양한 행위자와 의사 결정자들은 자신들의 맥락에서 필요한 기후 과학 정보를 참여하고, 질문하고, 공동 생산하게 되었다. FRACTAL 도시 학습 실험실 접근 방식은 지식의 공동 생산을 강조하며, 중요한 문제에 대한 상세한 검토를 가능하게 하고, 협력 과정을 통해 행위자 관계를 강화하며, 공동 문제 해결을 촉진하는 데 상당한 이점을 제공한다(Koele et al., 2019). 또한, 루사카, 빈트후크, 마푸토에서의 성공 사례를 통해 효과성을 입증했다. 루사카의 경우, FRACTAL 프로세스와 참여가 도시의 전략적 계획에 반영되었으며, 마푸토에서는 지역 자치 단체가 회복력 허브(resilience hub)를 구축하기 시작했고, 빈트후크는 이 접근 방식을 사용하여 통합 기후 변화 전략 및 행동 계획을 수립하는 데 도움을 주었다(Vincent et al., 2021).



그림 2. FRACTAL 연구 접근법은 초학제적이며, 측정 가능한 영향을 가지는 유용한 결과를 도출. 출처: FRACTAL project



그림 2. 초학제적 접근의 완전한 사용과 효과성, 잠재력을 제한하는 다양한 도전과제들. 출처: Irasema Alcántara

격차와 도전과제

초학제적 접근 방식은 과학, 지식 및 이해의 영향을 강화하여 실행 가능한 솔루션을 지원하는 데 큰 잠재력을 가지고 있다. 그러나 기상, 기후, 물 및 관련 환경 및 사회 과학 분야에서 이 접근 방식의 전체적인 사용과 효과를 제한하는 중대한 간극과 도전 과제가 여전히 존재한다 (그림 2). 이러한 분야는 전통적으로 경제 및 정치 과학과 같은 다른 형태의 지식, 관점 및 학문 분야와 분리된 상태를 유지해 왔다. 특히, 초학제적 접근 방식은 종종 학제간(interdisciplinary) 및 다학제적(multidisciplinary) 이라는 용어와 혼동되어 잘못 이해되는 경우가 많다. 이는 과학-정책-사회 간의 상호 작용에서 초학제적 접근 방식의 일관된 실행을 저해한다. 또한, 초학제에 중점을 둔 교육, 훈련 및 역량 강화의 격차가 이 접근 방식의 이해와 효과성을 제한하고 있다.

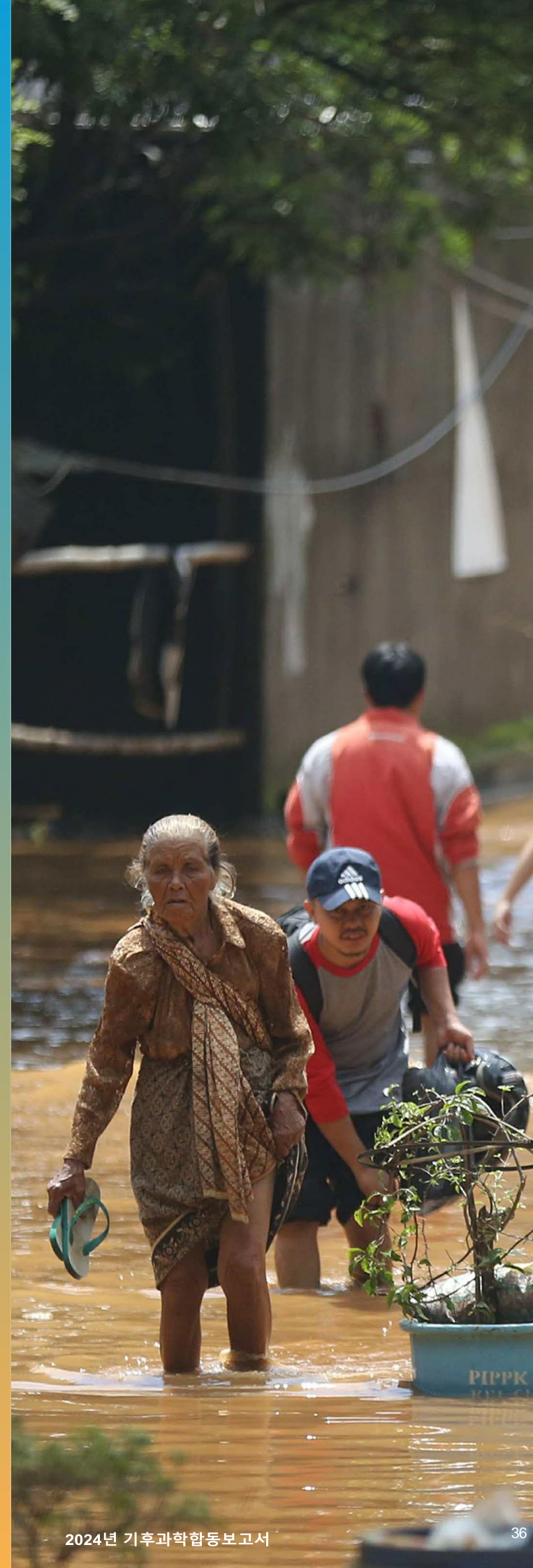
초학제적 접근 방식의 실질적인 구현은 또한 도전적이고 시간이 많이 소요된다. 다양한 행위자와의 협력과 커뮤니케이션은 관점을 효과적으로 통합하고, 지식을 공동 창출하며, 솔루션을 구현하는 데 필수적이다. 과학 커뮤니티에서는 학문 간 경계에 걸쳐져 있는 협력과 자금 활용을 저해하는 제도적 장벽과 학문적 구조가 존재한다. 또한, 문화적 및 사회적 규범은 다양한 행위자, 지식 시스템 및 학문 간의 효과적인 협력 및 커뮤니케이션에 도전 과제가 되며, 이는 참여하는 다양한 행위자 간의 신뢰를 구축하고 권력 역학에 도전하기 위해 상당한 시간과 자원을 필요로 한다.

마지막으로, 초학제적 노력의 지속 가능성과 유산을 보장하는 것은 지속적인 도전 과제로 남아 있으며, 사회적 영향과 결과를 효과적으로 평가하기 위해 장기적인 참여와 포괄적인 평가 프레임워크가 필요하다(Pohl and Hirsch Hadorn, 2008; Pohl, 2011). 또한, 다양한 맥락에서 성공적인 이니셔티브를 확장하기 위해 상당한 자원이 필요하다. 이러한 다면적인 도전 과제를 극복하는 것은 현재와 미래의 복잡한 사회적 및 환경적 문제를 해결하기 위한 전통 간 학제적 접근 방식을 발전시키는 데 필수적이다.

앞으로의 전망: 초학제성으로의 길

기후 변화, 재난 위험 감소 및 지속 가능 발전과 같은 복잡한 글로벌 도전 과제를 해결하기 위해서는 지속 가능한 솔루션을 공동 창출하고 지역 사회가 번창할 수 있도록 다양한 지식 시스템 간의 포괄적인 협력이 필요하다 (Matsumoto et al., 2022). 초학제적 접근 방식은 특히 기상, 기후, 물 및 관련 환경 및 사회 과학에 적용될 때 재난 위험 감소, 기후 변화 및 지속 가능 발전에 초점을 맞춘 국제 의제의 일관성과 영향을 향상시킬 수 있다(Bendito and Barrios, 2016). 그러나 앞으로 다양한 지식과 세계 가치를 수용하는 초학제적 접근 방식의 효과성을 향상시키기 위해서 거버넌스, 파트너십, 교육 및 훈련을 강화해야 할 것이다.

모든 수준에서 강력한 거버넌스와 제도는 초학제성을 촉진하는 환경을 조성하는 데 필수적이다. 자금 지원과 정책 프레임워크를 통한 지원은 초학제적 연구 및 실천을 강화하고, 행위자 및 기관 간 협력을 촉진하는 신뢰와 존중의 문화를 구축하는 데 기여할 수 있다. 예를 들어, 국제과학협의회(ISC)에서 시행한 지속 가능성 변혁(Transformation to Sustainability) 및 아프리카 2030 아젠다 통합연구선도(Leading Integrated Research for Agenda 2030 in Africa)와 같은 연구 기금 프로그램은 초학제적 접근 방식을 발전시키고 촉진하는 데 중요한 통찰력과 교훈을 제공한다(ISC, 2023; Paulavets et al., 2023; Moser, 2024; Mukute et al., 2024). 또한, 정부, 대학 및 시민 사회 조직 등 다양한 관심 있는 행위자 간의 공식적인 파트너십과 글로벌 네트워크를 구축하면 혁신을 촉진하고, 지식 교환을 촉진하며, 자원에 대한 접근을 용이하게 하고, 모범 사례의 전파를 가속화할 수 있다(Bharwani et al., 2023). 마지막으로, 향후 차세대가 미래의 도전 과제를 해결할 수 있도록 준비시키는 것이 중요하다. 초학제적 교육 및 훈련은 실무 경험 기회 및 멘토링 프로그램과 함께 수용되고 장려되어야 하며, 이는 과학-정책-사회 간의 인터페이스에서 초학제적 사고를 지닌 공동체를 육성하는 데 필요한 실질적인 기술을 제공한다.



CHAPTER 6

모두의 생명을 구하는 조기경보 시스템으로 보호받는 미래

자연 과학 및 사회 과학의 발전, 기술 혁신, 그리고 강력한 파트너십, 적절한 자원 및 역량 강화는 효과적인 다중재해 조기 경보 시스템의 기반을 형성하고 모두를 위한 조기 경보 이니셔티브를 지원한다.

Photo: Ade Bayu Indra

Authors: Daniela Cuéllar Vargas (WMO), Salla Himberg (IFRC),
Vanessa Gray (ITU), Rosie McDonald (ITU), Amélie Grangeat
(ITU)

주요 메시지

- 제한적에서 중간 정도의 다중재해 조기 경보 시스템(MHEWS) 범위를 가진 국가들은 상당히 포괄적인 범위를 가진 국가들보다 재난 관련 사망 비율이 거의 여섯 배 더 높음
- 인공지능(AI), 다중 채널 및 디지털 커뮤니케이션 플랫폼, 시민 과학과 같은 과학기술 및 도구의 혁신은 모두를 위한 조기 경보(EW4All) 이니셔티브를 지원하는 혁신적인 발전을 가능하게 함
- 자연 및 사회 과학 전반에 걸친 혁신을 활용하고, 강력한 파트너십, 적절한 자원 및 강화된 역량을 결합함으로써 EW4All을 달성하고 지속 가능한 발전 성과를 보호할 수 있음

서론

다중재해 조기 경보 시스템(MHEWS)은 기후 변화로 인해 점점 더 빈번하고 심각해지고 있는 위험한 기상 사건의 부정적인 영향을 완화하는 데 중요하다. 모두를 위한 조기 경보(Early Warnings for All, EW4All) 이니셔티브는 유엔 사무총장이 시작한 혁신적인 노력으로, 2027년까지 지구상의 모든 사람이 생명을 구하는 조기 경보 시스템을 통해 위험한 기상, 수자원 또는 기후 현상으로부터 보호받을 수 있도록 하는 것을 목표로 한다. EW4All은 적응, 손실, 피해의 최소화, 그리고 회복력 구축에 대한 국가적인 노력을 지원한다. 또한, 유엔 사무총장의 기후 행동 가속화 의제의 일환으로, 이 이니셔티브는 기후 변화의 최전선에 있는 사람들에게 기후 정의를 제공하고, 파리 협정, 샌다이 재해 위험 감소 프레임워크, 그리고 2030 지속 가능 발전 의제와 같은 글로벌 목표와 일치한다.

이 보고서 전반에 걸쳐 강조된 바와 같이, 자연 및 사회 과학, 기술 발전, 그리고 초학제적 접근 방식은 효과적인 MHEWS의 기반이 된다. 인공지능(AI), 우주 기반 지구 관측 및 몰입형 기술의 발전은 기상 예보를 개선하고, 복잡한 정보를 의사결정을 위해 맥락화 및 전달하며, 다양한 위험 시나리오 및 잠재적 영향을 시각화하여 예방 행동을 지원하는 상호작용적 교육 시뮬레이션을 생성함으로써 이 중요한 이니셔티브에 기여할 수 있다. 또한, 시민 과학과 같은 참여적 방법을 포함한 다양한 관점, 지식 및 경험을 수용하는 초학제적 접근 방식은 지역적 맥락에 적합한 지식 및 솔루션의 공동 개발을 통해 MHEWS의 효과를 향상시킬 수 있다.

따라서, EW4All은 글로벌 노력이 어떻게 이질적인 요소들을 통합하여 응집력 있고 포괄적인 시스템으로 변화시키고, 동시에 자연재해로부터 생명과 생계를 보호하는 혁신을 촉진할 수 있는지를 보여준다.

글로벌 다중재해 조기 경보 시스템의 긴급한 필요성

전 세계의 국가들은 이미 기후 변화의 영향을 느끼고 있으며, 이는 생명, 생계 및 환경을 보호하기 위해 MHEWS의 중요한 격차를 해소해야 할 긴급한 필요성을 강조한다. 증거에 따르면, 제한적에서 중간 정도의 MHEWS 범위를 가진 국가들은 상당히 포괄적인 범위를 가진 국가들보다 재난 관련 사망 비율이 거의 여섯 배 더 높다.

국가 역량 및 MHEWS 범위 향상에 있어 진전이 있었으며, 현재 전 세계의 절반 이상 국가들이 MHEWS를 보유하고 있다고 보고하고 있다. 글로벌 다중재해 조기 경보 시스템 현황 보고서(WMO 및 UNDRR, 2023)에 따르면, 101개국, 즉 전 세계 국가의 52%가 MHEWS의 존재를 보고했다. 이는 2022년 보고서에 비해 증가한 것이며, 2015년 기준치에서 두 배로 증가한 것이다(그림 1). 특히, 아랍 국가 및 아시아 태평양, 유럽 및 중앙 아시아의 국가들은 MHEWS 범위에서 상당한 증가를 보고했다. 그러나 많은 지역에서 진전이 있었지만, 아프리카, 아메리카 및 카리브해 지역 등에서는 여전히 상당한 범위의 격차가 존재한다. 또한, 최빈국(LDC) 및 소도개발국(SIDS)에서의 진전은 낮은 수준으로, 50% 미만이 MHEWS 범위를 보고하고 있다.

모두를 위한 조기 경보를 위한 혁신적인 과학기술 및 혁신

종합적이고 사람 중심의 MHEWS는 그림 2에 표시된 네 가지 상호 연결된 기둥을 기반으로 구축되어 가치 주기를 생성한다. 과학, 기술 및 혁신은 재난 위험 지식 정보 제공부터 관측, 모니터링, 분석 및 예측을 발전시키고 경고 전파 및 예방 행동을 가능하게 하는 모든 MHEWS의 기둥을 뒷받침한다. 예를 들어, 위성 이미지와 AI는 데이터 수집 및 표준화에 도움을 줄 수 있으며, 다중 채널 및 디지털 커뮤니케이션 플랫폼은 경고의 효과적인 전파를 제공한다. 특히, 자연 및 사회 과학과 기술 혁신은 전략적 위험 커뮤니케이션, 영향 기반 예측 및 경고, 공통 경보 프로토콜(CAP) 및 예방 행동 등 여러 주요 영역에서 EW4All 이니셔티브를 지원하는 혁신적인 발전을 제공할 수 있다(그림 3).



그림 1. MHEWS를 보유하고 있다고 보고한 국가 수. 출처: WMO and UNDRR, 2023

전략적 위험 커뮤니케이션은 취약성, 위험 및 노출에 대한 정보를 수집, 집계, 처리 및 요약하는 과정을 포함한다. 이 정보는 시기 적절하고 정확하며 이해하기 쉬워야 하며, 행동을 유도할 수 있어야 한다. 데이터 집계 플랫폼(예: 지리 정보 시스템(GIS))과 같은 기술 도구는 데이터를 시각화할 수 있도록 지원한다. 또한, 가상 현실과 같은 몰입형 기술은 홍수 위험 개념을 이해하는 데 도움을 주어, 홍수 사건을 직접 경험하지 못한 사람들에게 어려울 수 있는 재해 위험 지식을 향상시키고 전략적 위험 커뮤니케이션을 강화하고 있다. AI와 기계 학습의 급속한 발전은 대량의 원시 위성 이미지를 처리하여 인구 및 건축물과 같은 노출에 대한 표준화된 기본 데이터를 생성하는 데 활용될 수 있다. 예를 들어, 벨리즈에서는 ML 기반 매핑을 사용하여 해당 국가의 주요 해안 및 해양 생태계 상태에 대한 업데이트된 추정치를 제공했다. 이는 위험 지식을 개선하는 데 중요한 통찰을 제공할 뿐만 아니라 벨리즈의 국가 적응 계획에도 정보를 제공했다(GEO, 2023).

영향 기반 예측 및 경고는 물리적 수문 기상 위험에 대한 전통적인 예측과 이러한 위험에 대한 사회적 노출 및 취약성 이해를 통합하여 의사결정을 정보화하고 사회에 대한 영향을 줄이며 지속 가능한 발전을 보장하는 데 도움을 준다(Golding, 2022). AI와 우주 기반 지구 관측을 포함한 과학적 및 기술적 발전은 기상 모델을 혁신하여 해상도, 정확성 및 관련성을 향상시켰다. 예를 들어, 인도네시아에서는 기상 및 재해 관리 기관이 함께 Signature라는 시스템을 개발하여 다양한 수문 기상 위험에 대한 영향 기반 예측을 생산하고 보정하기 위한 기상 예측 및 분석 모델을 만들었다(BMKG, 2024). 또한, 지표 기반 기상 및 기후 관측은 날씨 조건을 지속적으로 모니터링하고 영향 기반 예측을 정보화하기 위해 역사적 및 실시간 데이터를 제공하는 데 필수적이다. 예를 들어, 우간다에서는 지상 관측 데이터와 위성 기반 데이터를 사용하여 역사적인 가뭄으로 인한 작물 실패를 분석하여 정부가 사전 조치를 위한 재해 위험 재정 촉발을 위한 미리 정해진 위험 기준 값을 설정할 수 있었다(Nakalembe 및 Kotani, 2022).

CAP는 다양한 플랫폼과 시스템 전반에서 경고 통신을 표준화하여 중요한 정보가 시기 적절하고 정확하며 일관된 형식으로 전달되도록 개발되었다. 다중 채널 경고 배포와 같은 기술 발전은 셀 방송, 위치 기반 SMS, 이메일, 소셜 미디어 및 사이렌 등 여러 채널을 사용하여 경고 전파 및 커뮤니케이션을 개선했다. 여러 채널을 사용하는 것은 경고가 다양한 청중에게 도달하고 그들의 특정 요구에 부응하도록 보장한다. 또한, 상호운용 가능한 커뮤니케이션 플랫폼은 국가 수문 기상 및 긴급 대응 기관과 같은 다양한 시스템과 기관 간의 원활한 통신을 촉진할 수 있다. 사용되는 기술에 관계없이, 경고 시스템은 통합되어야 하며 표준화된 통신을 위해 CAP를 준수하는 것이 중요하다.

예방 행동은 충격이 발생하기 전이나 심각한 영향이 느껴지기 전에 잠재적인 재해 영향을 예방하거나 완화하기 위해 취해지는 일련의 행동으로 정의된다(IFRC, 2022). 이러한 행동은 위험 지식, 예측에 기반한 촉진(trigger), 그리고 특정 위험에 대한 효과적인 경고 전파 및 커뮤니케이션에 기반한다. 시나리오 분석은 GIS 또는 가상 현실과 같은 도구를 사용하여 다양한 위험 시나리오와 그 잠재적 영향을 시뮬레이션하고 시각화하여 예방 행동을 위한 계획 및 의사결정에 도움을 준다. 예방 행동을 지원할 수 있는 또 다른 도구는 시민 과학으로, 다양한 참여자가 지식의 공동 생산과 지역 맥락에서의 예방 솔루션 실행에 참여하는 초학제적 참여 방법이다. 예를 들어, 시민들이 상승하는 수위나 기상 패턴과 같은 위험의 초기 징후를 보고할 수 있는 모바일 앱을 사용하는 것이 있다. 이는 당국에 실시간 데이터를 제공한다. 또한, 지역 주민들이 지역 관측 및 지식을 기여할 수 있는 데이터 플랫폼을 활용하여 공식 데이터 세트를 풍부하게 할 수 있으며, 이는 예방 행동의 기초가 된다.

A future where everyor

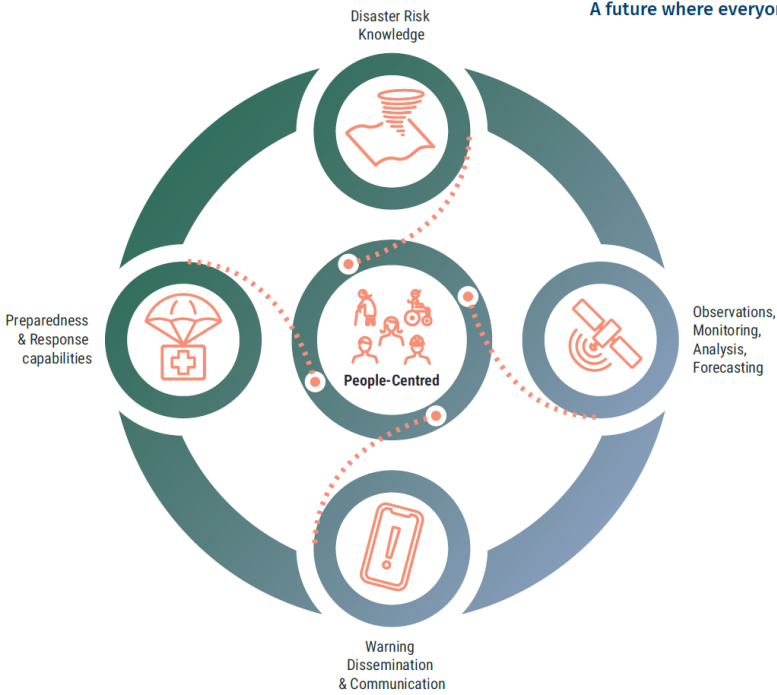


그림 2. 사람 중심, end-to-end MHEWS는 4개의 상호작용하는 기둥으로 구축됨: (1) 재난 위험 지식, (2) 관측, 모니터링, 분석, 예측, (3) 경고 전파 및 커뮤니케이션, (4) 대응 및 대비 역량

→ 전략적 위험 커뮤니케이션

시민 보고 도구: 시민들이 상승하는 수위, 비정상적인 기상 패턴과 같은 위험의 초기 징후를 보고할 수 있는 모바일 앱을 개발하고, 이를 통해 실시간 데이터를 당국에 제공

AI 및 ML: AI를 활용하여 대량의 데이터 세트를 처리하고 이를 실행 가능한 통찰력으로 정제

→ 영향 기반 예측 및 경고

고급 기상 모델링: 위험, 취약성, 노출 데이터를 통합한 고해상도 기상 모델 구현

AI 예측 분석: AI 기반 예측 분석을 사용하여 예측의 정확성과 관련성 향상

원격 탐지: 위성 이미지 및 원격 탐지 기술을 활용하여 환경 변화와 위험 모니터링 및 예측

자동 기상 관측소: 원격 지역에 자동 관측소를 배치하여 기상 조건을 지속적으로 모니터링하고 예측 행동을 위한 이터 제공

→ 공통 경보 프로토콜

통합 경보 시스템: 표준화된 의사소통을 위해 공통 경보 프로토콜(CAP)을 준수하는 시스템 개발

다중 채널 경보 분배: 다양한 채널(셀 브로드캐스트, SMS, 이메일, 소셜미디어, 사이렌)을 사용하여 경보가 다양한 대상에게 도달하게 함

상호 운용 가능한 통신 플랫폼: 서로 다른 기관 및 시스템 간의 원활한 통신을 촉진하는 플랫폼 구현

→ 사전 조치

시민 보고 도구: 시민들이 위험의 초기 징후(예, 수위 상승, 이상 기후 패턴)를 보고할 수 있는 모바일 앱을 사용하여 실시간 데이터를 당국에 제공

커뮤니티 기반 자료 수집: 커뮤니티 구성원들이 지역 관찰 및 경험을 제공하여 공식 데이터세트를 풍부하게 할 수 있는 플랫폼 활용

시나리오 분석: GIS 도구를 사용하여 다양한 위험 시나리오와 잠재적 영향을 모의하고 시각화하여 계획 및 의사결정에 도움 제공

그림 3. EW4All 이니셔티브를 지원하기 위해 자연 및 사회 과학, 기술적 혁신이 획기적인 발전을 가져올 수 주요 분야

Box 1. 재난 연결성 지도를 위한 인공지능 활용

국제전기통신연합(ITU)은 재난 발생 시 및 이후에 하위 국가 수준의 연결성 평가를 개선하여 고위험 지역에서 보다 효과적인 통신을 촉진하는 AI 기반의 고급 시각화 도구 개발을 선도하고 있다. 2020년에 유엔 긴급통신클러스터 및 GSM 협회(GSMA)와 함께 시작된 재난 연결성 지도는 30개국 이상에서 50회 이상 활성화되어, 1차 대응자, 유엔 기관 및 정부에 통신 네트워크 상태에 대한 거의 실시간 정보를 제공하고 있다(ITU, 2024a). 이 도구는 AI를 활용하여 위성 이미지를 신속하게 분석하고 고해상도, 시간 기반 인구 밀도 지도를 생성한다. 또한, 연결성 데이터를 처리하고 시각화하여 역사적 기준선 및 실시간 성과 지도를 제공한다. 이 도구는 통신 커버리지의 격차를 식별하고 조기 경고 알람을 전파하기 위해 어떤 메시징 채널(고급 브로드밴드, 2G SMS, 3G+ 등)이 가능한지를 평가함으로써 EW4All을 지원하는 데 중요한 역할을 한다. 네트워크 커버리지 부족으로 인해 긴급 경고를 받을 수 없는 오프라인 인구를 정량화함으로써, 이 도구는 재난 발생 전후에 조기 경고 시스템의 도달 범위와 효과성을 판단하는 데 도움을 준다. 피지, 통가, 바누아투에서 초기 파일럿이 진행 중이며, 재난 대응 및 연결성 회복력을 향상시키기 위해 EW4All에 참여하는 추가 국가로 확대할 계획이다(ITU, 2024b).

격차와 도전과제

과학기술의 발전과 MHEWS의 생명을 구하고 손실과 피해를 최소화하며 지속 가능한 개발 성과를 보호할 수 있는 놀라운 잠재력에도 불구하고, 포괄적인 MHEWS의 완전한 성취를 방해하는 격차와 도전 과제가 존재한다. 예를 들어, 역사적 손실 및 피해에 대한 정보와 위험한 사건의 추세, 그리고 위험에 대한 예측 능력이 부족한 것이 중요한 장벽이다. 특히 아랍 국가 및 최빈국(LDC)에서 위험 지식을 개선하여 MHEWS의 효과성을 높이기 위한 긴급한 행동이 필요하다. 또한, 관측, 모니터링 및 예측이 불충분하여 데이터 격차가 여전히 크다. 지표 및 고층 대기 기상 관측 데이터는 대기 상태를 예측하는 컴퓨터 모델의 필수 입력으로, 국가수문기상서비스(NMHS)가 고강도 기상 사건의 위치, 강도, 가능성을 예측하는 데 의존하고 있다. 그러나 아프리카 대륙의 대부분과 태평양 일부 지역에서 이러한 필수 데이터의 중요한 격차가 지속되고 있다(WMO 및 UNDRR, 2023).

과학과 기술, 특히 연결 기술의 발전에도 불구하고, 일부 지역사회와 인구는 여전히 접근하기 어렵고 지원하기 힘든 상황이다. 제한된 통신 채널은 고립된 지역사회 및 여성, 아동, 노인, 장애인 등 취약한 인구에게 효과적으로 도달하는 데 장벽이 될 수 있다. 또한, 기술 자원, 인적 역량 및 지속 가능한 자금 부족의 격차가 모든 수준에서 어려움을 제시하며, 여기에는 예측 제품 개발에서부터 가능한 사전 조치, 지역 사회 리더들이 SMS나 인터넷으로 경고를 받을 수 있도록 충분한 신용이나 데이터를 확보하는 데 필요한 즉각적인 기금을 제공하는 것까지 포함된다(WMO 및 UNDRR, 2023).

앞으로의 전망: 모두를 위한 조기 경보 시스템 혁신 활용

MHEWS의 격차와 도전 과제를 해결하기 위해서는 자연과 사회 과학 전반에 걸친 혁신을 활용하는 다각적인 접근이 필요하며, 이는 강력한 파트너십, 적절한 자원 및 향상된 역량과 함께 이루어져야 한다. 고급 센서 네트워크, 우주 기반 지구 관측 및 사물인터넷(IoT)을 통한 데이터 수집 및 모니터링의 향상은 극단적이고 위험한 사건에 대한 기상 예측을 개선할 수 있다.

또한, 위험 지식은 기술을 통해 개선되며, 지역 행위자들이 드론과 스마트폰 애플리케이션을 사용하여 원거리에서 정보를 수집하고 모바일 인터넷을 통해 신속하게 공유할 수 있는 기회가 증가하고 있다. 특히 이동통신 네트워크와 인터넷 연결 측면에서 경보 통신 및 전파를 위한 과학, 기술 및 혁신의 발전을 활용할 수 있는 상당한 기회가 있으며, 이는 외딴 지역과 취약한 공동체에 도달하는 데 도움이 된다. 또한, 교육 캠페인을 통한 대중의 이해 증진, 역량 강화 이니셔티브를 통한 기술 자원의 강화, AI와 같은 최첨단 기술의 활용은 보다 회복력 있고 반응적인 시스템을 만드는 데 기여할 것이다(WMO 및 UNDRR, 2023).

이러한 발전을 이루기 위해서는 정부, 비정부 기구, 민간 부문, 과학자 및 지역 사회를 포함한 다양한 행위자를 통합하는 강력한 공공-민간 파트너십이 필요하다. 이러한 시스템의 개발 및 유지 관리를 지원하기 위해서는 적절한 자금 및 투자가 필수적이며, 모든 지역, 특히 가장 취약한 지역이 MHEWS를 구현하고 지속할 수 있는 기술적 기술과 인프라를 갖추도록 역량 강화 노력이 필요하다. EW4All 이니셔티브는 세계적인 노력을 통합하여 불연속적인 요소를 응집력 있고 포괄적인 시스템으로 변화시키고, 자연 재해로 인한 위험 증가로부터 생명과 생계를 보호하는 혁신을 촉진하는 방법을 보여준다.

별첨

데이터 세트

전지구 기온 데이터 세트

Berkeley Earth: Rohde, R. A.; Hausfather, Z. The Berkeley Earth Land/Ocean Temperature Record. *Earth System Science Data* 2020, 12, 3469–3479. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3469-2020>.

ERA5: Hersbach, H.; Bell, B.; Berrisford, P. et al. *ERA5 Monthly Averaged Data on Single Levels from 1940 to Present*; Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2023. <https://doi.org/10.24381/cds.f17050d7>.

GISTEMP: GISTEMP Team, 2022: *GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP), version 4*. NASA Goddard Institute for Space Studies, <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>. Lenssen, N.; Schmidt, G.; Hansen, J. et al. Improvements in the GISTEMP Uncertainty Model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 2019, 124, 6307–6326. <https://doi.org/10.1029/2018JD029522>.

HadCRUT5: Morice, C. P.; Kennedy, J. J.; Rayner, N. A. et al. An Updated Assessment of Near-surface Temperature Change From 1850: The HadCRUT5 Data Set. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 2021, 126, e2019JD032361. <https://doi.org/10.1029/2019JD032361>. HadCRUT.5.0.1.0 data were obtained from

<http://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadcrut5>

on 1 March 2023 and are © British Crown Copyright, Met Office 2024, provided under an Open Government Licence, <http://www.nationalarchives.gov.uk/doc/open-government-licence/version/3/>.

JRA-3Q: Kosaka, Y.; Kobayashi, S.; Harada, Y. et al. The JRA-3Q Reanalysis. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II* 2024, 102 (1), 49–109. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2024-004>.

NOAAGlobalTemp v6.0: Huang, B.; Yin, X.; Menne, M. J. et al. Improvements to the Land Surface Air Temperature Reconstruction in NOAAGlobalTemp: An Artificial Neural Network Approach. *Artificial Intelligence for the Earth Systems* 2022, 1, e220032. <https://doi.org/10.1175/AIES-D-22-0032.1>. Huang, B.; Yin, X.; Menne, M. J. et al. *NOAA Global Surface Temperature Dataset (NOAAGlobalTemp), Version 6.0.0* [Global Mean]. NOAA National Centers for Environmental Information.

<https://doi.org/10.25921/rzxcg-p717>.

해양 열 용량 데이터 세트

Cheng, L.; Trenberth, K. E.; Fasullo, J. et al. Improved Estimates of Ocean Heat Content from 1960 to 2015. *Science Advances* 2017, 3, e1601545. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601545>.

Church, J. A.; White, N. J.; Konikow, L. F. et al. Revisiting the Earth's Sea-level and Energy Budgets from 1961 to 2008. *Geophysical Research Letters* 2011, 38. <https://doi.org/10.1029/2011GL048794>.

Desbruyères, D. G.; Purkey, S. G.; McDonagh, E. L. et al. Deep and Abyssal Ocean Warming from 35 Years of Repeat Hydrography. *Geophysical Research Letters* 2016, 43, 310–356. <https://doi.org/10.1002/2016GL070413>.

Desbruyères, D.; McDonagh, E. L.; King, B. A. et al. Global and Full-Depth Ocean Temperature Trends during the Early Twenty-First Century from Argo and Repeat Hydrography. *Journal of Climate* 2017, 30, 1985–1997. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0396.1>.

Domingues, C. M.; Church, J. A.; White, N. J. et al. Improved Estimates of Upper-ocean Warming and Multi-decadal Sea-level Rise. *Nature* 2008, 453, 1090–1093. <https://doi.org/10.1038/nature07080>.

Gaillard, F.; Reynaud, T.; Thierry, V. et al. In Situ-based Reanalysis of the Global Ocean Temperature and Salinity with ISAS: Variability of the Heat Content and Steric Height. *Journal of Climate* 2016, 29, 1305–1323. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0028.1>.

Good, S. A.; Martin, M. J.; Rayner, N. A. EN4: Quality Controlled Ocean Temperature and Salinity Profiles and Monthly Objective Analyses with Uncertainty Estimates. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 2013, 118, 6704–6716. <https://doi.org/10.1002/2013JC009067>.

Hosoda, S.; Ohira, T.; Nakamura, T. A Monthly Mean Dataset of Global Oceanic Temperature and Salinity Derived from Argo Float Observations. *JAMSTEC Report of Research and Development* 2008, 8, 47–59. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jamstecr/8/0/8_0_47/_article.

Ishii, M.; Fukuda, Y.; Hirahara, S. et al. Accuracy of Global Upper Ocean Heat Content Estimation Expected from Present Observational Data Sets. *SOLA* 2017, 13, 163–167. <https://doi.org/10.2151/sola.2017-030>.

Kuusela M.; Stein, M. L. Locally Stationary Spatio-temporal Interpolation of Argo Profiling Float Data. *Proceedings of the Royal Society A* 2018, 474, 20180400. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2018.0400>.

Kuusela, M.; Giglio, D. Global Ocean Heat Content Anomalies based on Argo Data (2.0.0). *Zenodo* 2023. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7562281>.

Levitus, S.; Antonov, J. I.; Boyer, T. P. et al. World Ocean Heat Content and Thermoclinic Sea Level Change (0-2 000 m) 1955–2010. *Geophysical Research Letters* 2012, 39, L10603. <https://doi.org/10.1029/2012GL051106>.

Li, H.; Xu, F.; Zhou, W. et al. Development of a Global Gridded Argo Data Set with Barnes Successive Corrections. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 2017, 122, 866–889. <https://doi.org/10.1002/2016JC012285>.

Li, Y.; Church, J. A.; McDougall, T. J. et al. Sensitivity of Observationally Based Estimates of Ocean Heat Content and Thermal Expansion to Vertical Interpolation Schemes. *Geophysical Research Letters* 2022, 49, e2022G. <https://doi.org/10.1029/2022GL101079>.

별첨

데이터 세트

Lyman, J. M.; Johnson, G. C. Estimating Global Ocean Heat Content Changes in the Upper 1800 m since 1950 and the Influence of Climatology Choice. *Journal of Climate* 2014, 27, 1945–1957. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00752.1>.

Minière, A.; von Schuckmann, K.; Sallée, J.-B. et al. Robust Acceleration of Earth System Heating Observed over the Past Six Decades. *Sci Rep* 2023, 13 (1), 22975. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49353-1>.

Roemmich, D.; Gilson, J. The 2004–2008 Mean and Annual Cycle of Temperature, Salinity, and Steric Height in the Global Ocean from the Argo Program. *Progress in Oceanography* 2009, 82, 81–100. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.03.004>.

Roemmich, D.; Church, J.; Gilson, J. et al. Unabated Planetary Warming and its Ocean Structure Since 2006. *Nature Climate Change* 2015, 5, 240. <https://doi.org/10.1038/nclimate2513>.

von Schuckmann, K.; Le Traon, P.-Y. How Well Can We Derive Global Ocean Indicators from Argo Data? *Ocean Science* 2011, 7, 783–791. <https://doi.org/10.5194/os-7-783-2011>. Data available at: <https://marine.copernicus.eu/access-data/ocean-monitoring-indicators>.

Wijffels, S.; Roemmich, D.; Monselesan, D., et al. Ocean Temperatures Chronicle the Ongoing Warming of Earth. *Nature Climate Change* 2016, 6, 116–118. <https://doi.org/10.1038/nclimate2924>.

해빙 데이터 세트

EUMETSAT Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility, Sea-ice Index 1979-Onwards (v2.1, 2020), OSI-420, Data Extracted from OSI SAF FTP Server: 1979–2020, Northern and Southern Hemisphere.

Fetterer, F.; Knowles, K.; Meier, W. N. et al., 2017, updated daily. Sea Ice Index, Version 3. Boulder, Colorado, USA. National Snow and Ice Data Center (NSIDC), <https://nsidc.org/data/G02135/versions/3>.

Lavergne, T. Sørensen, A. M.; Kern, S. et al. Version 2 of the EUMETSAT OSI SAF and ESA CCI Sea Ice Concentration Climate Data Records. *The Cryosphere* 2019, 13 (1), 49–78. <https://doi.org/10.5194/tc-13-49-2019>.

기후과학 현황 : 긴급하고 야심 찬 기후 행동의 필요성

- Canadell, J. G.; Poulter, B.; Bastos, A. et al. Chapter 1 – Balancing Greenhouse Gas Sources and Sinks: Inventories, Budgets, and Climate Policy. In *Balancing Greenhouse Gas Budgets*; Poulter, B., Canadell, J. G., Hayes, D. J., Thompson, R. L., Eds.; Elsevier, 2022; 3–28. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814952-2.00024-1>.
- Cheng, L.; Trenberth, K. E.; Fasullo, J. et al. Improved Estimates of Ocean Heat Content from 1960 to 2015. *Science Advances* 2017, 3 (3), e1601545. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601545>.
- Clarke, B.; Barnes, C.; Rodrigues, R. et al. *Climate Change, El Niño and Infrastructure Failures behind Massive Floods in Southern Brazil*; 2024. <https://doi.org/10.25561/111882>.
- Ernst, Y.; Archibald, S.; Balzter, H. et al. The African Regional Greenhouse Gases Budget (2010–2019). *Global Biogeochemical Cycles* 2024, 38 (4), e2023GB008016. <https://doi.org/10.1029/2023GB008016>.
- Friedlingstein, P.; O'Sullivan, M.; Jones, M. W. et al. Global Carbon Budget 2023. *Earth System Science Data* 2023, 15 (12), 5301–5369. <https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Summary for Policymakers. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*; Pörtner, H.-O.; Roberts, D. C.; Masson-Delmotte, V. et al., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York, USA, 2019. <https://www.ipcc.ch/srocc/>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Pirani, A. et al., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York, USA, 2021. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Core Writing Team; Lee, H.; Romero, J., Eds.; IPCC, Geneva, 2023. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>.
- Kimutai, J.; Zachariah, M.; Nhantumbo, B. et al. El Niño Key Driver of Drought in Highly Vulnerable Southern African Countries; Imperial College London, 2024. <https://doi.org/10.25561/110770>.
- Purich, A.; Doddridge, E. W. Record Low Antarctic Sea Ice Coverage Indicates a New Sea Ice State. *Communications Earth and Environment* 2023, 4 (1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00961-9>.
- Saunois, M.; Martinez, A.; Poulter, B. et al. Global Methane Budget 2000–2020. *Earth System Science Data Discussions* 2024, 1–147. <https://doi.org/10.5194/essd-2024-115>.
- Thiem, H. *Category 5 Hurricane Beryl Makes Explosive Start to 2024 Atlantic Season*; National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Climate.gov, 2024. <https://www.climate.gov/news-features/event-tracker/category-5-hurricane-beryl-makes-explosive-start-2024-atlantic-season>.
- Tian, H.; Pan, N.; Thompson, R. L. et al. Global Nitrous Oxide Budget 1980–2020. *Earth System Science Data* 2024, 16 (6), 2543–2604. <https://doi.org/10.5194/essd-16-2543-2024>.
- Trewin, B.; Cazenave, A.; Howell, S. et al. Headline Indicators for Global Climate Monitoring. *Bulletin of the American Meteorological Society* 2021, 101 (1), E20–E37. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0196.1>.
- United Nations Environment Programme (UNEP). *Emissions Gap Report 2023: Broken Record - Temperatures Hit New Highs, Yet World Fails to Cut Emissions (Again)*; UNEP: Nairobi, 2023a. <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2023>.
- United Nations Environment Programme (UNEP). *Adaptation Gap Report 2023: Underfinanced. Underprepared. Inadequate Investment and Planning on Climate Adaptation Leaves World Exposed*; UNEP: Nairobi, 2023b. <https://www.unep.org/resources/adaptation-gap-report-2023>.
- United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (OCHA). *Brazil: Floods in Rio Grande do Sul - United Nations Situation Report, as of 12 July 2024*; Reliefweb, 2024. <https://reliefweb.int/report/brazil/brazil-floods-rio-grande-do-sul-united-nations-situation-report-12-july-2024>.
- Villalobos, Y.; Canadell, J. G.; Keller, E. D. et al. A Comprehensive Assessment of Anthropogenic and Natural Sources and Sinks of Australasia's Carbon Budget. *Global Biogeochemical Cycles* 2023, 37 (12), e2023GB007845. <https://doi.org/10.1029/2023GB007845>.
- World Glacier Monitoring Service (WGMS). *Global Glacier Change Bulletin No. 5 (2020-2021)*; Zemp, M.; Gärtner-Roer, I.; Nussbaumer, S. U. et al., Eds. (based on database version: doi:10.5904/wgms-fog-2023-09); WGMS: Zurich, Switzerland, 2023. https://wgms.ch/downloads/WGMS_GGCB_05.pdf.
- World Meteorological Organization (WMO). *WMO Greenhouse Gas Bulletin (GHG Bulletin), No. 19: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2022*; WMO: Geneva, 2023.
- World Meteorological Organization (WMO). *Global Temperature Record Streak Continues, as Climate Change Makes Heatwaves More Extreme*; WMO: Geneva, 2024a. <https://wmo.int/media/news/global-temperature-record-streak-continues-climate-change-makes-heatwaves-more-extreme>.
- World Meteorological Organization (WMO). *WMO Confirms that 2023 Smashes Global Temperature Record*; WMO: Geneva, 2024b. <https://wmo.int/media/news/wmo-confirms-2023-smashes-global-temperature-record>.
- World Meteorological Organization (WMO). *WMO Global Annual to Decadal Climate Update - Target Years: 2024 and 2024-2028*; WMO: Geneva, 2024c.

인공지능과 기계학습: 날씨 예보 혁신

- Bi, K.; Xie, L.; Zhang, H. et al. Accurate Medium-Range Global Weather Forecasting with 3D Neural Networks. *Nature* 2023, 619 (7970), 533–538. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06185-3>.
- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). *Charts*; ECMWF, 2024. <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/charts>.
- Ghaffarian, S.; Taghikhah, F. R.; Maier, H. R. Explainable Artificial Intelligence in Disaster Risk Management: Achievements and Prospective Futures. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 2023, 98, 104123. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.104123>.
- Hakim, G. J.; Masanam, S. Dynamical Tests of a Deep Learning Weather Prediction Model. *Artificial Intelligence for the Earth Systems* 2024, 3 (3). <https://doi.org/10.1175/AIES-D-23-0090.1>.
- Ham, Y.-G.; Kim, J.-H.; Kim, E.-S. et al. Unified Deep Learning Model for El Niño/Southern Oscillation Forecasts by Incorporating Seasonality in Climate Data. *Science Bulletin* 2021, 66 (13), 1358–1366. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2021.03.009>.
- Harder, P.; Watson-Parris, D.; Stier, P. et al. Physics-Informed Learning of Aerosol Microphysics. *Environmental Data Science* 2022, 1, e20. <https://doi.org/10.1017/eds.2022.22>.
- Harris, L.; McRae, A. T. T.; Chantry, M. et al. A Generative Deep Learning Approach to Stochastic Downscaling of Precipitation Forecasts. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 2022, 14 (10), e2022MS003120. <https://doi.org/10.1029/2022MS003120>.
- Hersbach, H.; Bell, B.; Berrisford, P. et al. The ERA5 Global Reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 2020, 146 (730), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.
- Keisler, R. Forecasting Global Weather with Graph Neural Networks. *arXiv* 2022 [preprint]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.07575>.
- Koldunov, N.; Jung, T. Local Climate Services for All, Courtesy of Large Language Models. *Communications Earth and Environment* 2024, 5 (1), 1–4. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01199-1>.
- Lam, R.; Sanchez-Gonzalez, A.; Willson, M. et al. Learning Skillful Medium-Range Global Weather Forecasting. *Science* 2023, 382 (6677), 1416–1421. <https://doi.org/10.1126/science.adi2336>.
- Lang, S.; Alexe, M.; Chantry, M. et al. AIFS – ECMWF’s Data-Driven Forecasting System. *arXiv* 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.01465>.
- Mardani, M.; Brenowitz, N.; Cohen, Y. et al. Residual Diffusion Modeling for Km-scale Atmospheric Downscaling. *Nature Portfolio* 2024 [preprint]. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3673869/v1>.
- McGovern, A.; Ebert-Uphoff, I.; Gagne, D. J. et al. Why We Need to Focus on Developing Ethical, Responsible, and Trustworthy Artificial Intelligence Approaches for Environmental Science. *Environmental Data Science* 2022, 1 (6). <https://doi.org/10.1017/eds.2022.5>.
- Nippen, T.; Chantry, M. *Data Driven Regional Modelling* (European Center for Medium-Range Weather Forecasts AIFS Blog); European Center for Medium-Range Weather Forecasts, *Artificial Intelligence for the Earth Systems* 2024. <https://www.ecmwf.int/en/about/media-centre/aifs-blog/2024/data-driven-regional-modelling>.
- Pathak, J.; Subramanian, S.; Harrington, P. et al. Fourcastnet: A Global Data-driven High-resolution Weather Model Using Adaptive Fourier Neural Operators. *arXiv* 2022 [preprint]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.11214>.
- Patil, K. R.; Doi, T.; Jayanthi, V. R. et al. Deep Learning for Skillful Long-Lead ENSO Forecasts. *Frontiers in Climate* 2023, 4. <https://doi.org/10.3389/fclim.2022.1058677>.
- Sha, Y.; Gagne II, D. J.; West, G. et al. Deep-Learning-Based Precipitation Observation Quality Control. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 2021, 38 (5), 1075–1091. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-20-0081.1>.
- Wang, C.; Pritchard, M.; Brenowitz, N. et al. Coupled Ocean-Atmosphere Dynamics in a Machine Learning Earth System Model. *arxiv* 2024. <https://arxiv.org/html/2406.08632v1>.
- Watt-Meyer, O.; Dresdner, G.; McGibbon, J. et al. ACE: A Fast, Skillful Learned Global Atmospheric Model for Climate Prediction. *arXiv* 2023 [preprint]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.02074>.
- Woolnough, S. J.; Vitart, F.; Balmaseda, M. A. The Role of the Ocean in the Madden-Julian Oscillation: Implications for MJO Prediction. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 2007, 133 (622), 117–128. <https://doi.org/10.1002/qj.4>.
- United Nations Advisory Body on Artificial Intelligence. *Interim Report: Governing AI for Humanity*. United Nations, 2023. https://www.un.org/sites/un2.un.org/files/un_ai_advisory_body_governing_ai_for_humanity_interim_report.pdf.
- Vellinga, M.; Copsey, D.; Graham, T. et al. Evaluating Benefits of Two-Way Ocean–Atmosphere Coupling for Global NWP Forecasts. *Weather and Forecasting* 2020, 35 (5), 2127–2144. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-20-0035.1>.

우주 기반 지구 예측: 날씨, 기후, 물, 그리고 관련 환경 응용분야의 향상

- Andries, A.; Morse, S.; Murphy, R. et al. Translation of Earth Observation Data into Sustainable Development Indicators: An Analytical Framework. *Sustainable Development* 2019, 27 (3), 366–376. <https://doi.org/10.1002/sd.1908>.
- Du, J.; Kimball, J. S.; Sheffield, J. et al. Satellite Flood Inundation Assessment and Forecast Using SMAP and Landsat. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 2021, 14, 6707–6715. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3092340>.
- Dube, T.; Shekede, M. D.; Massari, C. Remote Sensing for Water Resources and Environmental Management. *Remote Sensing* 2023, 15 (1), 18. <https://doi.org/10.3390/rs15010018>.
- Emery, W.; Camps, A. The History of Satellite Remote Sensing. In *Introduction to Satellite Remote Sensing*; Emery, W., Camps, A., Eds.; Elsevier, 2017; 1–42. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809254-5.00001-4>.

- European Space Agency (ESA). *Full Steam Ahead for Carbon Dioxide Monitoring Mission*. ESA, 2022. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Full_steam_ahead_for_carbon_dioxide_monitoring_mission.
- Guo, H.-D.; Zhang, L.; Zhu, L.-W. Earth Observation Big Data for Climate Change Research. *Advances in Climate Change Research* 2015, 6 (2), 108–117. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2015.09.007>.
- Hall, D. K. Assessment of Polar Climate Change Using Satellite Technology. *Reviews of Geophysics* 1988, 26 (1), 26–39. <https://doi.org/10.1029/RG026i001p00026>.
- Harris, R.; Baumann, I. Satellite Earth Observation and National Data Regulation. *Space Policy* 2021, 56, 101422. <https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2021.101422>.
- Hegglin, M. I.; Bastos, A.; Bovensmann, H. et al. Space-Based Earth Observation in Support of the UNFCCC Paris Agreement. *Frontiers in Environmental Science* 2022, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.941490>.
- Lemmens, M. Earth Observation from Space. In *Geo-information: Technologies, Applications and the Environment*; Lemmens, M., Ed.; Springer Netherlands: Dordrecht, 2011; 171–196. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1667-4_9.
- Leyva-Mayorga, I.; Martinez-Gost, M.; Moretti, M. et al. Satellite Edge Computing for Real-Time and Very-High Resolution Earth Observation. *IEEE Transactions on Communications* 2023, 71 (10), 6180–6194. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2023.3296584>.
- MacPhail, D. Increasing the Use of Earth Observations in Developing Countries. *Space Policy* 2009, 25 (1), 6–8. <https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2008.12.007>.
- Marbel, R.; Ben-Moshe, B.; Grinshpoun, T. Pico-Sat to Ground Control: Optimizing Download Link via Laser Communication. *Remote Sensing* 2022, 14 (15), 3514. <https://doi.org/10.3390/rs14153514>.
- Militino, A. F.; Ugarte, M. D.; Pérez-Goya, U. Improving the Quality of Satellite Imagery Based on Ground-Truth Data from Rain Gauge Stations. *Remote Sensing* 2018, 10 (3), 398. <https://doi.org/10.3390/rs10030398>.
- Neigh, C. S. R.; Carroll, M. L.; Montesano, P. M. et al. An API for Spaceborne Sub-Meter Resolution Products for Earth Science. In *IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Yokohama, Japan, 28 July–2 August 2019; Institute of Electrical and Electronics Engineers: 2019; 5397–5400. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2019.8898358>.
- Salcedo-Sanz, S.; Ghamisi, P.; Piles, M. et al. Machine Learning Information Fusion in Earth Observation: A Comprehensive Review of Methods, Applications and Data Sources. *Information Fusion* 2020, 63, 256–272. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2020.07.004>.
- Symonds, D. Protection for All: WISER-EWSA Aims to Transform Nowcasting and Early Warning Systems in Southern Africa, Particularly for the Most Vulnerable Communities. *Meteorological Technology International*, April 2023, 10–11. <https://www.ukimediaevents.com/publication/8cf6eceb/12>.
- Schollaert Uz, S.; Ruane, A. C.; Duncan, B. N. et al. Earth Observations and Integrative Models in Support of Food and Water Security. *Remote Sensing in Earth Systems Sciences* 2019, 2 (1), 18–38. <https://doi.org/10.1007/s41976-019-0008-6>.
- Trewin, B.; Cazenave, A.; Howell, S. et al. Headline Indicators for Global Climate Monitoring. *Bulletin of the American Meteorological Society* 2021, 101 (1), E20–E37. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0196.1>.
- United Nations Office for Outer Space Affairs (UNOOSA) and European Space Agency. *Updated UNOOSA and ESA Space Debris Infographics and Podcasts*. UNOOSA and ESA, 2023. <https://www.unoosa.org/oosa/en/informationfor/media/unoosa-and-esa-release-infographics-and-podcasts-about-space-debris.html>.
- World Meteorological Organization (WMO). *Vision for WIGOS in 2040* (WMO-No. 1243). Geneva, 2019.
- World Meteorological Organization (WMO). *20th Century*. WMO: Geneva, 2023. <https://wmo.int/20th-century>.
- World Meteorological Organization (WMO). *United in Science 2023: Sustainable Development Edition*; WMO: Geneva, 2023.
- World Meteorological Organization (WMO). *2023 State of Climate Services: Health* (WMO-No. 1335). Geneva, 2023.
- Xing, J.; Yu, B.; Yang, D. et al. A Real-Time GNSS-R System for Monitoring Sea Surface Wind Speed and Significant Wave Height. *Sensors* 2022, 22 (10), 3795. <https://doi.org/10.3390/s22103795>.
- Yamamoto, H.; Kamei, A.; Nakamura, R. et al. Field Sensor Virtual Organization Integrated with Satellite Data on a Geo Grid. *Data Science Journal* 2010, 8 (0). https://doi.org/10.2481/dsj.SS_IGY-015.

가상과 물리적 영역의 연결: 물과 토지 관리를 위한 몰입형 기술 활용

- Alizadeh, B.; Sakib, M.; Behzadan, A. Immersive Virtual Reality to Measure Flood Risk Perception in Urban Environments. In *Proceedings of the 30th International Conference on Intelligent Computing in Engineering (EG-ICE)*, London, 4–7 July 2023; University College London: 2023, 103–112. https://www.ucl.ac.uk/bartlett/construction/sites/bartlett_construction/files/9014.pdf.
- Allen, B. D. Digital Twins and Living Models at NASA. Paper presented at Digital Twin Summit, Online, 3–4 November 2021; National Aeronautics and Space Administration, 2021. https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20210023699/downloads/ASME%20Digital%20Twin%20Summit%20Keynote_final.pdf.
- Amarnath, G. Mitigating the Global Water Crisis: Digital Twin Earths Offer a Promising Solution. *Frontiers Policy Labs* 2024. <https://doi.org/10.25453/plabs.25981804.v1>.
- Botai, J. O.; Ghosh, S.; Matheswaran, K. et al. *Options for Digital Twin Application in Developing Country River Basin Management: A Review*; CGIAR Initiative on Digital Innovation. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute (IWMI), 2023. <https://cgispace.cgiar.org/items/f4977d8e-5c31-4e93-9f6b-1e6d45a39fb3>.

- DGB Group. *The Decline of the Maya Civilisation: How Environmental Factors Played a Role in their Collapse*. DGB Group, 2023. <https://www.green.earth/blog/the-decline-of-the-maya-civilisation-how-environmental-factors-played-a-role-in-their-collapse>.
- Fujs, T.; Kashiwase, H. *Strains on Freshwater Resources: The Impact of Food Production on Water Consumption*; World Bank Data Blog, World Bank: Washington, DC, 2023. <https://blogs.worldbank.org/en/opendata/strains-freshwater-resources-impact-food-production-water-consumption>.
- Hsu, H. M.; Gourbesville, P. Introduction of Integrated Decision Support System for Flood Disaster Management. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 2023, 1136, 012019. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1136/1/012019>.
- Huth, N. I.; Adam, S.; Abbott, B. et al. *Putting Land Management Knowledge into Practice - Final Project Report*; Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), 2023. <https://gisera.csiro.au/wp-content/uploads/2023/10/CSIRO-GISERA-final-report-L10-NT-Putting-land-management-knowledge-into-practice.pdf>.
- International Telecommunication Union (ITU). *UN Executive Briefing on Unlocking the Potential of Virtual Worlds and the Metaverse for the Sustainable Development Goals*. ITU: Geneva, 2024. <https://www.itu.int/net/epub/TSB/2024-UN-Executive-Briefing-on-unlocking-potential/index.html#p=2>.
- International Telecommunication Union (ITU). *ITU Technical Specification: Definition of Metaverse*; Version 1.0. ITU: Geneva, 2023. <https://www.itu.int/en/ITU-T/focusgroups/mv/Documents/List%20of%20FG-MV%20deliverables/FGMV-20.pdf>.
- International Telecommunication Union (ITU). *New UN Initiative to Reduce Disaster Risk with AI* [Press release]. 20 August 2024. <https://www.itu.int/hub/2024/08/new-un-initiative-to-reduce-disaster-risk-with-ai/>.
- Jinendradasa, S. S. *Implications of Land and Water Degradation on Food Security; Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*. CGIAR: Colombo, Sri Lanka, 2002. <https://cgspace.cgiar.org/items/d49b242e-03da-4fa8-9dc9-a900673b0445>.
- Pacific Institute. *Water Conflict Chronology*. Pacific Institute: Oakland, USA, 2023. <https://www.worldwater.org/water-conflict/>.
- Rantanen T. Tampere Metaverse: How New Technologies Can Help in Disasters. In *Episode #33: Disaster Risk Reduction in the Digital Transformation Age: Leveraging Emerging Technologies*; ITU Digital Transformation Webinar Series. International Telecommunication Union (ITU): Geneva, 2023. <https://www.itu.int/cities/wp-content/uploads/2023/10/5-Teppo-Rantanen.pdf>.
- Roberts, B.; Atkins, P.; Simmons, I. *People, Land and Time: An Historical Introduction to the Relations Between Landscape, Culture and Environment*, 1st ed.; Routledge: Abingdon, UK, 1998. <https://doi.org/10.4324/9780203765777>.
- Sa don, N. F.; Sa don, H. S.; Alias, R. A. et al. Flood Preparedness Module for Malaysian Higher Education Students via Metaverse Environment. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 2023, 1144 (1), 012011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1144/1/012011>.

지속 가능한 미래로 가는 길: 기상, 기후, 물, 관련 환경 및 사회 과학에 대한 초학문적 접근의 역할

- Barth, M.; Jiménez-Aceituno, A.; Lam, D. P. et al. Transdisciplinary Learning as a Key Leverage for Sustainability Transformations. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 2023, 64, 101361. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2023.101361>.
- Bendito, A.; Barrios, E. Convergent Agency: Encouraging Transdisciplinary Approaches for Effective Climate Change Adaptation and Disaster Risk Reduction. *International Journal of Disaster Risk Science* 2016, 7 (4), 430–435. <https://doi.org/10.1007/s13753-016-0102-9>.
- Bergmann, M.; Hirsch Hadorn, G.; Metag, J., Eds. *Conceptualising Transdisciplinarity - Origins, Approaches and Challenges*. Springer Nature, 2021.
- Bharwani, S.; Daron, J.; Siame, G. et al. *Supporting Climate-resilient Urban Planning: 10 Lessons from Cities in Southern Africa*. Future Resilience for African Cities and Lands (FRACAL) project, 2023. <https://www.fractal.org.za/wp-content/uploads/2023/09/supporting-climate-resilient-urban-planning.pdf>.
- Brandt, P.; Ernst, A.; Gralla, F. et al. A Review of Transdisciplinary Research in Sustainability Science. *Ecological Economics* 2013, 92, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2013.04.008>.
- Bréthaut, C.; Gallagher, L.; Dalton, J. et al. Power Dynamics and Integration in the Water-Energy-Food Nexus: Learning Lessons for Transdisciplinary Research in Cambodia. *Environmental Science & Policy* 2019, 94, 153–162. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.01.010>.
- Hoffmann, S.; Thompson Klein, J.; Pohl, C. Linking Transdisciplinary Research Projects with Science and Practice at Large: Introducing Insights from Knowledge Utilization. *Environmental Science & Policy* 2019, 102, 36–42. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.08.011>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Core Writing Team; Lee, H.; Romero, J., Eds.; IPCC, Geneva, 2023. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf.
- International Science Council. *LIRA 2030 Africa: Learning from Practising Transdisciplinary Research for Sustainable Development in African Cities*; International Science Council: Paris, 2023. <https://council.science/wp-content/uploads/2020/06/LIRA-Learning-Study-Report-230321-WEB.pdf%22>.
- Ismail-Zadeh, A. T.; Cutter, S. L.; Takeuchi, K. et al. Forging a Paradigm Shift in Disaster Science. *Natural Hazards* 2017, 86 (2), 969–988. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2726-x>.
- Jack, C. D.; Marsham, J.; Rowell, D. P. et al. Climate Information: Towards Transparent Distillation. In *Climate Risk in Africa: Adaptation and Resilience*; Conway, D., Vincent, K., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2021; 17–35. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61160-6_2.
- Kaiser, M.; Gluckman, P. *Looking at the Future of Transdisciplinary Research*; International Science Council (ISC): Paris, 2023. <https://council.science/wp-content/uploads/2024/06/2023-04-26Futureoftransdisciplinaryresearch.pdf>.

- Klein, J. T. The Discourse of Transdisciplinarity: An Expanding Global Field. In *Transdisciplinarity: Joint Problem Solving among Science, Technology, and Society: An Effective Way for Managing Complexity*; Klein, J. T., Häberli, R., Scholz, R. W., Grossenbacher-Mansuy, W., Bill, A., Welti, M., Eds.; Birkhäuser: Basel, Switzerland, 2001; 35–44. https://doi.org/10.1007/978-3-0348-8419-8_4.
- Koele, B.; Daniels, E.; Kavonic, J. et al. FRACTAL City Learning Lab Approach, IMPACT STORY, 1 October 2019, Cross-City 2019
- Lang, D. J.; Wiek, A.; Bergmann, M. et al. Transdisciplinary Research in Sustainability Science: Practice, Principles, and Challenges. *Sustainability Science* 2012, 7 (1), 25–43. <https://doi.org/10.1007/s11625-011-0149-x>.
- Matsumoto, Y.; Kasamatsu, H.; Sakakibara, M. Challenges in Forming Transdisciplinary Communities of Practice for Solving Environmental Problems in Developing Countries. *World Futures* 2022, 78 (8), 546–565. <https://doi.org/10.1080/02604027.2021.2012878>.
- Matsuura, S.; Razak, K. A. Exploring Transdisciplinary Approaches to Facilitate Disaster Risk Reduction at National and Local Levels through Education, Training and Field Practice. In *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction (GAR 2019)*; United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR): Geneva, 2019. <https://www.undrr.org/publication/exploring-transdisciplinary-approaches-facilitate-disaster-risk-reduction-national-and-local-levels-through-education-training-and-field-practice>.
- McClure, A.; Patel, Z.; Ziervogel, G. et al. Exploring the Role of Transdisciplinary Learning for Navigating Climate Risks in African Cities: The Case of Lusaka, Zambia. *Environmental Science & Policy* 2023, 149, 103571. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2023.103571>.
- Moser, S. *Social Transformations to Sustainability through a Critical Lens*; Belmont Forum, International Science Council, NORFACE, 2024. <https://council.science/wp-content/uploads/2024/07/ISC-T2SReports-Synthesis.pdf>.
- Mukute, M.; Colvin, J.; Burt, J. *Programme Design for Transformations to Sustainability Research*; Belmont Forum, International Science Council, NORFACE, 2024. <https://council.science/wp-content/uploads/2024/07/ISC-T2SReports-ProgrammeDesign.pdf>.
- Norström, A. V.; Cvitanovic, C.; Löf, M. F. et al. Principles for Knowledge Co-Production in Sustainability Research. *Nature Sustainability* 2020, 3 (3), 182–190. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0448-2>.
- Paton, D.; Buergett, P. Risk, Transformation and Adaptation: Ideas for Reframing Approaches to Disaster Risk Reduction. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2019, 16 (14), 2594. <https://doi.org/10.3390/ijerph16142594>.
- Paulavets, K.; Moore, S.; Denis, M. Advancing Transdisciplinary Research in the Global South. In *Handbook of Transdisciplinarity: Global Perspectives*; Lawrence, R., Ed.; Edward Elgar, 2023. <https://www.elgaronline.com/edcollchap-0a/book/9781802207835/book-part-9781802207835-27.xml>.
- Pohl, C. What Is Progress in Transdisciplinary Research? *Futures* 2011, 43 (6), 618–626. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2011.03.001>.
- Pohl, C.; Hadorn, G. H. Methodological Challenges of Transdisciplinary Research. *Natures Sciences Sociétés* 2008, 16 (2), 111–121. <https://doi.org/10.1051/nss:2008035>.
- Taylor, A.; Siame, G.; Mwalukanga, B. Integrating Climate Risks into Strategic Urban Planning in Lusaka, Zambia. In *Climate Risk in Africa: Adaptation and Resilience*; Conway, D., Vincent, K., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2021; 115–129. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61160-6_7.
- Tschanz, L.; Arlot, M. P.; Philippe, F. et al. A Transdisciplinary Method, Knowledge Model and Management Framework for Climate Change Adaptation in Mountain Areas Applied in the Vercors, France. *Regional Environmental Change* 2022, 22 (1), 15. <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01862-3>.
- Vincent, K.; Steynor, A.; McClure, A. et al. Co-Production: Learning from Contexts. In *Climate Risk in Africa: Adaptation and Resilience*; Conway, D., Vincent, K., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2021; 37–56. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61160-6_3.
- Walter, A. I.; Helgenberger, S.; Wiek, A. et al. Measuring Societal Effects of Transdisciplinary Research Projects: Design and Application of an Evaluation Method. *Evaluation and Program Planning* 2007, 30 (4), 325–338. <https://doi.org/10.1016/j.evalprogplan.2007.08.002>.
- World Meteorological Organization (WMO). *United in Science 2023: Sustainable Development Edition*; WMO: Geneva, 2023.

모두의 생명을 구하는 조기경보 시스템으로 보호받는 미래

- Golding, B., Ed. *Towards the “Perfect” Weather Warning: Bridging Disciplinary Gaps through Partnership and Communication*; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2022. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-98989-7>.
- Group on Earth Observations (GEO). *GEO Highlights 2023*. GEO: Geneva, 2023. <https://earthobservations.org/storage/app/media/documents/Events/GEO-Week-2023/GEO%202023%20Highlights%20Report.pdf>.
- Indonesia Meteorological, Climatological and Geophysical Agency (BMKG). *Signature - System for Multi Generation Weather Model Analysis and Impact Forecast*; BMKG, 2024. <https://signature.bmkg.go.id/>.
- International Telecommunications Union (ITU). *Disaster Connectivity Map*. ITU: Geneva, 2024a. <https://www.itu.int/en/ITU-D/Emergency-Telecommunications/Pages/Disaster-Connectivity-Map.aspx>.
- International Telecommunications Union (ITU). *AI Sub-Group of Early Warnings for All Initiative*. ITU: Geneva, 2024b. <https://www.itu.int/en/ITU-D/Emergency-Telecommunications/Pages/AI-Sub-Group-EW4All.aspx>.
- International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies (IFRC). *Operational Framework for Anticipatory Action 2021-2025*. IFRC: Geneva, 2022. <https://www.ifrc.org/document/operational-framework-anticipatory-action-2021-2025>.
- Nakalembe, C. L.; Kotani, R. *Ugandan Crop Monitoring System Enables Early Drought Response*. Earth Observations Risk Toolkit, 2022. <https://earth-observation-risk-toolkit-undrr.hub.arcgis.com/pages/drought-early-warning-in-uganda#fn1>.
- World Meteorological Organization (WMO) and United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). *Global Status of Multi-Hazard Early Warning Systems 2023*. Geneva, 2023. <https://www.undrr.org/reports/global-status-MHEWS-2023#download>.

APEC기후센터는 WMO의 승인하에 영어로 작성된 보고서 원문을 국문으로 번역하였습니다. 국문 번역 내용에 대한 책임은 APEC기후센터에 있으며, WMO는 번역된 내용에 대해서는 책임이 없습니다.

This publication is a translation undertaken by the APEC Climate Center with permission from WMO, the publisher of the original text in English. WMO does not guarantee the accuracy of the translation for which the APEC Climate Center takes sole responsibility.

자세한 정보는 아래 주소를 확인해 주세요.

public.wmo.int/en/resources/united_in_science





United in Science 2024

A multi-organization high-level compilation
of the latest weather, climate, water and
related environmental and social sciences
for the future



This report has been compiled by the World Meteorological Organization (WMO) under the direction of the United Nations Secretary-General to bring together the latest climate science-related updates from key global partner organizations. Aligned with the 2024 United Nations Summit of the Future, this report provides an update on the state of climate science and the latest weather, climate, water and related environmental and social sciences for the future. Contributing partners include: WMO, Met Office UK, the Official Children and Youth Constituency of the United Nations Framework Convention on Climate Change (YOUNGO), WMO Global Atmosphere Watch (GAW), WMO World Weather Research Programme (WWRP), World Climate Research Programme (WCRP), Global Carbon Project (GCP), United Nations Environment Programme (UNEP), European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), United Nations Office for Outer Space Affairs (UNOOSA), European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT), International Telecommunication Union (ITU), United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD), International Science Council (ISC), United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies (IFRC) and Future Earth.

The report is available electronically at: <https://library.wmo.int/idurl/4/69018>

Cover photo: Kampan - Adobe Stock

Design and layout: Lagrua Studios

Lead authors and contributors

Overall coordination and editing by WMO – Lauren Stuart, Claudia Pusch, Isha Bhasin, Ilaira Gallo

Executive summary – Simon McLellan (Met Office, UK), Michel Jean (WMO; Environment and Climate Change Canada), Melissa Jiménez Gómez Tagle (YOUNGO), Shaurya Patel (YOUNGO), Chaitanya Reddy (YOUNGO)

State of climate science: the need for urgent and ambitious climate action – Melissa Seabrook (Met Office, UK), Leon Hermanson (Met Office, UK), Adam Scaife (Met Office, UK; University of Exeter, UK), Doug Smith (Met Office, UK), Anne Olhoff (UNEP Copenhagen Climate Centre), John Christensen (UNEP Copenhagen Climate Centre), Maarten Kappelle (UNEP), Jian Liu (UNEP), Joeri Rogelj (Imperial College London, UK; International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Austria), Omar Baddour (WMO), Claire Ransom (WMO), Yohanna Villalobos (GCP), Yolandi Ernst (GCP), Yuhui Wang (GCP), Ana Bastos (GCP), Ben Poulter (GCP), Robert B. Jackson (GCP), Pep Canadell (GCP), John Kennedy (WMO), Frederic Chevallier (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), France), Andrew Croftwell (National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Global Monitoring Laboratory and Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences, University of Colorado Boulder, USA), Christoph Gerbig (Max Planck Institute for Biogeochemistry, Germany), Armin Jordan (Max Planck Institute for Biogeochemistry, Germany), Xin Lan (NOAA Global Monitoring Laboratory, USA), Zoë Loh (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia), Ingrid Luijckx (Wageningen University and Research, Netherlands), John Miller (NOAA Global Monitoring Laboratory, USA), Yousuke Sawa (Japan Meteorological Agency, World Data Centre for Greenhouse Gases (WDCGG), Japan), Oksana Tarasova (WMO), Alex Vermeulen (Integrated Carbon Observing System – European Research Infrastructure Consortium (ICOS ERIC)/Lund University, Sweden), Ray Weiss (Scripps Institution of Oceanography, University of California San Diego, USA), Thorsten Warneke (University Bremen, Germany), Camille Yver (LSCE, France)

Artificial intelligence and machine learning: revolutionizing weather forecasting – Florian Pappenberger (ECMWF), Nils Wedi (ECMWF), Matthew Chantry (ECMWF), Christian Lessig (ECMWF), Simon Lang (ECMWF), Peter Dueben (ECMWF), Mariana Clare (ECMWF), Linus Magnusson (ECMWF), Estíbaliz Gascón (ECMWF), Florence Rabier (ECMWF), Amy McGovern (AI2ES, University of Oklahoma, USA), Hèou Maléki Badjana (Red Cross Red Crescent Climate Centre), Catherine de Burgh-Day (Bureau of Meteorology, Australia), Jürg Luterbacher (Justus Liebig University of Giessen, Germany), Monique M. Kuglitsch (Fraunhofer Institute for Telecommunications, Heinrich Hertz Institute, Germany), Hannah L. Cloke (University of Reading, UK)

Space-based Earth observations: enhancing weather, climate, water and related environmental applications – Jumpei Takami (UNOOSA), Anne-Claire Grossias (UNOOSA), Lorant Czarán (UNOOSA), Gemechu Jebeso Morketo (Central European University), Ajadi Sodiq (Central European University), Paolo Ruti (EUMETSAT)

Bridging virtual and physical realms: leveraging immersive technologies for water and land management – Nakul Prasad (WMO), Stefan Uhlenbrook (WMO), Hwirin Kim (WMO), Celine Cattoen (National Institute of Water and Atmospheric Research (NIWA), New Zealand), William Scharffenberg (USA), Monique M. Kuglitsch (Fraunhofer Institute for Telecommunications, Heinrich Hertz Institute, Germany), Abd Salam El Vilaly (UNCCD), Bilel Jamoussi (ITU)

Towards pathways to sustainable futures: the role of transdisciplinary approaches to weather, climate, water and related environmental and social sciences – Irasema Alcántara-Ayala (Institute of Geography, National Autonomous University of Mexico), Coleen Vogel (Global Change Institute, University of the Witwatersrand, South Africa), Motoko Kotani (Tohoku University, Japan; ISC), Carla Mooney (Bureau of Meteorology, Australia), Mandira Singh Shrestha (International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD), Nepal), Osvaldo Luiz Leal de Moraes (CEMADEN, São Paulo, Brazil)

A future where everyone is protected by life-saving early warning systems – Daniela Cuéllar Vargas (WMO), Salla Himberg (IFRC), Vanessa Gray (ITU), Rosie McDonald (ITU), Amélie Grangeat (ITU)

© World Meteorological Organization, 2024

The right of publication in print, electronic and any other form and in any language is reserved by WMO. Short extracts from WMO publications may be reproduced without authorization, provided that the complete source is clearly indicated. Editorial correspondence and requests to publish, reproduce or translate this publication (articles) in part or in whole should be addressed to:

Chair, Publications Board
World Meteorological Organization (WMO)
7 bis, avenue de la Paix
P.O. Box 2300
CH-1211 Geneva 2, Switzerland

Tel.: +41 (0) 22 730 8403
Email: publications@wmo.int

NOTE: The designations employed in WMO publications and the presentation of material in this publication do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of WMO concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries. The mention of specific companies or products does not imply that they are endorsed or recommended by WMO in preference to others of a similar nature which are not mentioned or advertised.

The findings, interpretations and conclusions expressed in WMO publications with named authors are those of the authors alone and do not necessarily reflect those of WMO or its Members.

**Foreword by Prof. Celeste Saulo, Secretary-General
of the World Meteorological Organization**

The science is clear – greenhouse gas emissions are rising, global temperatures are shattering records and extreme weather is wreaking havoc with our lives and our economies. Urgent and ambitious action is needed to support sustainable development, climate action and disaster risk reduction. The decisions we make today could mean the difference between a future of breakdown or a breakthrough to a better world for people and the planet.

Natural and social sciences, technology and innovation hold tremendous potential to help us achieve these global goals. Rapid advances in artificial intelligence and machine learning are revolutionizing weather forecasting. Innovations in space-based Earth observations can help us better monitor greenhouse gas sources and sinks. Technologies such as digital twins and virtual reality can be applied in innovative contexts to help us achieve sustainable development and enhance disaster preparedness.

However, science and technology alone are not enough. In an increasingly complex world, we must embrace diverse knowledge, experiences and perspectives to co-create solutions together. The United Nations Secretary-General’s groundbreaking Early Warnings for All initiative highlights how we can work together to utilize advances in natural and social science, technology and transdisciplinary approaches to save lives and safeguard sustainable development gains.

The Summit of the Future provides an opportunity to rethink, reimagine and reboot our actions, leverage diverse knowledge and experience, and strengthen governance mechanisms and trust in our institutions. We must ensure that the benefits of science and technology are accessible to all if we are to achieve global goals.

I thank the many partner organizations and experts involved in creating this report to highlight the future of weather, climate, water and related environmental and social sciences in accelerating progress to achieve a better world today and for future generations to come.



A handwritten signature in black ink, appearing to read 'C. Saulo', written in a cursive style.

Prof. C. Saulo
Secretary-General, WMO

Executive summary

The Summit of the Future provides a once-in-a-generation opportunity to demonstrate how we can collectively achieve global goals, such as the Paris Agreement, Sendai Framework for Disaster Risk Reduction and 2030 Agenda for Sustainable Development. With global temperatures reaching record highs and the impacts of climate change and hazardous weather events reversing development gains, a sustainable future for all is at risk. However, harnessing the power of natural and social sciences, technology and innovation provides an unprecedented opportunity to get back on track to achieve global goals and a better world for present and future generations.

United in Science 2024 emphasizes the transformative impact of new technologies and innovative approaches across weather, climate, water and related environmental and social sciences. From artificial intelligence (AI) to cutting-edge satellite technologies and virtual realities that bridge the physical and digital worlds, scientific and technological advances are enhancing weather, climate, water and related environmental applications as well as informing strategies for responding to global challenges such as climate change and sustainable development. The report also underscores the necessity of transdisciplinary approaches that help apply science and technology in local contexts and boost their impact by embracing diverse knowledge, perspectives and experiences to co-develop and implement solutions. While significant gaps and challenges remain, enhanced collaboration across scales is essential to harness the full potential of weather, climate, water and related environmental and social sciences to ensure that their benefits are accessible to all.

The science is clear – we are far off track from achieving global climate goals, threatening a sustainable future for all

Human-caused climate change has resulted in widespread and rapid changes in the atmosphere, ocean, cryosphere and biosphere, affecting many weather and climate extremes. Global greenhouse gas (GHG) emissions rose by 1.2% from 2021 to 2022, reaching 57.4 billion tons of carbon dioxide (CO₂) equivalent. Globally averaged surface concentrations of CO₂, methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) also reached new highs. The year 2023 was the warmest on record by a large margin, with ocean heat content also reaching record highs, while Arctic and Antarctic sea-ice extent reached record lows. The first half of 2024 witnessed exceptionally high global temperatures and many extreme weather events, from scorching heat waves across large parts of Asia and drought in Southern Africa to record-breaking floods in southern Brazil and the unprecedented Category 5 Hurricane *Beryl* in the Caribbean. The increasing frequency of extreme and hazardous weather events and their devastating impacts across society underscore the need for urgent and ambitious climate action.

Looking ahead, there is an 86% chance of at least one year in the next five years exceeding 2023 as the warmest year on record and an 80% chance that the global mean near-surface temperature will temporarily exceed 1.5 °C above pre-industrial levels at least one of the next five years. Although progress has been made in mitigating global GHG emissions, the emissions gap remains high. If current policies are continued, it is estimated (with 66% probability) that global warming will be kept to a maximum of 3 °C throughout the century. To reach levels consistent with limiting global warming to below 2 °C and 1.5 °C, global GHG emissions in 2030 must be reduced by 28% and 42%, respectively, from the emission levels that current policies are projected to deliver. Additionally, the complex and escalating nature of climate risks underscores the need for robust adaptation that is grounded in diverse knowledge and promotes inclusive engagement. As a result, ambitious adaptation action can help reduce the adverse impacts of climate change across ecosystems and societies, minimize losses and damages and safeguard sustainable development gains.

Advances in weather, climate, water and related environmental and social sciences can enhance our understanding of the Earth system and boost progress towards achieving a sustainable future for all

AI and machine learning (ML) have emerged as potentially transformative technologies that are revolutionizing weather forecasting and could equip society with better tools to drive progress towards climate change adaptation, disaster risk reduction and sustainable development. With rapid progress being made, AI and ML can make skillful weather modelling faster, cheaper and more accessible to lower-income countries with limited computational capacities. Additionally, innovations in satellite-based Earth observations can open new frontiers to advance weather, climate, water and related environmental applications. By leveraging public-private partnerships and international collaboration, innovations in space-based Earth observations can pave the way for improved weather prediction, enhanced understanding of our

climate system and more robust environmental monitoring. Additionally, immersive technologies are providing innovative solutions to address compounding socioeconomic and climate change impacts on water and land resources. For example, digital twins, virtual reality and the metaverse can revolutionize land and water management by offering immersive, interactive and data-driven solutions that bridge the physical and digital worlds. When enabled by sustainable funding mechanisms and effective governance frameworks, these technologies can enhance decision-making and the engagement of diverse actors.

Box 1. Harnessing the power of data through international cooperation and robust governance

Weather and climate have no borders or boundaries, highlighting the need for international cooperation to close global data gaps and foster exchange of weather data to inform timely decision-making. Advances in science and technology are resulting in an exponential increase in data volumes and an explosive demand for data to support essential services across society. While there is tremendous potential to harness the power of data to deliver benefits across society, the growing data divide can lead to inequitable distribution of benefits and the misuse and misinterpretation of data.

One example of international collaboration is the Systematic Observations Financing Facility (SOFF), which aims to support and accelerate the sustained collection and international exchange of essential surface-based weather and climate observations by providing financial support to implement the internationally agreed Global Basic Observing Network, especially in least developed countries and small island developing States. Additionally, the WMO Unified Data Policy recognizes the need for robust data governance based on the core principles of free and unrestricted data exchange. The policy guides the exchange of data between WMO Member countries to strengthen and sustain monitoring and prediction of all Earth system components and provides an essential framework to harness the spectacular developments in AI/ML for weather and climate prediction. These initiatives support better delivery of weather, climate, water and related environmental data and services, which can accelerate progress towards the achievement of the Sustainable Development Goals (SDGs) and contribute to the objectives outlined in the Global Digital Compact through the enhancement of data interoperability and accessibility.

However, global challenges such as climate change and sustainable development cannot be addressed by science and technology alone – they require a transdisciplinary approach to co-create and implement solutions

Addressing complex global challenges such as climate change, disaster risk reduction and sustainable development requires an enhanced rethinking and reimagining of how diverse perspectives, knowledge and experiences can help us co-create knowledge and implement solutions. Transdisciplinary approaches are increasingly being used to unite diverse actors – such as scientists, policymakers, practitioners and civil society, including local and Indigenous communities – and to apply natural and social sciences in local contexts. These approaches can amplify the impact of perspectives offered by weather, climate, water and related environmental and social sciences and enhance trust in various actors and institutions, including National Meteorological and Hydrological Services (NMHSs). Additionally, increasing the diversity of engaged actors, political commitment and global efforts to address climate action can accelerate sustainable development and disaster risk reduction, leading to stronger, more resilient communities in the face of evolving global challenges.

The Early Warnings for All (EW4All) initiative exemplifies how integrating global efforts across natural and social sciences, technological advances and transdisciplinary approaches can protect lives, livelihoods and the environment from natural hazards

The EW4All initiative is a groundbreaking effort that aims to ensure everyone on Earth is protected from hazardous weather, water or climate events through life-saving early warning systems by the end of 2027. Natural and social sciences, technological advances and transdisciplinary approaches, alongside robust partnerships, adequate resources and enhanced capacities, underpin effective multi-hazard early warning systems (MHEWS). Advancements in AI, space-based Earth observations and immersive technologies can contribute to this critical initiative by advancing weather forecasting, contextualizing and communicating complex information for decision-making, and creating interactive, educational simulations to visualize different hazard scenarios and potential impacts to support anticipatory action. Additionally, transdisciplinary approaches, including participatory engagement methods such as citizen science, enhance the effectiveness of NMHSs through the co-development of knowledge and solutions that are relevant to local contexts.

Collaboration across scales is essential to address gaps and challenges and harness the full potential of weather, climate, water and related environmental and social sciences to ensure that their benefits are accessible to all

Advances in weather, climate, water and related environmental and social sciences offer huge potential to support the full achievement of global goals, including the Paris Agreement, 2030 Agenda, Sendai Framework for Disaster Risk Reduction and EW4All. However, data gaps, limited financial resources, inadequate capacity to utilize emerging technologies, as well as governance challenges limit the realization of the full potential of these advances and risk further exacerbating the digital divide. Moving forward, global partnerships between governments, the private sector, international organizations, civil society, academia, youth and local communities will be essential to address these challenges and ensure that the benefits of natural and social sciences, technologies and innovations are accessible to all.

Box 2. Embracing youth and early career researchers

Young people and early career researchers (ECRs) belong to the generation of the present and the future, hence it is crucial to engage them in scientific endeavours, policymaking and climate action. As agents of change, young people often bring fresh perspectives, innovative approaches and a willingness to challenge the status quo, leading to breakthroughs in understanding and solving complex global problems. Their adaptability to new technologies and digital tools enhances the dissemination and application of diverse knowledge in our rapidly evolving society. Moreover, involving young people ensures the continuity of scientific inquiry and problem-solving, fostering a sense of responsibility and ownership over scientific and societal challenges which is essential for long-term impact. Thirteen ECRs were actively engaged in the development of *United in Science 2024*, which incorporates their perspectives and innovative ideas throughout. The involvement of ECRs exemplifies the commitment of WMO and partner organizations involved in this report to embrace the crucial role that young people play in shaping a sustainable and resilient future for generations to come.



A man in a plaid shirt is standing outdoors, pointing upwards at a weather station sensor mounted on a metal pole. The background shows a white fence and green foliage.

Recommendations

- **Enhance the quality, availability, accessibility, and interoperability of data.** Reliable, transparent and easily accessible data, including Earth observation data, lie at the heart of scientific and technological transformation and can bridge global technological disparities. International cooperation can help close data gaps, improving the availability and quality of data, while robust governance mechanisms can enhance access to data by enabling the free and unrestricted exchange of data (Box 1). Additionally, the seamless integration of data from different public and private sources can improve data interoperability and empower diverse actors to leverage real-time insights in an effort to drive substantial progress towards global goals.
- **Boost investments in and access to emerging science and technology.** Advances in science and technology hold tremendous potential to revolutionize environmental monitoring, inform decision-making and support effective climate change mitigation and adaptation; however, further research and analysis are needed to address outstanding scientific questions and better understand potential risks and opportunities associated with these technologies. Innovative financing models, public-private partnerships and strong governance at all levels can create an enabling environment to scale up and accelerate research, innovation and transdisciplinary approaches and ensure the benefits are accessible to all.
- **Scale up education, training and capacity development, particularly in developing countries.** Education, training and capacity development are essential to seize the opportunities presented by science, technology and innovation and prepare the next generation to address the challenges of the future (Box 2). In particular, education and training in transdisciplinary approaches should be encouraged to boost the impact of perspectives offered by weather, climate, water and related environmental and social sciences by embracing diverse knowledge and solutions. Additionally, accelerating the transfer of technologies can help close the digital divide while also driving climate action and supporting sustainable development at all levels.

CHAPTER 1

State of climate science: the need for urgent and ambitious climate action

The science is clear – rising greenhouse gas emissions and atmospheric concentrations are leading to changes in key climate indicators and affecting extreme events, contributing to devastating impacts globally and underscoring the need for urgent and ambitious action to achieve a sustainable future.

Authors: Melissa Seabrook (Met Office, UK), Leon Hermanson (Met Office, UK), Adam Scaife (Met Office, UK; University of Exeter, UK), Doug Smith (Met Office, UK), Anne Olhoff (UNEP Copenhagen Climate Centre), John Christensen (UNEP Copenhagen Climate Centre), Maarten Kappelle (UNEP), Jian Liu (UNEP), Joeri Rogelj (Imperial College London, UK; International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Austria), Omar Baddour (WMO), Claire Ransom (WMO), Yohanna Villalobos (GCP), Yolandi Ernst (GCP), Yuhui Wang (GCP), Ana Bastos (GCP), Ben Poulter (GCP), Robert B. Jackson (GCP), Pep Canadell (GCP), John Kennedy (WMO), Frederic Chevallier (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), France), Andrew Croftwell (NOAA Global Monitoring Laboratory and Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences, University of Colorado Boulder, USA), Christoph Gerbig (Max Planck Institute for Biogeochemistry, Germany), Armin Jordan (Max Planck Institute for Biogeochemistry, Germany), Xin Lan (NOAA Global Monitoring Laboratory, USA), Zoë Loh (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia), Ingrid Lujckx (Wageningen University and Research, Netherlands), John Miller (NOAA Global Monitoring Laboratory, USA), Yousuke Sawa (Japan Meteorological Agency, WDCGG, Japan), Oksana Tarasova (WMO), Alex Vermeulen (ICOS ERIC/Lund University, Sweden), Ray Weiss (Scripps Institution of Oceanography, University of California San Diego, USA), Thorsten Warneke (University of Bremen, Germany), Camille Yver (LSCE, France)

Photo: Freepik

Key messages

- Total global greenhouse gas (GHG) emissions increased by 1.2% from 2021 to 2022, setting a record of 57.4 billion tons of carbon dioxide equivalent.
- The year 2023 was the warmest on record by a large margin, and during the first half of 2024 the world has experienced exceptionally high global temperatures and many extreme weather events with devastating impacts to society.
- If current mitigation policies are continued, it is estimated (with 66% probability) that global warming will be kept to a maximum of 3 °C throughout the century.

Greenhouse gas (GHG) emissions and concentrations

Over the 2011–2020 decade, human activities associated with the emissions of GHGs have unequivocally caused global warming, with global surface temperature reaching 1.1 °C above 1850–1900 (IPCC, 2023). GHG emissions increased by 1.2% from 2021 to 2022, reaching a record of 57.4 billion tons of carbon dioxide equivalent (GtCO₂e). Emissions of methane (CH₄), nitrous oxide (N₂O) and fluorinated gases, which have higher global warming potentials and account for about one quarter of current GHG emissions, are also increasing rapidly. Fluorinated gas emissions grew in 2022 by 5.5%, followed by CH₄ at 1.8% and N₂O at 0.9% (UNEP, 2023a).

As emissions rise, so do atmospheric concentrations of GHGs. The latest analysis of observations from the WMO Global Atmosphere Watch in situ observational network shows that the globally averaged surface concentrations¹ for CO₂, CH₄ and N₂O reached new highs in 2022, with CO₂ at 417.9 ± 0.2 ppm, CH₄ at 1 923 ± 2 ppb and N₂O at 335.8 ± 0.1 ppb (*WMO Greenhouse Gas Bulletin (GHG Bulletin), No. 19*). These values constitute, respectively, 150%, 264% and 124% of pre-industrial (before 1750) levels. The increase in CO₂ from 2021 to 2022 was slightly lower than the increase observed from 2020 to 2021 and slightly lower than the average annual growth rate over the last decade; this was most likely partly caused by natural variability, as CO₂ emissions have continued to increase.

For CH₄, the increase from 2021 to 2022 was slightly lower than that observed from 2020 to 2021 but considerably higher than the average annual growth rate over the last decade. For N₂O, the increase from 2021 to 2022 was higher than that observed any time before in our modern time record. However, atmospheric concentrations of GHGs are driven by both anthropogenic emissions as well as natural emissions and sinks, such as ecosystems that absorb CO₂, which are extremely sensitive to climate variability and change.

Current and historical GHG emissions vary significantly across regions, countries and groups of countries, reflecting patterns of global inequality and varying progress on climate action. For example, globally, the 10% of the population with the highest income accounted for nearly half (48%) of emissions, with two thirds of this group living in developed countries, while the bottom 50% of the world population contributed only 12% of total emissions. Additionally, nearly 80% of historical cumulative fossil and land use, land-use change and forestry CO₂ emissions came from G20 countries, with the largest contributions from China, the United States of America and the European Union, while least developed countries contributed only 4% (UNEP, 2023a). As national and regional inequalities in GHG emissions continue to grow, scientific reporting of these emissions is becoming increasingly important to support effective decarbonization pathways and track mitigation targets, as highlighted in Box 1.

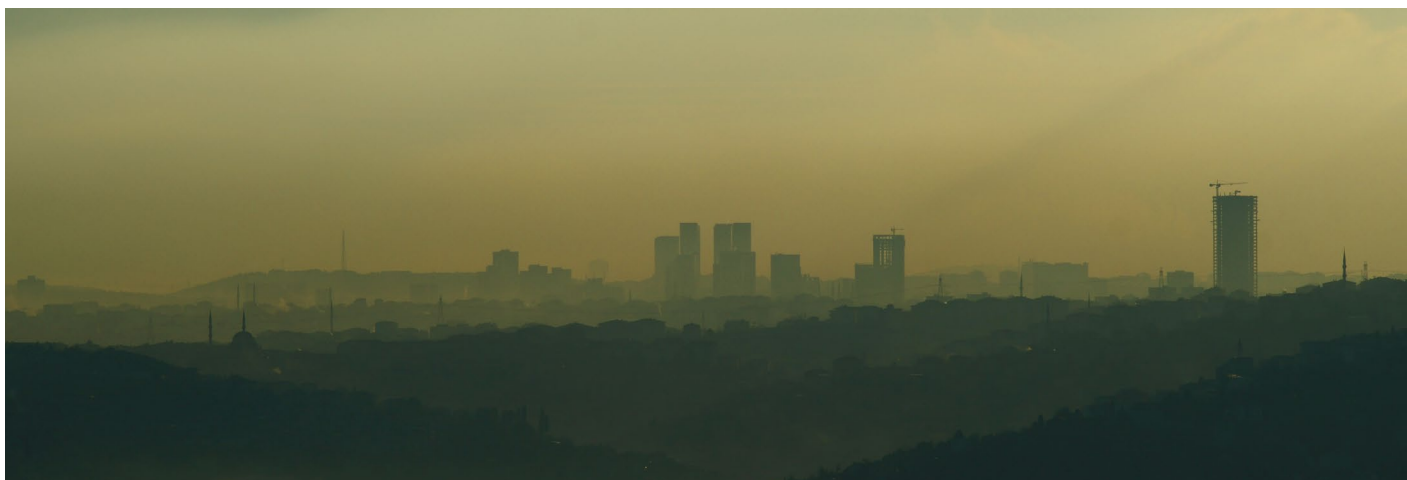


Photo: Freepik

1. The scientifically correct term for the abundance in the atmosphere of compounds such as carbon dioxide and other GHGs is dry air mole fraction, expressed as the number of moles of each gas per mole of dry air, often with units of ppm² or ppb³.

2. ppm – parts per million, that is, the number of molecules of a gas per million (10⁶) molecules of dry air

3. ppb – parts per billion, that is, the number of molecules of a gas per billion (10⁹) molecules of dry air

Box 1. Regional and national GHG budget analysis

The Global Carbon Project’s REgional Carbon Cycle Assessment and Processes (RECCAP2) conducts CO₂, CH₄ and N₂O budget analyses with higher spatial resolution, regionally relevant sources and sinks, and more detailed attribution to processes to better track the human and natural perturbations in atmospheric concentrations (Canadell et al., 2022; Friedlingstein et al., 2023; Saunio et al., 2024; Tian et al., 2024). In Australia, for example, fossil fuels are the largest source of CO₂ emissions from human activities, with an average of 403 million tons of CO₂ per year (2010–2019) (Figure 1). CO₂ emissions from natural wildfires and prescribed burning (human-caused) account for an even higher amount

at an average of 568 million tons of CO₂ per year. Unlike fossil fuel emissions, however, fire emissions are largely offset by vegetation regrowth, leading to an average net CO₂ accumulation in the atmosphere of 36 million tons per year (Villalobos et al., 2023). Factoring in the natural CO₂ sinks, the net carbon balance of Australia was a source to the atmosphere of 140 million tons of CO₂ per year during 2010–2019. Surprisingly, analysis has shown that Australia can be a large net source of CO₂ one year and a large net CO₂ sink the next, making it hard to detect long-term trends and understand if natural carbon sinks are growing or decreasing.

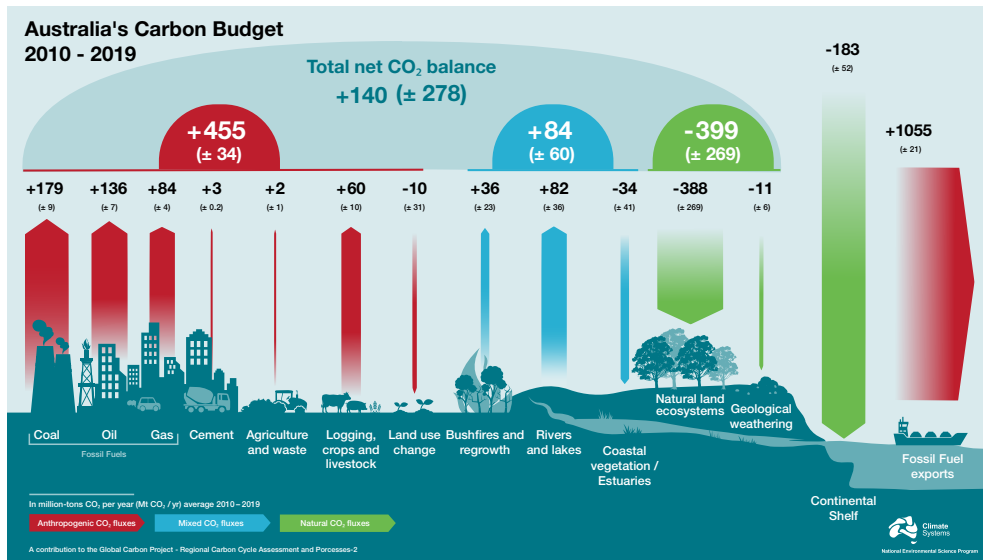


Figure 1. Australia's carbon budget with the mean annual anthropogenic and natural sources and sinks of carbon dioxide for 2010–2019 (million tons CO₂ per year). Source: National Environmental Science Program – Climate Systems Hub

At the regional level, the African continent includes a complex system of anthropogenic and natural sources and sinks of GHGs (Ernst et al., 2024). Emissions from land use change – an average of 1.7 billion tons of CO₂-equivalent per year (2010–2019) – are similar in magnitude to the emissions from fossil fuels at 1.74 billion tons of CO₂-equivalent. Terrestrial

ecosystems, in particular, support a large CO₂ sink of an average of 0.8 billion tons of carbon, representing 20% of the global land CO₂ sink. As anthropogenic emissions from land use change and fossil fuels continue to grow, however, the continent has become a net carbon source to the atmosphere (Figure 2).

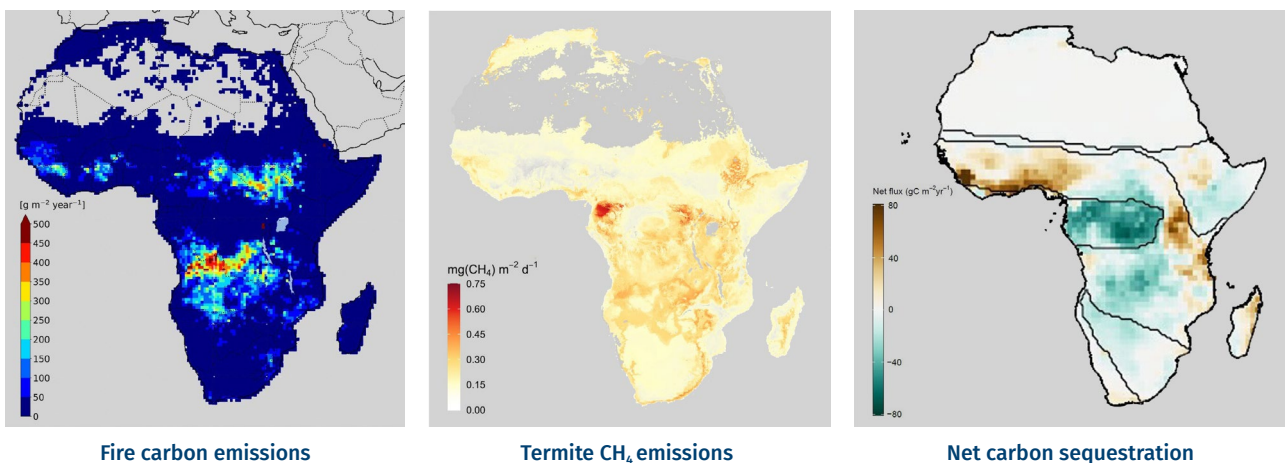


Figure 2. Components of the greenhouse gas budget of Africa for 2010–2019: fire CO₂ emissions, termite methane emissions and biospheric net carbon sequestration. Source: Ernst et al., 2024

Global climate indicators

Human-caused climate change has resulted in widespread and rapid changes in the atmosphere, ocean, cryosphere and biosphere, affecting many weather and climate extremes (IPCC, 2023). The WMO State of the Global Climate reports provide a summary of the state of global climate indicators (Trewin et al., 2021), including global temperature, ocean heat and cryosphere indicators, among others.

Global temperature

The years from 2015 to 2023 were the nine warmest on record, and it is likely that the years 2015 to 2024 will be the ten

warmest. The 2020–2024 global mean temperature average (based on data up to July 2024) is estimated to be 1.31 ± 0.12 °C above the 1850–1900 average. It is the warmest five-year period on record according to all data sets surveyed (Figure 3). Although La Niña conditions persisted from late 2020 to early 2023, a rapid transition to El Niño saw a 13-month string of exceptionally high global temperatures with June 2023 through June 2024 each setting a new monthly record. El Niño gives a short-term boost to global temperatures, whereas years affected by La Niña are typically a little cooler.

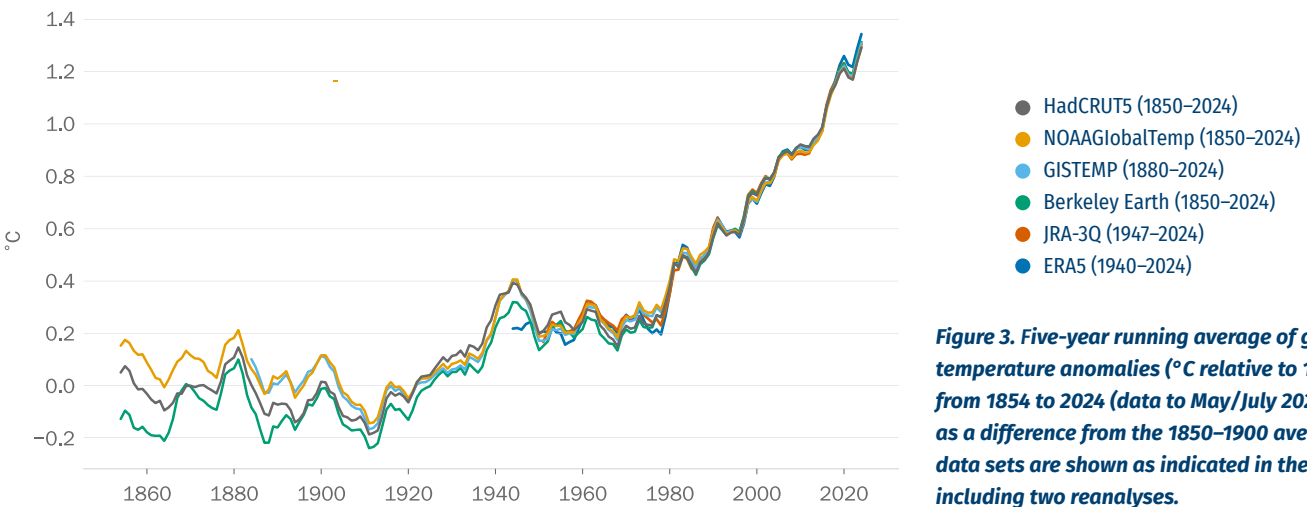


Figure 3. Five-year running average of global temperature anomalies (°C relative to 1850–1900) from 1854 to 2024 (data to May/July 2024) shown as a difference from the 1850–1900 average. Six data sets are shown as indicated in the legend, including two reanalyses.

Ocean heat content

Around 90% of the excess energy that accumulates in the Earth system due to increasing concentrations of GHGs in the atmosphere is taken up by the ocean. This added energy warms the ocean, and the consequent thermal expansion of the water leads to sea-level rise. Figure 4 shows the global ocean heat content, a measure of the heat that has accumulated in

the ocean, at 0–2 000 m from 1960 to 2023. The upper 2 000 m of the ocean continued to warm in 2023, reaching the highest heat content on record. It is expected that it will continue to rise in the future – a change which is irreversible on centennial to millennial timescales (Cheng et al., 2017; IPCC, 2019).

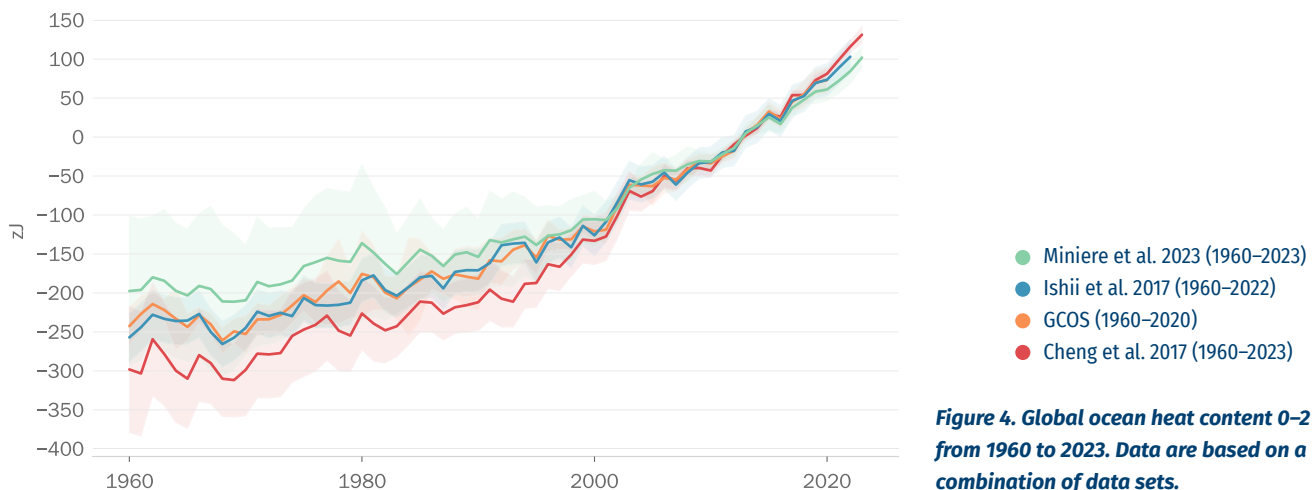


Figure 4. Global ocean heat content 0–2 000 m from 1960 to 2023. Data are based on a combination of data sets.

Cryosphere

Human influence is very likely the main driver of the decrease in Arctic sea-ice area between 1979–1988 and 2010–2019 (IPCC, 2023). Arctic sea-ice cover (both annual and late summer) is currently at its lowest level since at least 1850, and is likely to reach practically ice-free conditions at its summer minimum at least once before 2050. During the period 2019–2023, September Arctic sea-ice extent was on average around 1 million km² below the 1991–2020 average (Figure 5). In Antarctica, there was no significant trend in sea-ice extent from 1979 to 2020 due to regionally opposing change and large internal variability (IPCC, 2021). And while Antarctic sea-ice extent increased slowly from the start of the satellite era to a

maximum in 2014 (Figure 6), it dropped rapidly between 2015 and 2017 before reaching its lowest annual minimum on record in February 2023. The annual maximum extent in September 2023 was the lowest on record by a very large margin, likely associated with warming of the Southern Ocean (Purich and Doddridge, 2023). In addition to sea-ice extent, preliminary data available for 53 reference glaciers for the glaciological year 2022/2023 indicate an average global mass balance of –1.2 m water equivalent (m w.e.), which is nominally the largest loss of ice on record (WGMS, 2023). Glacier losses were particularly extreme in North America and Europe, with Swiss glaciers losing 10% of their remaining ice in the past two years.

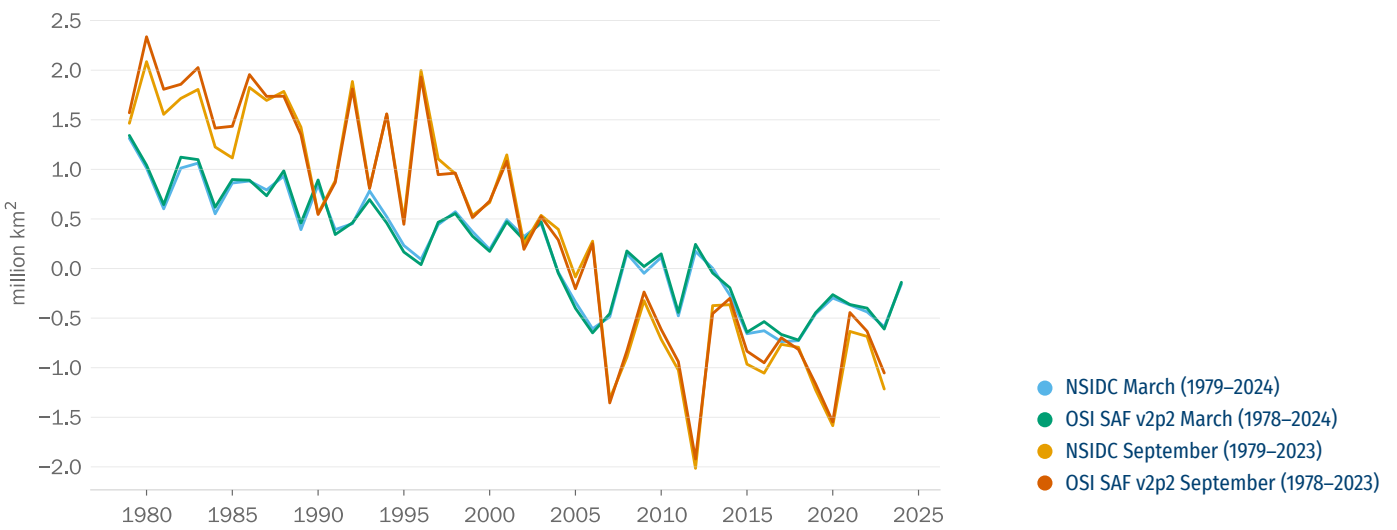


Figure 5. Sea-ice extent differences from the 1991–2020 average in the Arctic for the months with maximum ice cover (March) and minimum ice cover (September) from 1979 to March 2024. Source: United States National Snow and Ice Data Center (NSIDC) and European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT) Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility (OSI SAF)

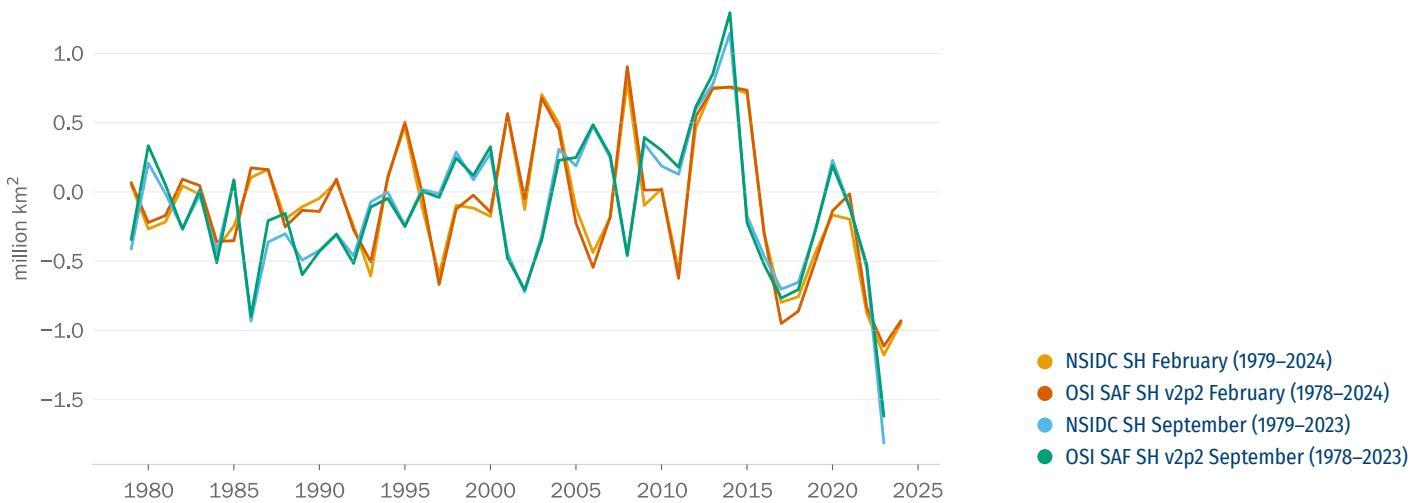


Figure 6. Sea-ice extent differences from the 1991–2020 average in the Antarctic for the months with maximum ice cover (September) and minimum ice cover (February) from 1979 to February 2024. Source: NSIDC and EUMETSAT OSI SAF

2024 extreme events

Halfway through the year, the world has already witnessed numerous extreme weather events – from heat waves to floods and tropical cyclones – with devastating impacts to society. Heat waves scorched large parts of Asia in April and May 2024, with a maximum temperature of 47.2 °C recorded in India on 30 April 2024. Schools were closed and the heat was particularly difficult for people living in refugee camps and informal housing, as well as for outdoor workers (WMO, 2024a). In Brazil, the state of Rio Grande do Sul experienced the most severe floods in its recorded history, with over 420 mm of rainfall affecting over 90% of the state and displacing 386 000 people (OCHA, 2024). Hundreds of thousands were left without electricity and water, disproportionately affecting informal settlements and Indigenous villages. A rapid study from World Weather Attribution, based on published, peer-reviewed methods, found that the floods were strongly influenced by the naturally occurring El Niño phenomenon as well as human-induced climate change, which increased the intensity likelihood of the event (Clarke et al., 2024). In Africa, World Weather Attribution also found that El Niño was a key driver of drought in vulnerable Southern African countries in early 2024. Zimbabwe, Zambia, Malawi, Angola, Mozambique and Botswana received less than 20% of the typical rainfall expected for February, with devastating impacts to local communities (Kimutai, 2024). And in the Caribbean, the Atlantic hurricane season began with the unprecedented early-season Category 5 Hurricane *Beryl*, which rapidly intensified and became the strongest June hurricane on record. The storm brought catastrophic winds and storm surge to the southern Windward Islands, setting a foreboding tone for the remainder of the hurricane season, which is predicted to be more active than usual (Thiem, 2024).

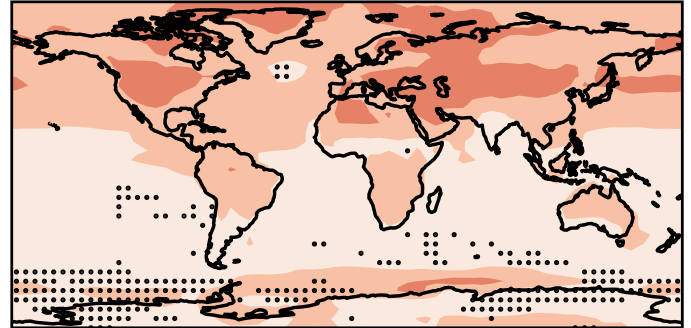
Looking ahead: climate predictions for 2024–2028

The year 2023 was record-breaking, becoming the warmest year on record by a huge margin due to a combination of factors, including continued warming from GHG emissions and El Niño (WMO, 2024b). According to the WMO Lead Centre for Annual-to-Decadal Climate Prediction, the trend of increasing global temperatures is expected to continue, with it being likely (86% chance) that at least one year in the next five will exceed the current warmest year on record (2023). It is also highly likely (90% chance) that the mean of the next five years (2024–2028) will exceed that of the previous five years (2019–2023). Annual mean global near-surface temperature for each year in this five-year period is predicted to be between 1.1 °C and 1.9 °C higher than pre-industrial levels, defined as the average over the period 1850 to 1900 (WMO, 2024c).

Additionally, it is likely (80% chance) that the global mean near-surface temperature in at least one of the next five years will exceed 1.5 °C above pre-industrial levels for the first time, and this chance is increasing with time. It is about as likely as not (47% chance) that the five-year mean will exceed this threshold. The Paris Agreement threshold of 1.5 °C refers to long-term warming averaged over 20 years, so temporary exceedances

during single months, seasons and years are expected to occur with increasing frequency as long-term global temperatures approach this level (WMO, 2024c).

MJJAS 2024–2028



NDJFM 2024/2025–2028/2029

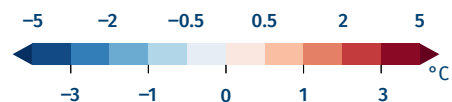
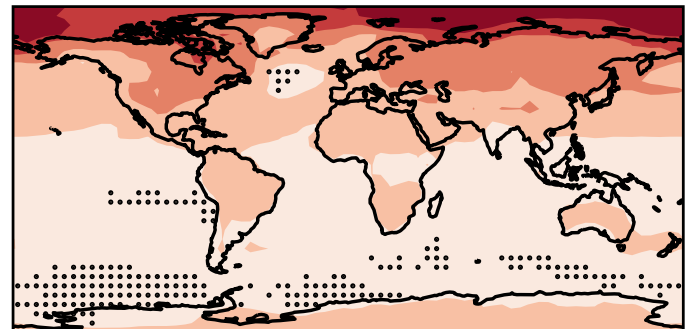


Figure 7. Five-year temperature forecasts. Ensemble mean predictions for near-surface temperature anomalies relative to 1991–2020 for the next five extended seasons of May to September 2024–2028 (left) and November to March 2024/2025–2028/2029 (right). Stippled where more than one third of models disagree on the sign of the anomaly. Source: WMO, 2024c

The predicted temperature patterns for two extended seasons, May to September and November to March, for 2024–2028 relative to the 1991–2020 average are presented in Figure 7. For both seasons, temperatures are likely to be above average everywhere, with enhanced warming over land. For November to March, we expect to see increased warming over the northern hemisphere, with the Arctic (north of 60°N) near-surface temperature warming predicted to be three times the global mean warming (WMO, 2024c).

Science for climate action

At the time of the adoption of the Paris Agreement, GHG emissions were projected to increase by 16% by 2030 relative to 2015. Now, that projected increase is 3%, indicating progress in mitigating global GHG emissions. Under the Paris Agreement, countries submit Nationally Determined Contributions (NDCs) every five years that present national efforts to limit global warming to well below 2 °C. By the end of 2023, 149 NDCs had been updated (counting the European Union and its 27 member States as a single Party), and if they are fully implemented, it is estimated that they will reduce global GHG emissions by about 5.0 GtCO₂e (range: 1.8–8.2 GtCO₂e) annually by 2030, compared with the initial NDCs (UNEP, 2023a).

Yet, the emissions gap in 2030 remains high. Current unconditional⁴ NDCs imply a 14 GtCO₂e gap for keeping warming to 2 °C with a 66% chance, and a 22 GtCO₂e gap for keeping it to 1.5 °C by the end of the century. The additional implementation of the conditional NDCs reduces these estimates by 3 GtCO₂e (Figure 8). It is estimated that the full implementation of unconditional and conditional NDCs would reduce global emissions in 2030 by 2% and 9%, respectively, compared with current policy projections. However, to reach levels consistent with limiting global warming to below 2 °C and 1.5 °C, global GHG emissions in 2030 must be reduced by 28% and 42%, respectively (UNEP, 2023a).

If current policies are continued, it is estimated that global warming will be kept to a maximum of 3 °C (range: 1.9–3.6 °C, 66% chance) throughout the century and further increase after 2100 as CO₂ emissions are not yet projected to reach net-zero levels by 2100. In the most optimistic scenario where all conditional NDCs and net-zero pledges are fully achieved, global warming is projected to be limited to 2 °C (range: 1.8–2.5 °C, 66% chance) over the course of the century. However, net-zero pledges remain highly uncertain, and there is only a 14% chance of limiting global warming to 1.5 °C, with a large possibility of global warming exceeding 2 °C or even 3 °C. As a result, urgent mitigation action is needed to narrow the emissions gap and pave the way for the full fulfillment of all net-zero pledges (UNEP, 2023a).

Ambitious adaptation action is also necessary for reducing the adverse impacts of climate change, minimizing losses and damages and safeguarding sustainable development gains. The complex and escalating nature of climate risks underscores the need for robust adaptation action that is grounded in diverse knowledge and promotes inclusive engagement to effectively reduce vulnerabilities across ecosystems and societies. Adaptation planning and implementation has progressed, but most observed adaptation responses are fragmented, incremental, sector-specific and unequally distributed across



Photo: Frédéric Couziniér

4. Unconditional NDCs are not contingent on a range of possible conditions, such as the ability of national legislatures to enact the necessary laws, ambitious action from other countries, realization of finance and technical support, or other factors. NDCs that are contingent on various conditions are known as conditional NDCs (UNEP, 2023a).

regions (IPCC, 2023). For example, one out of six countries still lack a national adaptation planning instrument, and a significant finance gap remains, with the flow of international public adaptation finance declining since 2020 (UNEP, 2023b). Additionally, there is increased evidence of maladaptation, which can lock in existing inequalities and vulnerabilities, particularly among marginalized populations. And while there are feasible and effective adaptation options today, many will become less effective as global warming increases and some human and natural systems reach adaptation limits (IPCC, 2023).

The science is clear – rising GHG emissions and atmospheric concentrations are leading to changes in key climate indicators and are affecting extreme events and contributing to devastating impacts globally, particularly among the world’s most vulnerable communities. With global temperatures expected to continue rising, urgent and ambitious climate action is needed to mitigate GHG emissions, adapt to the adverse impacts of climate change and minimize losses and damages. Leveraging emerging natural and social science, technology and innovation, climate action can support the achievement of the 2030 Agenda for Sustainable Development and safeguard our future for generations to come.

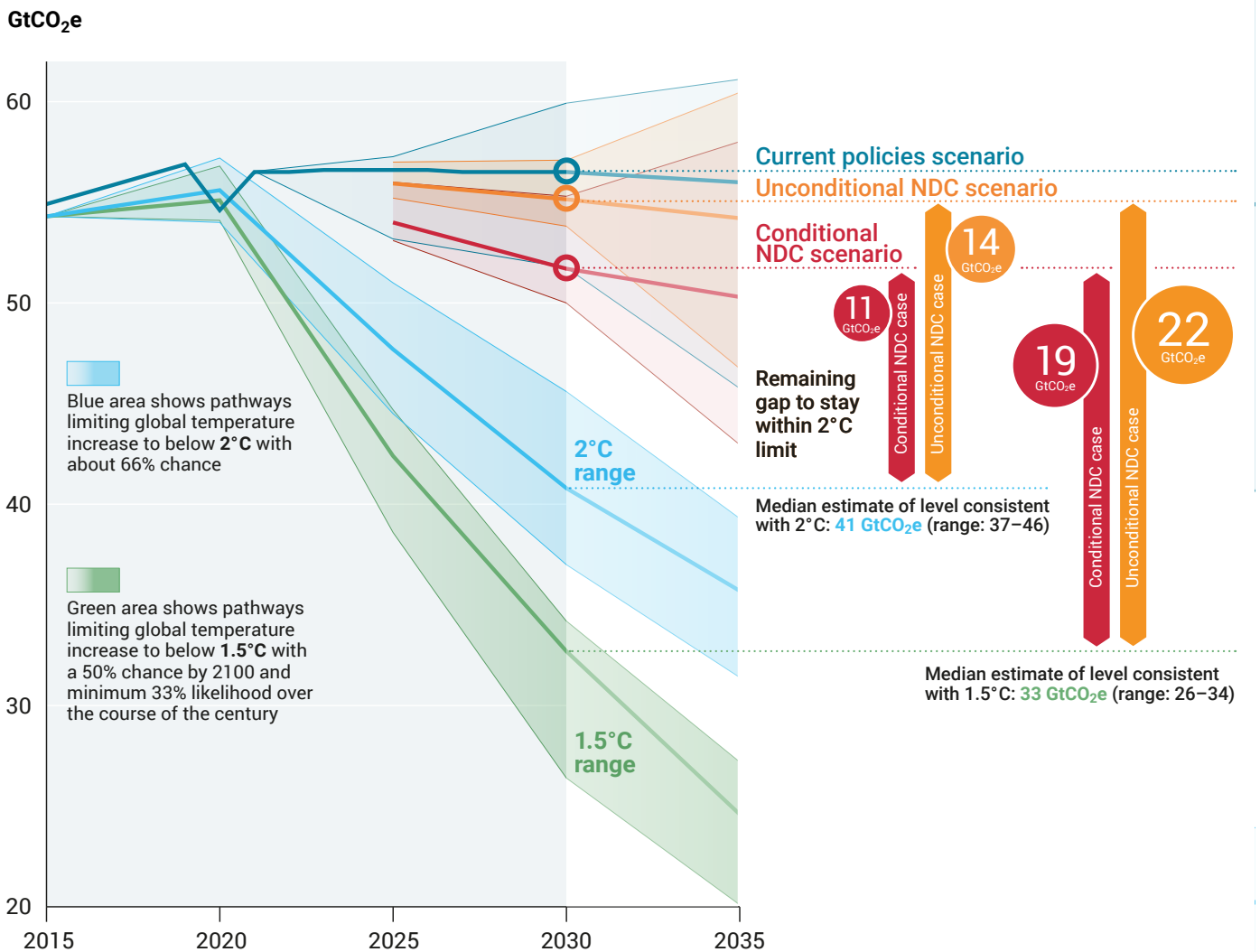


Figure 8. Global GHG emissions under different scenarios and the emissions gap in 2030 and 2035 (median estimate and 10th to 90th percentile range). Note: GtCO₂-eq – billion tons of carbon dioxide equivalent. Source: UNEP, 2023a

A photograph of a server room. The room is dimly lit with a strong green glow from the server racks. The racks are filled with equipment, and the floor is highly reflective, showing the green light. The ceiling has a grid pattern with recessed lighting and some equipment. The overall atmosphere is technical and futuristic.

CHAPTER 2

Artificial intelligence and machine learning: revolutionizing weather forecasting

Artificial intelligence and machine learning have emerged as potentially transformative technologies that can revolutionize weather forecasting and could equip society with better tools to drive progress towards climate change adaptation, disaster risk reduction and sustainable development.

Authors: Florian Pappenberger (ECMWF), Nils Wedi (ECMWF), Matthew Chantry (ECMWF), Christian Lessig (ECMWF), Simon Lang (ECMWF), Peter Dueben (ECMWF), Mariana Clare (ECMWF), Linus Magnusson (ECMWF), Estíbaliz Gascón (ECMWF), Florence Rabier (ECMWF), Amy McGovern (AI2ES, University of Oklahoma, USA), Hèou Maléki Badjana (Red Cross Red Crescent Climate Centre), Catherine de Burgh-Day (Bureau of Meteorology, Australia), Jürg Luterbacher (Justus Liebig University of Giessen, Germany), Monique M. Kuglitsch (Fraunhofer Institute for Telecommunications, Heinrich Hertz Institute, Germany), Hannah L. Cloke (University of Reading, UK)

Photo: Stefano Marzoli (ECMWF)

Key messages

- Artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) can make skillful weather modelling faster, cheaper and more accessible, enabling a paradigm shift in predicting extreme and hazardous weather events.
- Gaps in data availability, inadequate model resolution and concerns about ethics, such as insufficient transparency and unequal access, are challenges that limit the application of AI/ML for weather forecasting.
- Scientific advancements, capacity development and global collaboration can unlock the full potential of AI/ML in supporting climate change adaptation, disaster risk reduction and sustainable development while bridging global technological disparities.

Introduction

AI and ML are revolutionizing how we confront global issues such as climate change, disaster risk management and sustainable development. AI has been around for decades, but recently the technology's development has been accelerating at an unprecedented pace (United Nations Advisory Body on Artificial Intelligence, 2023). Although closely related, AI and ML serve different functions. AI is a broader concept referring to a wide range of technologies that enable machines to perform tasks typically requiring human intelligence, such as reasoning, learning, and self-correction. ML is a specific subset of AI focused on using algorithms to process data, learn from it, and make decisions or predictions based on these data. This process, known as training, involves teaching computer models to perform tasks like recognizing speech, identifying images or predicting trends by learning from large amounts of data. In meteorology, AI/ML have emerged as potentially transformative technologies that can revolutionize weather forecasting and could equip society with better tools to respond and adapt to climate change.

This chapter highlights how AI/ML can enable a paradigm shift in predicting extreme and hazardous weather events by making weather models cheaper, faster and more accessible to lower-income countries with limited computational capacities. Data-driven AI/ML weather models have shown good performance for many forecasting tasks and AI tools can help contextualize and communicate complex information for decision-making to support climate change adaptation and disaster risk reduction. Yet, there are challenges that limit realization of the full potential of AI/ML for weather forecasting, including gaps in data availability, inadequate model resolution and concerns about ethics, such as a lack of transparency and unequal access.

Scientific and technological advances along with strengthened international collaboration can advance AI-driven weather forecasting while promoting equity in support of global goals.

Artificial intelligence and machine learning: revolutionizing weather forecasting

Traditionally, weather forecasting relies on physics-based models to predict the behaviour of the atmosphere through a process known as numerical weather prediction (NWP). These models solve equations that represent physical processes, such as fluid dynamics and thermodynamics, to simulate the state of weather on short time scales. Substantial computational resources are required, however, to solve complex mathematical equations across global and regional scales. As a result, NWP can be costly in terms of computing power and financial and human resources, which is a barrier for many National Meteorological and Hydrological Services (NMHSs).

However, AI/ML are revolutionizing the future of weather forecasting. Instead of relying on costly physics-based numerical models, AI/ML models are trained on reanalysis and observational datasets, making weather forecasting faster and cheaper. And while AI primarily supports weather prediction today, this role may be reversed in the future, with weather prediction becoming primarily driven by AI. In fact, some evaluations have shown that AI/ML models are surpassing physics-based models in predicting some weather variables and extreme or hazardous events, such as tropical cyclones (Figure 1) (see, for example, Keisler, 2022; Pathak et al., 2022; Bi et al., 2023; Lam et al., 2023; Lang et al., 2024). On longer time



Photo: Adobe Stock

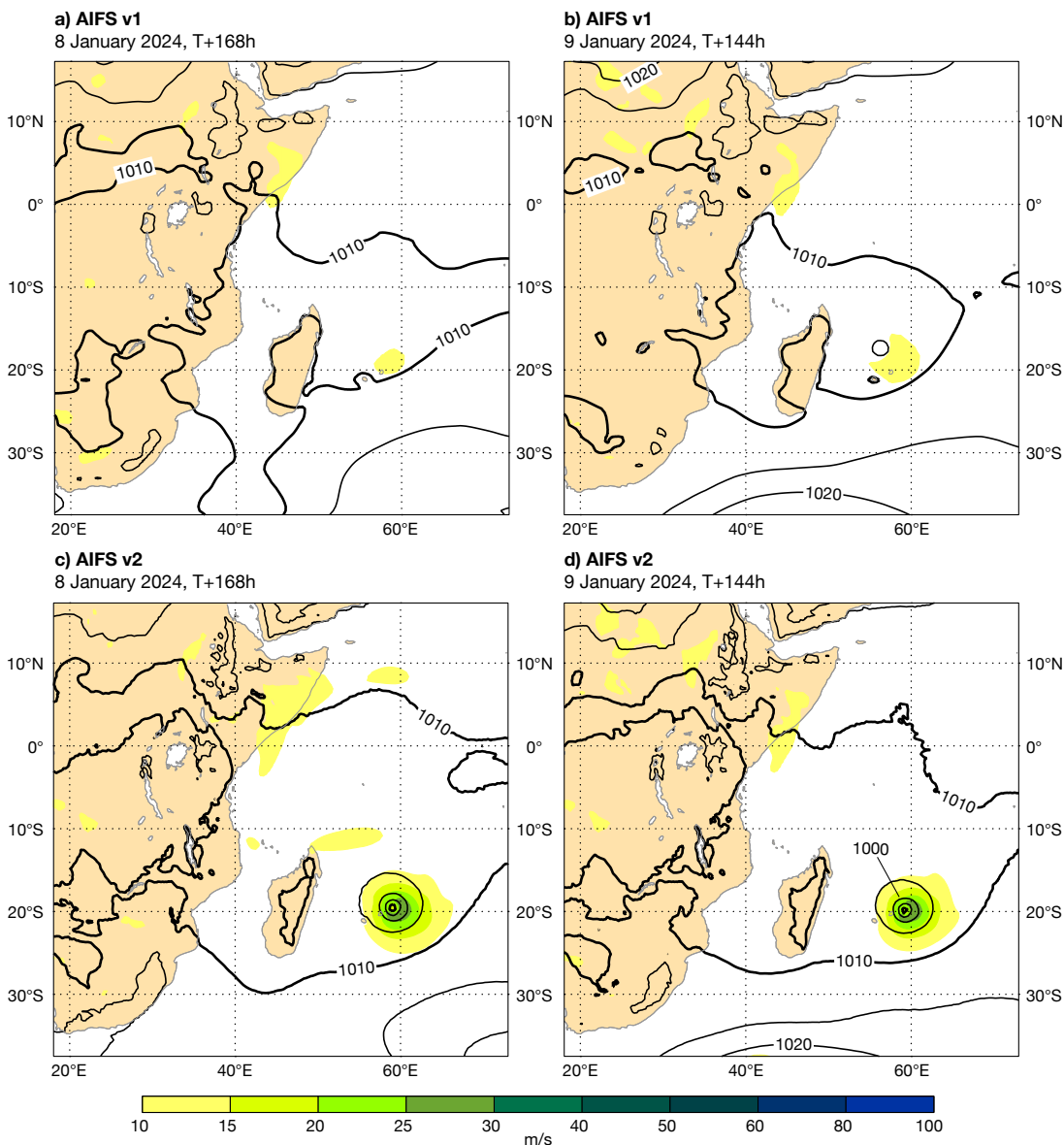


Figure 1. Recent advancements in the Artificial Intelligence/Integrated Forecasting System (AIFS) have improved cyclone detection capabilities by AI/ML models. Tropical Cyclone Belal struck Reunion and Mauritius with intense rains and powerful winds in January 2024 but was detected two days earlier by AIFS version 2 (bottom) compared to version 1 (top) primarily due to a significant increase in horizontal resolution. The figure shows mean sea level pressure (MSLP) and 850 hPa wind speed on 8 (a) and 9 (b) January 2024, valid at T + 168 h in AIFS version 1, and on 8 (c) and 9 (d) January 2024 for the same valid time in AIFS version 2. Source: ECMWF, 2024

scales, studies have shown that AI/ML models can also predict the El Niño Southern Oscillation up to three years ahead (see, for example, Ham et al., 2021; Patil et al., 2023). These developments in AI/ML for weather forecasting have largely been led by big technology companies, such as Google DeepMind, NVIDIA and Huawei, as well as forecasting centres, such as the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) and the United States National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). However, some evaluations of these AI models have found limitations in their performance (Box 1).

Additionally, AI/ML models can reduce the significant computational cost associated with producing the underpinning datasets required to support forecasts. For example, AI/ML

methods can enhance weather prediction by checking weather data quality (Sha et al., 2021), fusing different data sources and downscaling weather model outputs (see, for example, Harris et al., 2022). Previously, these capabilities were limited to large global forecasting centres due to the computational burden, but now they can be accessed by NMHSs that previously did not have sufficient resources. As a result, the barrier to entry for running a skillful forecast model for many NMHSs is significantly lowered. Lower costs have also allowed smaller public and private entities to enter the playing field by using AI to mimic weather forecasts of NMHSs.

Through large language models, such as ChatGPT, AI can also help contextualize and communicate complex information for

decision-making (see, for example, Koldunov and Jung, 2024). When used appropriately, these tools can enhance disaster preparedness, response and adaptation in support of global initiatives such as Early Warnings for All (EW4All), the Sustainable Development Goals (SDGs), the Paris Agreement and the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction. Although the trigger for potential disasters can be hazardous weather events, the

decisions on risk, adaptation or mitigation and structural changes in behaviour require information from a wealth of other sources in combination (for example, enhancing global weather and climate information with regional and local information). This can be more readily explored and refined through ML tools, empowering local actors to translate global information to local impacts.

Box 1. How good are machine learning models?

The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) has undertaken routine evaluation of AI weather models trained on ERA5, a global climate reanalysis combining observational data with models to provide hourly updates on atmospheric conditions (Figure 2). Predictions of severe weather events like windstorms, extreme temperatures and tropical cyclones were analyzed and the results show that current ML models consistently perform well with some limitations. For example, ML models can accurately forecast the path of tropical storms but may underestimate storm intensity. AI models can also predict intense windstorms several days in advance, but with some underestimations in maximum wind speeds. Additionally, AI forecasts initialized

from ECMWF’s 9-km resolution forecasts can capture the pattern of summer and winter temperatures, but fall short in capturing extremes accurately, in particular the lowest observed temperatures, which is also a challenge in traditional numerical weather prediction (NWP) forecasts. Comparisons against standard benchmarks showed that AI forecasts initialized from ECMWF’s operational 9-km analysis were generally more accurate than any existing global forecasts produced in a traditional way. However, errors in AI forecasts and traditional physics-based model forecasts are often correlated, highlighting common challenges in predicting certain weather situations.

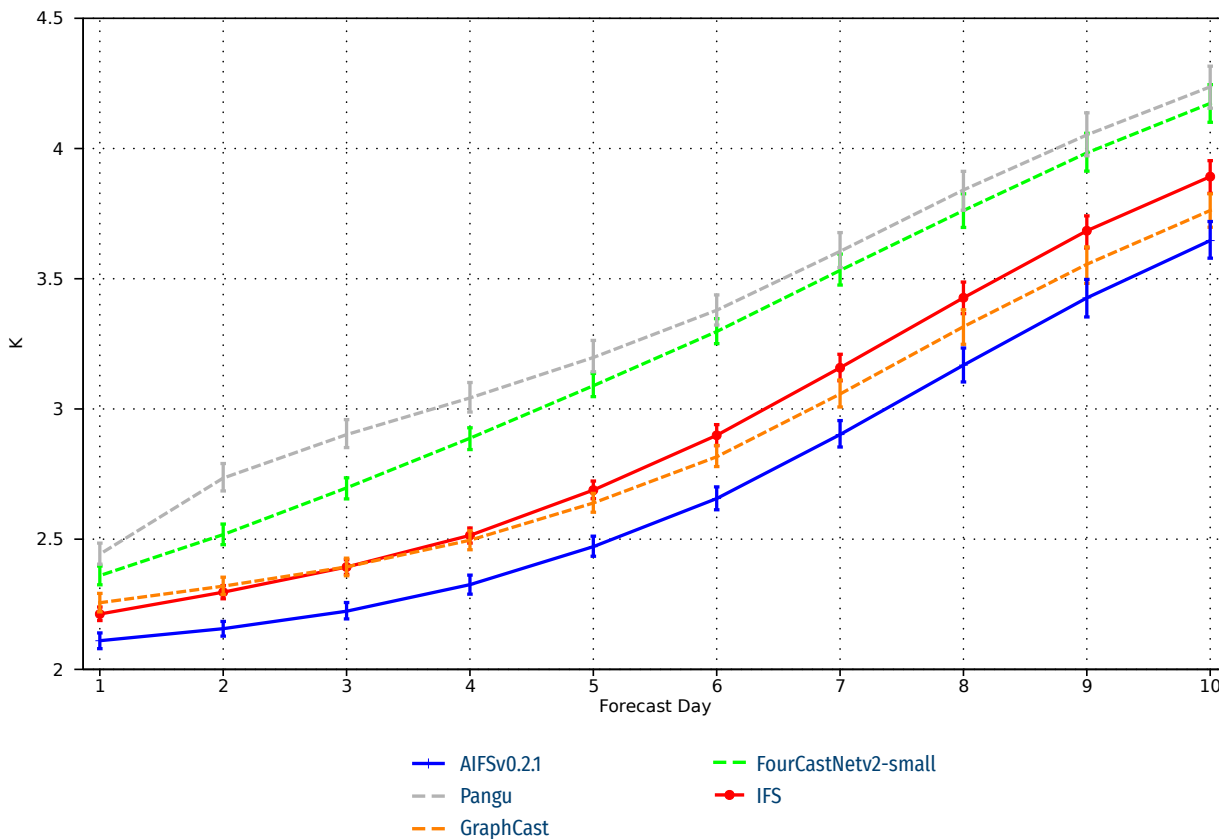


Figure 2. Two-metre temperature error evolution over a 10-day forecast averaged over the southern hemisphere for the year 2022 from different AI modelling systems (Huawei’s Pangu-Weather (Bi et al., 2023), NVIDIA’s FourCastNet (Pathak et al., 2022), the AIFS (Lang et al., 2024) and Google Deepmind’s GraphCast (Lam et al., 2023) with the physical model IFS as a reference (lower error is better). Notably, each of the AI 10-day forecasts takes less than one minute to produce on a single graphics processing unit (GPU). Source: ECMWF, 2024

Gaps and challenges

Although tremendous opportunities are arising from advances in AI/ML for weather forecasting, many challenges prevent the full application and realization of the potential of these technologies. In particular, limited data quality and availability remains a principal challenge. Currently, accurate AI/ML models require large, high-quality and consistent data sets (see, for example, ERA5 (Hersbach et al., 2020)), particularly in the training phase. While the global observing system provides a large volume of historical and current data, challenges remain in handling the sheer scale of data required for training, and economic, political and geographical differences between countries can result in uneven data availability. Additionally, gaps in spatial and temporal variability of data, such as the lack of data for small-scale weather phenomena and the absence of high-resolution global reanalysis data, affect training and limit the effectiveness of AI/ML models. As a result, training must rely on model outputs or direct observations, which is more difficult and computationally expensive – a challenge that must be balanced with the need for rapid, accurate and actionable predictions.

Further complicating matters is the absence of harder-to-predict variables, such as ocean, land, cryosphere and carbon-cycle variables, in current AI/ML models. These variables are deeply interconnected, but their absence limits the accuracy of extended-range weather forecasts, seasonal predictions and longer-term climate projections, particularly at local scales (Woolnough et al., 2007; Vellinga et al., 2020). There has been

a shift towards targeted enhancements in model resolution (Nippen and Chantry, 2024), where regional specificity is prioritized without the need for comprehensive global resolution upgrades. However, downscaling methods to enhance model resolution require considerable computational resources, which remains a challenge (Mardani et al., 2024).

Additionally, ethical challenges, such as insufficient transparency and unequal access, limit the uptake and effectiveness of AI/ML weather models (McGovern et al., 2022). For example, ML models do not make the physical processes they simulate explicit, potentially eroding public trust and confidence in AI/ML forecasts. Efforts are being made to improve the interpretability of ML models (Ghaffarian et al., 2023), including integrating physics-based constraints (see, for example, Harder et al., 2022) and developing methods to test models' representation of physical processes they have not been trained on (Hakim and Masanam, 2024). However, there is still a need to enhance transparency to ensure trust and confidence, which can lead to greater uptake and acceptance of information that is critical for society. Additionally, AI/ML tools that enable efficient use of the available data are still not accessible to everyone, which risks further exacerbating inequalities, particularly those related to the global digital divide. Limitations in data, computation and user skill sets continue to prevent access to these emerging technologies and must be addressed to ensure everyone can benefit from the many benefits they deliver across society.



Photo: Bruno Fanulin



Photo: UNDP Cambodia

Looking ahead: the future of artificial intelligence and machine learning for weather and climate

Looking ahead, AI/ML will continue to push boundaries across weather and climate. The next frontier will likely involve data assimilation and the development of robust foundation models, which are trained on large, varied datasets without a single specific task in mind, enabling them to be exported and adapted to more specific applications. Additionally, it will be critical to extend existing atmospheric AI/ML models to encompass the full Earth system to enhance not only weather forecasting but also climate prediction capabilities (see, for example, Wang et al., 2024; Watt-Meyer et al., 2023). Broadening the scope of data, including untapped data from commercial satellite providers as well as crowd-sourced data (Internet of Things), holds promising potential to enhance the performance of AI/ML models, which generally improve as the volume and diversity of training data increases. Ensuring these training data are openly available with low-cost federated data storage platforms and computing infrastructure, in combination with standardized tools to utilize data and build ML applications for weather, can help democratize use and exploitation of ML in NWP across the globe.

We are moving towards a future where AI-driven insights support decision-making and empower communities worldwide to mitigate risks associated with climate variability and extreme and hazardous weather. Strong global governance and frameworks are needed to ensure AI/ML are developed with humanity's best interests in mind and are accessible to all. Enhanced transparency in AI/ML weather models, including greater openness and traceability of training data, will be important for building trust and developing standards for the responsible use of these tools. Additionally, ethical AI development must address systemic biases and equal access by ensuring technology considers all communities, particularly those most vulnerable. Training and capacity development are also needed to address the digital divide and ensure the effective, responsible and equitable application of AI/ML tools. The evolution of these technologies underscores the importance of global collaboration to unlock the full potential of AI/ML in enhancing climate action, empowering local actors and bridging technological disparities to support achievement of a more sustainable and resilient future for all.



CHAPTER 3

Space-based Earth observations: enhancing weather, climate, water and related environmental applications

Innovations in space-based Earth observations can open new frontiers to advance weather, climate, water and related environmental applications, accelerate progress towards global goals and foster peaceful and sustainable benefits for all.

Photo: NASA

Authors: Jumpei Takami (UNOOSA), Anne-Claire Grossias (UNOOSA), Lorant Czarán (UNOOSA), Gemechu Jebeso Morketo (Central European University), Ajadi Sodiq (Central European University), Paolo Ruti (EUMETSAT)

Key messages

- High-resolution and high-frequency observations of the Earth system are crucial for effective weather forecasting, climate prediction and environmental monitoring.
- Leveraging public–private partnerships, innovations in space-based Earth observations such as very-high resolution imaging and mega-constellations can open new frontiers and accelerate progress towards global goals.
- International collaboration, comprehensive governance frameworks and innovative financing models can support space-based Earth observation for weather, climate, water and related environmental applications.

Introduction

From pigeons to balloons and satellites, humanity's efforts to observe and measure Earth phenomena have advanced rapidly over the last 100 years. Today, satellites allow us to observe Earth's land, oceans and atmosphere at increasingly higher resolutions and frequencies, providing services that are crucial to society (Emery and Camps, 2017). In the context of weather, climate, water and environmental applications, new satellite technologies can enhance weather data and contribute to the creation of long-term climate data records, which are crucial for climate services, particularly in vulnerable regions. Additionally, satellite technology can be a cost-effective tool in supporting the achievement of global goals, such as the Paris Agreement, Sendai Framework for Disaster Risk Reduction and 2030 Agenda for Sustainable Development (Lemmens, 2011; Hegglin et al., 2022).

This chapter provides a high-level overview of space-based Earth observations for weather, climate, water and related environmental applications and highlights some of the latest advancements in science and technology related to satellite observations. Additionally, this chapter identifies gaps and challenges that limit the realization of the full potential of these advancements and that must be addressed to ensure space-based Earth observations foster sustainable benefits for all.

Space-based Earth observations for weather, climate, water and environmental applications

The world's first weather satellite was launched on 1 April 1960, marking the beginning of a new era (WMO, 2023). Since then, remarkable technological advancements have been achieved. Spectrometers can now measure radiance emitted from the Earth across thousands of wavelength channels, compared to just a few in the past, and advances in scatterometers and altimeters have enhanced ocean monitoring. These advancements have paved the way for improved weather prediction, enhanced understanding of our climate system and more robust environmental monitoring.

The increasing availability of satellite imagery and observation data has improved our ability to predict high-impact weather events across time scales, from hours to days, including in regions with complex terrain or insufficient surface observation data (Du et al., 2021). Technologies such as microwave sounders can "slice" the atmosphere vertically to better understand how key variables in weather forecasting change throughout the

atmosphere. Satellite data measuring storm-related variables are essential for nowcasting, or the prediction of rapidly developing atmospheric events, such as thunderstorms, on timescales up to six hours (Box 1).

Additionally, satellite observations improve our ability to monitor the state of our climate and project future changes in climate with reduced uncertainty (Guo et al., 2015). For example, satellite observations and data are essential for monitoring polar ice changes, informing climate models and understanding climate impacts (Hall, 1988). Also, international collaboration enables the use of geostationary satellites to establish long-term records of essential climate variables and headline indicators, which provide a basis for assessing the state of the global climate system (Trewin et al., 2021). This information supports effective decision-making and adaptation, including

Box 1. Space-based Earth observations: building capacity for nowcasting of thunderstorms in Southern Africa

Space-based Earth observations with high temporal and spatial resolution enhance nowcasting capabilities. As a result, weather forecasters can observe thunderstorms as they form, assess how severe they will be and provide early warnings that enable members of the public to take anticipatory action to minimize impacts. In Southern Africa, for example, severe thunderstorms threaten lives and cause significant damage to property and livelihoods, particularly in urban areas. The Weather and Climate Information Services (WISER) Early Warnings for Southern Africa (EWSA) project aims to build capacity for nowcasting using real-time satellite images of Africa to predict high-impact hydrometeorological hazards in urban areas (Symonds, 2023). Additionally, the project engages with disaster risk management agencies and non-governmental organizations to co-produce outputs with people living in cities, including disadvantaged groups, such as women and people with disabilities. As a result, the WISER EWSA project aims to not only advance nowcasting technology but also help ensure that everyone receives these early warnings and knows what action to take to reduce the risk of negative impacts.

at local levels, and reduces the risk of maladaptation (*United in Science 2023: Sustainable Development Edition*).

Finally, space-based Earth observations are also pivotal for environmental monitoring. For example, synthetic aperture radar (SAR) imaging, which involves satellites emitting radar signals that are reflected and then recorded by instruments on the same satellite, are particularly useful because they can generate images even when it is dark or cloudy. As a result, SAR imaging offers all-weather, day-and-night Earth observation, which is crucial for many applications, such as tracking deforestation, monitoring sea ice or disaster risk reduction and response. Environmental monitoring utilizing space-based Earth observations can support water and land management by measuring and monitoring soil conditions to detect drought conditions and inform anticipatory action to alleviate food and water insecurity in vulnerable regions across the world (Schollaert Uz et al., 2019; Dube et al., 2022).

Scientific and technological advancements in space-based Earth observations

Science and technology have led to incredible advancements in space-based Earth observations in recent decades, greatly enhancing weather, climate, water and related environmental applications. For example, predicting fast-changing weather events requires information about atmospheric variables, such as temperature, moisture and wind. New hyperspectral technology used in geostationary satellites will soon provide frequent high-resolution temperature and humidity data, and space-based lidar technology is enhancing the measurement of winds. Additionally, the use of a multi-sensor approach that combines data from different types of sensors can improve

Box 2. Global Greenhouse Gas Watch (G3W) – informing international climate policy

Successful implementation of the Paris Agreement will require sustained, near-real time monitoring of GHG fluxes and concentrations to assess the impact and overall effectiveness of mitigation efforts undertaken by the Parties to the Agreement. WMO's Global Greenhouse Gas Watch (G3W) initiative will provide a platform for the international exchange of space-based and surface-based observations and modelling products to estimate the fluxes of CO₂, CH₄ and N₂O, taking into consideration both human and natural influences. Building on WMO's experience in facilitating international collaboration and its longstanding Global Atmosphere Watch programme, G3W will provide quantitative data to help improve our understanding of GHG cycles and better prediction of long-term climate trajectories. As a result, the initiative will provide information to support decision-making regarding mitigation actions and monitor progress towards achieving commitments.

the tracking and analysis of heavy rainfall and enhance understanding of the hydrological cycle, which is critical for predicting and assessing climate change.

Additionally, the resolution of satellite imaging continues to improve thanks to scientific and technological advances. The latest generation of very high resolution (VHR) Earth observation satellites offers sub-metre resolution imagery up to 30 cm per pixel, enabling more precise monitoring of environmental changes from global to local scales (Neigh et al., 2019). These days, there are numerous commercial VHR data sources that complement existing government-funded Earth observation systems. These initiatives highlight the importance of private-sector investments in space-based Earth observations and a public- and private-sector industry that can advance Earth observation data through collaboration.

Global navigation satellite systems (GNSS), which have provided global positioning, navigation and timing services for decades, are increasingly being used in innovative ways to enhance ocean observations. For example, GNSS reflectometry technology uses reflected signals to infer sea-surface heights and temperatures, wind speeds and significant wave heights, among other variables, which are critical for enhancing understanding of atmospheric and ocean coupling to improve weather and climate prediction (Xing et al., 2022). Additionally, GNSS radio occultation, another remote sensing technique utilizing GNSS, can analyze atmospheric temperature profiles that are critical to enhancing numerical weather prediction skill.

In addition, the capabilities of satellite observations to monitor atmospheric composition are growing rapidly. For example, the Copernicus Anthropogenic Carbon Dioxide Monitoring Constellation will combine high-resolution satellite measurements of CO₂ and CH₄ emissions with ground-based measurements and modelling to distinguish anthropogenic emissions from natural sources (ESA, 2022). Other initiatives, such as NASA's Orbiting Carbon Observatory-3 (OCO-3), as well as private-sector space missions will provide complementary high-resolution global GHG monitoring. These advancements are giving rise to new initiatives that can inform international policy (Box 2) and societal applications, particularly in the health sector, which requires air quality information to inform decision-making and adaptation (*2023 State of Climate Services: Health*).

Finally, recent advances, including large constellations of satellites being developed, laser communication and edge computing, could enhance space-based Earth observation data collection, connectivity and data availability. For example, commercial providers are breaking technological barriers with the miniaturization of instrument components, which has reduced the size, weight and cost of satellites. This has led to a new era of small satellites (SmallSats) that are more agile, cheaper to produce and launch, and easier to coordinate. These SmallSats form large constellations that help collect different types of weather and environmental data faster and in more

agile ways. They also provide global broadband access and enhance Earth observation data distribution, offering easier near real-time access to remote sensing data received from satellites. However, the growing number of objects in space has also led to an increase in space debris, which can threaten to impair or destroy other spacecraft in orbit (UNOOSA and ESA, 2023). Additionally, research indicates that the use of laser communication can significantly improve the speed of data transfers between satellites and ground-based infrastructure, making access to imagery data faster and easier (Marbel et al., 2022). Edge computing is also increasingly being used to process data directly on the satellite, rather than transmitting raw data to Earth for analysis, which can provide faster insights for decision-making (Leyva-Mayorga et al., 2023).



Photo: NASA

Gaps and challenges

Despite scientific advancements and expanding investments in new space technologies, gaps remain in accurately measuring critical ocean, climate, aerosol and hydrological variables and in covering sparsely observed areas such as the cryosphere. Additionally, data accessibility and standardization pose significant challenges, particularly for lower-income countries that lack the infrastructure, resources and expertise to effectively utilize space-based data (Macphail, 2009). Moreover, the differences in data formats and collection methods create interoperability issues, complicating the integration of data from various sources. Additionally, high data quality and ground-truthing are needed to increase the accuracy of satellite data, which require calibration and validation through ground-based observations (Militino, et al., 2018), which are often limited in remote regions and in low-income areas, leading to inconsistencies and uncertainties in satellite-derived information.

Technological and funding limitations are also significant barriers (Andries et al., 2019). Many satellites still rely on traditional data transmission methods because new technological solutions are not fully operational or cost-effective, especially in lower-income countries. These traditional methods can lead to delays in data transmission processing, where timeliness is essential, particularly for nowcasting services supporting early warning systems. They are also increasingly at risk due to the growing demand for radio frequencies by the telecommunications

industry. Additionally, launching and maintaining satellites remains prohibitively expensive for many nations and organizations, despite the rise of SmallSat constellations and commercial Earth observation companies. Funding limitations also hinder access to data, despite negotiation efforts by the United Nations to reduce the cost of satellite data.

Finally, challenges remain in establishing and implementing international frameworks for space-based Earth observations. While progress has been made in establishing global data sharing regulations, geopolitical tensions can influence the willingness of nations to share crucial Earth observations and information, hindering international collaboration and data access (Harris and Baumann, 2021). Additionally, in the context of the growing number of objects and actors in space, further collaboration is needed to strengthen governance frameworks to ensure the safe and sustainable use of space in support of global goals.

Looking ahead: the future of space-based Earth observations

Moving forward, a multifaceted approach is needed to enhance the quality, coverage, quantity and accessibility of space-based Earth observations and data, particularly in lower-income countries. Improving the quality of satellite data can be achieved through rigorous calibration and validation with ground-based observations, which will reduce uncertainties and improve the accuracy of climate models and disaster assessments, for example (Yamamoto et al., 2010). Additionally, data accessibility can be enhanced through new technologies and international initiatives. For example, Earth observation data and related services are increasingly moving to “the cloud”, which provides on-demand availability of computing resources from various locations globally. Utilizing the cloud can enhance data storage, processing and accessibility, therefore reducing costs and facilitating rapid data dissemination. However, accessibility barriers still remain in lower-income countries where Internet access is challenging. Innovative financing models, public-private partnership and increased investments can address funding limitations, help reduce costs, scale up the use of tools and enable research into novel observation methods, which can open new frontiers in Earth observations and data (Salcedo-Sanz et al., 2020).

Finally, stronger international collaboration is important to promote open data sharing as well as capacity building, training and technology transfer, which can empower countries to process and analyze satellite data for climate action and disaster risk reduction. Collaboration is also essential to establish clear regulations on issues such as data sharing, security and space debris, for example, and to promote comprehensive governance frameworks, such as the WMO Integrated Global Observing System, which addresses observations needs for weather, climate, water and related environmental services (*Vision for WIGOS in 2040* (WMO-No. 1243)). As a result, advances in space-based Earth observations can be optimized to foster peaceful and sustainable benefits for all.

An aerial photograph showing a dark blue river winding through a dense, vibrant green forest. The river curves through the landscape, creating a series of meanders. The forest appears thick and healthy, with varying shades of green. The sky is a pale, hazy blue, suggesting a clear day. The overall scene is a natural, undisturbed landscape.

CHAPTER 4

Bridging virtual and physical realms: leveraging immersive technologies for water and land management

Immersive technologies such as digital twins, virtual reality and the metaverse can revolutionize land and water management by enabling interactive and data-driven solutions that bridge the physical and digital worlds, enhancing decision-making and the engagement of diverse actors.

Photo: Dan Roizer - Unsplash

Authors: Nakul Prasad (WMO), Stefan Uhlenbrook (WMO), Hwirin Kim (WMO), Celine Cattoen (NIWA, New Zealand), William Scharffenberg (USA), Monique M. Kuglitsch (Fraunhofer Institute for Telecommunications, Heinrich Hertz Institute, Germany), Abd Salam El Vilaly (UNCCD), Bilel Jamoussi (ITU)

Key messages

- Socioeconomic impacts and climate change are straining water and land resources, threatening food and water security and highlighting the need for integrated water and land management to support sustainable development and climate action.
- Immersive technologies such as digital twins, virtual reality and the metaverse can revolutionize land and water management by offering immersive, interactive and data-driven solutions that bridge the physical and digital worlds to enhance decision-making and the engagement of diverse actors.
- International cooperation, knowledge sharing and robust multilateral frameworks are crucial for adopting these innovative solutions to better manage land and water resources and ensure a sustainable and equitable future.

Introduction

Since the beginning of time, land has served as the foundation for human settlements and water has shaped the Earth's surface, playing a major role in the rise and fall of civilizations (Roberts et al., 1998; DGB Group, 2023; Pacific Institute, 2023). Today, population growth, complex socioeconomic impacts and a changing climate have put immense pressure on both water and land resources, leading to widespread degradation that threatens society. For example, flood hazards are increasingly exacerbated by land degradation and poor water management, resulting in heightened vulnerability for communities, especially in rural areas. Additionally, current research suggests a close relationship between areas experiencing significant water and land degradation and areas troubled by high levels of rural poverty and malnutrition, threatening sustainable development. As a result, integrating water and land management is crucial to achieving the 2030 Agenda for Sustainable Development.

Recognizing the growing land and water degradation crisis, this chapter highlights the promise of emerging technologies, including digital twins, the metaverse and virtual reality (VR). These technologies offer immersive, interactive and data-driven solutions, enhancing our understanding and management of complex processes that govern water and land resources. From simulating flood and drought events to predicting water flow and accumulation, as well as land degradation, digital twins and immersive technologies can drive innovation and solutions. However, challenges such as limitations in data availability, quality and interoperability as well as gaps in funding and legal and regulatory frameworks must be overcome for these technologies to reach their full potential. Through international collaboration, engagement with diverse actors and data collection and standardization initiatives, we can advance efforts to incorporate the use of digital twins and immersive technologies to address global challenges.

A growing crisis: the water and food nexus threatened by land and water degradation

Water and land resources management are at the heart of socioeconomic development. The interconnected issues of surface and groundwater depletion and land degradation can impede efforts to achieve the Sustainable Development

Goals (SDGs). For example, agriculture accounts for nearly 70% of consumption of freshwater resources, with this percentage increasing to 90% in low-income countries (Fujs and Kashiwase, 2023). In many countries, however, agriculture employs unsustainable water usage practices and remains one of the largest polluters of both groundwater and surface water. Additionally, sectoral interests have dominated water resource allocation for decades without proper consideration of the impacts downstream or the need to sustain water resources. In addition, the use of improper practices can displace soils, leading to erosion, which reduces the depth, nutrient content and water-retaining capacity of soils. Unchecked erosion can transform productive agricultural areas into barren wasteland and cause severe downstream impacts such as polluted drinking water, silt-filled rivers and irrigation canals and degraded coastal ecosystems, and increasing the risk of landslides (Jinendradasa, 2002).

Land degradation and climate change are also deeply intertwined. For example, land degradation reduces the Earth's capacity to sequester carbon, as healthy soils and vegetation can act as carbon sinks. Additionally, when land is degraded through deforestation or erosion, stored carbon is released into the atmosphere, increasing CO₂ levels. The loss of vegetative cover also disrupts the climate system by altering the albedo of land surfaces, or the amount of sunlight they reflect, which has an impact on temperature regulation. Climate extremes exacerbate these problems, and management of both land and water resources globally, including in developed and least-developed countries, is a serious governance challenge. Furthermore, for basins that cross national borders, water management decisions made upstream can have trickle-down impacts that threaten peace and global security.

The promise of emerging technologies: metaverse, digital twins and virtual reality

Throughout history, technologies such as water-capturing cisterns, aqueducts and dams, as well as advances in land-use practices, such as conservation tillage and crop rotation, have helped communities access and manage water resources and mitigate land degradation. Today, as the pressure on water resources and land grows, there is an increasing interest in

leveraging new technologies to collect and digest observations and to visualize different scenarios. While technologies such as AI, drones and the Internet of Things (IoT) have been gaining popularity, a new set of technologies leveraging digital twins and the metaverse is emerging that creates highly detailed, interactive digital replicas of real-world environments.

Digital twins are defined as a virtual representation designed to accurately reflect a physical object or system (**What Is a Digital Twin?**). The metaverse, on the other hand, is an integrative ecosystem of virtual worlds that provides immersive experiences, creating new value from economic, environmental, social and cultural perspectives (ITU FG-MV, 2023). Digital twins are essentially the building blocks of the metaverse, enabling us to visualize different scenarios and enhancing the immersive experience for users.

Digital twins have been in existence for several decades. The United States National Aeronautics and Space Administration (NASA) was one of the initial pioneers of digital twin technology, creating replicas of spacecraft on Earth for study and simulation by flight crews during the 1960s space exploration missions (Allen, 2021). However, it is only more recently that they have gained traction across the weather, climate, water and related environmental domains, including land and water resources management.

One example is a project spearheaded by the Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) that will develop methods to predict interactions between land and torrential surface water flows for the Beetaloo sub-basin in Australia (Huth et al., 2023). The goal is to protect surface water and vegetation while mitigating soil erosion and damage. Using high-resolution aerial photography, billions of data points were captured, which allowed for precise geolocation and the creation of an accurate three-dimensional (3D) digital model of the area. Such high-resolution models help landowners and companies to identify areas that are at high risk of erosion and to address this issue before any major damage occurs. Typically, areas with low levels of grass cover as a result of cattle grazing or poor soil health are at a higher risk of erosion. This digital twin enables researchers to use modelling software to visualize where rainfall collects into runoff streams and calculate upstream catchment areas. When these models are overlaid onto high-resolution maps, they provide clear visualizations of water flow and accumulation in the landscape, helping to identify areas that are susceptible to erosion and, thereby, help resolve the issue in advance.

Another example is the development of a comprehensive digital twin of all river basins across the Republic of Korea by 2026 (Figure 1). The Ministry of Environment is leading this project, which leverages high-resolution 3D spatial information and real-time monitoring of dams and basins to create accurate simulations of flood response operations. The digital twin will allow users to visualize flood depths and extents under various scenarios, providing critical information to local residents for timely evacuation and accurate damage assessment for

compensation. Furthermore, digital twins have also been created for existing dams. These digital models enable dam operators to digitally assess structural damages or leaks that are not easily visible, significantly enhancing flood prevention and forecasting capabilities. Complementing the digital twin system is an advanced AI system that utilizes data collected from numerous sensors deployed across the river basins to help predict potential flood events, thereby improving overall flood management and response.

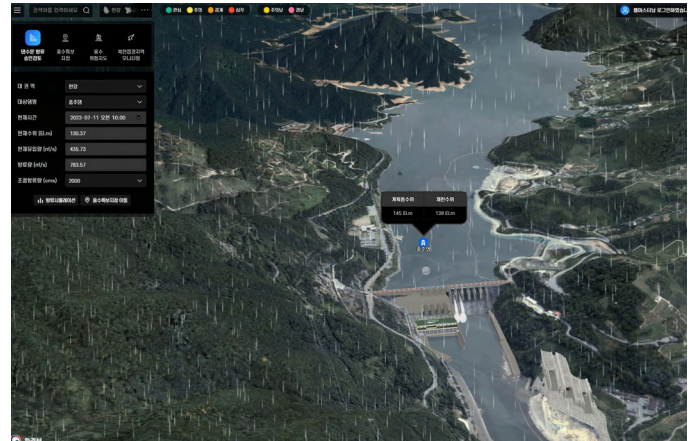


Figure 1. An example of flood forecasting using a digital twin in the Republic of Korea. Source: Han River Flood Control Office, Ministry of Environment, Republic of Korea

Regarding immersive technologies like the metaverse and VR, the integration of complex and specific hydrological data presents significant technical challenges. As a result, most efforts to date have focused around creating interactive, educational simulations to educate diverse actors in water resources management. For example, Malaysia recently studied flood preparedness among higher education students using a metaverse environment (Sa don et al., 2023). These studies demonstrated that immersive tools help users better understand flood risk concepts, which can be difficult to grasp for those who have not experienced a flood event firsthand. Unlike traditional tabletop exercises, VR can be used to effectively communicate the severity of the situation and raise awareness on flood-related hazards and their impacts. In recent years, VR and simulation technologies have been used more widely to enhance disaster preparedness and response, aligning with the Sendai Framework's objective to support the development of user-friendly systems for sharing information on effective practices (Alizadeh et al., 2023; Hsu and Gourbesville, 2023).

The future, however, likely will not be dominated by a single technology such as digital twins or the metaverse but instead will see the integration of multiple technologies. Combining different technological advancements will be key to driving innovation and addressing complex challenges. For instance, Tampere, a city in Finland, has unveiled a Metaverse Vision 2040 that will leverage several advanced technologies (Figure 2). It explores how a metaverse environment, integrating technologies like AI, digital twins and virtual realities, can enhance urban governance, sustainability, equality and the well-being of its



Figure 2. Schematic of a cognitive city. Source: Rantanen, 2023

citizens. The vision illustrates future scenarios where AI and the metaverse facilitate personalized services and participatory governance.

Gaps and challenges

Although these technologies greatly enhance our ability to manage land and water resources, several gaps and challenges remain (Botai et al., 2023). Notably, limitations in data availability and quality, particularly in remote and rural areas, hinder the effectiveness of these technologies. Additionally, inadequate data interoperability when dealing with data formats from different sources and integrating them with existing systems, tools and platforms that are used by diverse actors can pose a significant challenge. It is also necessary to ensure that sufficient digital infrastructure is in place and training and capacity building are provided when transitioning to these technologies.

Access to sustainable funding mechanisms and effective governance frameworks is lacking, while public trust and understanding require improvement. Moreover, existing legal and regulatory frameworks need to be adapted to accommodate the use of these technologies in transboundary contexts, addressing concerns such as data sharing, ownership, decision-making, liability and intellectual property rights. Putting in place strong policies covering data governance, standardization, education and public awareness is crucial while adopting these technologies (Amarnath, 2024).

Looking ahead: the future of digital twins, virtual reality and the metaverse

As we look to the future, it is crucial to understand the added value and limitations of emerging technologies before investing

in and relying on them for land and water management. As a result, a multifaceted approach is necessary to ensure the seamless adoption of these technologies. Governments and organizations, including international organizations, academia and the private sector, should invest in comprehensive data collection initiatives to improve the availability of high-quality data. Additionally, standardization efforts can help resolve issues related to data interoperability and integration across platforms and systems (ITU, 2024).

Transparent communication strategies and educational campaigns are also essential to build public trust and understanding around the use of these technologies. As they evolve, fostering international cooperation and knowledge sharing becomes increasingly important, facilitating the adoption of best practices and innovative solutions. In this regard, the United Nations and its specialized agencies, such as WMO and the International Telecommunication Union (ITU), can advance efforts to incorporate the use of digital twins and the metaverse to address the SDGs, which was the focus of the First United Nations Virtual Worlds Day held in June 2024 (ITU, 2024).

The synergy between digital twins, VR and the metaverse has the potential to revolutionize how we interact with both virtual and physical worlds, providing comprehensive solutions for modelling, simulations, visualization and real-time interaction in decision-making for land and water management. By embracing these emerging technologies within a robust multilateral framework, we can better manage land and water resources, ensuring a sustainable and equitable future for generations to come.

CHAPTER 5

Towards pathways to sustainable futures: the role of transdisciplinary approaches to weather, climate, water and related environmental and social sciences

Addressing complex global challenges such as climate change, disaster risk reduction and sustainable development requires an enhanced rethinking and reimagining of how diverse perspectives, knowledge and experiences can help us co-create knowledge and implement solutions through transdisciplinary approaches.

Authors: Irasema Alcántara-Ayala (Institute of Geography, National Autonomous University of Mexico), Coleen Vogel (Global Change Institute, University of the Witwatersrand, South Africa), Motoko Kotani (Tohoku University, Japan; ISC), Carla Mooney (Bureau of Meteorology, Australia), Mandira Singh Shrestha (International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD), Nepal), Osvaldo Luiz Leal de Moraes (CEMADEN, São Paulo, Brazil)

Photo: Dipayan Bose

Key messages

- Global challenges such as climate change, disaster risk reduction and sustainable development cannot be addressed by one form of knowledge alone – they require a transdisciplinary approach that unites actors across environmental, social and cultural contexts to co-create and implement solutions.
- When used appropriately, transdisciplinary approaches have the potential to boost the impact of perspectives offered by weather, climate, water and related environmental and social sciences by enabling diverse perspectives, knowledge and solutions.
- Enhanced philosophies of transdisciplinarity, including education and training, should be embraced and encouraged to prepare the next generation to address the challenges of the future.

Introduction

Global challenges such as poverty, hunger, inequality and environmental degradation are threatening sustainable development. In many cases, these compounding challenges are exacerbated by extreme weather events and the impacts of climate change, which disproportionately affect the world's most vulnerable communities. Conventional approaches often address challenges by focusing on understanding the dimensions of natural and social sciences, policy and society separately. However, addressing complex global challenges such as climate change, disaster risk reduction and sustainable development requires an enhanced rethinking and reimagining of how diverse perspectives, knowledge and experiences can help us co-create and implement solutions.

This chapter introduces the concept of transdisciplinarity and explores how a transdisciplinary approach can be applied in the context of weather, climate, water and related environmental and social sciences. This approach can help apply these sciences in local contexts and boost their impact to support achievement of global goals, including the Paris Agreement, Sendai Framework and 2030 Agenda for Sustainable Development. While gaps and challenges limit the full use and effectiveness of transdisciplinary approaches, opportunities are identified to enhance understanding, governance, collaboration and education to create enabling environments that foster transdisciplinarity moving forward.

Understanding transdisciplinarity

A transdisciplinary approach brings together diverse actors, such as scientists, policymakers, practitioners and civil society, including local and Indigenous communities, to co-create knowledge and develop solutions that are relevant to local contexts. It differs from a multidisciplinary approach, where experts from different disciplines work on the same issue separately. It also differs from an interdisciplinary approach, where experts from various disciplines share methodologies and findings, resulting in better integration. A transdisciplinary approach goes a step further by requiring an enhanced understanding of the multiple ways of knowing and making sense of reality to collaborate to find solutions outside of their own discipline (Matsuura and Razak, 2019).

A transdisciplinary approach can be applied across the science–policy–society interface, including as a research method (Figure 1) or framework for policy or practice, for example. It involves collectively framing problems, co-creating solution-oriented knowledge, and integrating and applying this knowledge to address complex societal challenges (Klein, 2001; Walter et al., 2007; Lang et al., 2012; Brandt et al., 2013; Bréthaut et al., 2019; Hoffmann et al., 2019; Norström et al., 2020; Bergmann et al., 2021; Kaiser and Gluckman, 2023). Throughout the process, participatory methods of engagement are often utilized to ensure the voices, experiences, views and values of actors are legitimized and included.



Photo: Indonesia Meteorological and Geophysical Agency, BMKG

Collective problem-framing involves engaging with diverse actors to develop a shared contextual understanding of problems through the integration of various perspectives, worldviews and values (Brandt et al., 2013; Norström et al., 2020). Throughout this process, power asymmetries between actors must be addressed to ensure their perspectives, cultural norms and values are included (Bréthaut et al., 2019; Hoffmann et al., 2019; Barth et al., 2023). This shared understanding of the problem lays the foundation for the co-creation of solution-oriented knowledge, which may be achieved through participatory research or methods, such as citizen science. The knowledge produced during this process should be contextualized and grounded in local realities to ensure it can be effectively implemented to address complex challenges (Norström et al., 2020).

A transdisciplinary approach to weather, climate, water and related environmental and social sciences

Weather, climate, water and other environmental systems are deeply interconnected across all aspects of society. Therefore, working together is essential because global challenges such as climate change, disaster risk reduction and sustainable development cannot be solved through one view point, understanding or discipline alone. Transdisciplinary approaches have the potential to amplify the impact of perspectives offered by weather, climate, water and related environmental and social sciences and services by enabling diverse actors to contribute their perspectives, knowledge and solutions in support of climate action. Increasing the diversity of actors makes it possible to accelerate political commitment and global efforts to address climate change (IPCC, 2023).

For instance, engaging diverse actors from the beginning, including scientists, policymakers, practitioners and local and Indigenous communities, among others, contributes to the development of a contextual understanding of climate change impacts on the ground. In this process, it is essential to acknowledge that experience and knowledge outside the realm of weather, climate, water and related environmental and social sciences can contribute meaningful perspectives. These perspectives must be recognized, legitimized and included to develop a deeper and more complete understanding of climate impacts, vulnerabilities and adaptive capacities.

Additionally, in some contexts, the use of participatory methods, such as citizen science, can support the co-production of knowledge for climate action by involving diverse actors in scientific research. In the context of weather, climate water and related environmental and social sciences, these methods have been used to identify and collect local data to enhance weather forecasts and climate predictions as well as to facilitate feedback from users to evaluate and verify these forecasts and predictions (WMO, 2023).

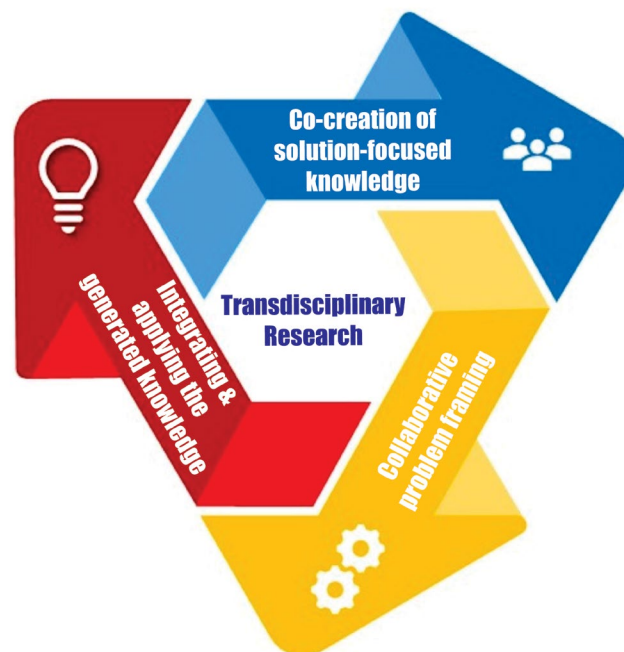


Figure 1. The fundamental stages of a transdisciplinary approach can be applied across the science–policy–society interface, including in the context of research as highlighted in this figure.

Source: Irasema Alcántara

Community participation not only improves science but also enhances local communities' environmental awareness and resilience, leading to more inclusive and equitable outcomes (Paton and Buergelt, 2019). For example, in a study on climate change adaptation in France, a transdisciplinary approach was used to integrate scientific research with local knowledge through active stakeholder engagement, including policymakers, land managers and community members. This approach fostered a comprehensive understanding of climate challenges, resulting in a dynamic adaptation framework tailored to local needs. The outcome was a robust, adaptable model that addressed immediate environmental issues and provided a scalable solution for other mountain areas facing similar climate challenges (Tschanz et al., 2022). In another example, the Future Resilience for African CiTies And Lands (FRACTAL) project worked in several African countries using a transdisciplinary approach to better understand climate processes and the complex decision-making in governments and local communities through the use of Learning Labs, as highlighted in Box 1.

A transdisciplinary approach can also enhance trust in various actors and institutions and empower the use of weather, climate, water and related environmental and social sciences, and diverse knowledge, data and information to implement solutions for climate action across scales. For example, by embracing a transdisciplinary approach and engaging with diverse actors, NMHSs can build trust as authoritative voices on weather, climate and water. Considering diverse knowledge and perspectives outside of formal science can also strengthen

these institutions and enhance their ability to provide crucial scientific information and services that underpin national climate and disaster risk reduction priorities and contribute to global goals, such as the Paris Agreement and Sendai Framework for Disaster Risk Reduction. Additionally, a transdisciplinary approach empowers actors across various contexts to

collaborate and implement potential science-based solutions that may be informed by and resonate with local realities. As a result, climate action, sustainable development and disaster risk reduction initiatives are more effective, leading to stronger, more resilient communities in the face of evolving global challenges (Ismail-Zadeh et al., 2017).

Box 1. FRACTAL: a transdisciplinary approach in action

Through engagement with different actors, the Future Resilience for African CiTies And Lands (FRACTAL) project created opportunities for collaboration, revealed cultural and institutional insights and enhanced climate resilience, including in the urban and water sectors (Taylor et al., 2021; McClure et al., 2023). One element of this project was the establishment of Learning Labs, which involved engaging with various knowledge holders to identify and explore critical issues, such as how climate science can be better informed by various actors and shared more easily (Jack et al., 2021). For instance, instead of risk information being data and science heavy, a narrative approach that explains plausible scenarios supported with scientific, local and socioeconomic evidence proved to be more effective. As a result, various actors and decision makers across

scales engaged with, questioned and co-produced the climate science information they needed in their context. The FRACTAL City Learning Lab approach emphasizes the co-production of knowledge and has significant benefits, allowing for a detailed examination of critical issues, strengthening actor relationships through a collaborative process and facilitating shared problem-solving (Koele et al., 2019). Additionally, it has demonstrated effectiveness through success stories in Lusaka, Windhoek and Maputo. In the case of the Lusaka, the FRACTAL process and engagements were taken up in the city's strategic planning, while in Maputo, the local municipality began working on a resilience hub, and Windhoek used the approach to assist in planning its Integrated Climate Change Strategy and Action (Vincent et al., 2021).



Figure 2. The FRACTAL approach to research is transdisciplinary, leading to useful outcomes that have a measurable impact.
Source: FRACTAL project



Figure 2. Numerous challenges limit the full use, effectiveness and potential of transdisciplinarity. Source: Irasema Alcántara

Gaps and challenges

Transdisciplinarity is an approach that holds huge potential to boost the impact of science, knowledge and understanding in support of actionable solutions. However, significant gaps and challenges (Figure 2) continue to limit the full use and effectiveness of this approach, particularly in the fields of weather, climate, water and related environmental and social sciences, which have traditionally remained siloed from other forms of knowledge, perspectives and disciplines, such as economic and political sciences. One particular challenge is that transdisciplinarity is often misunderstood and confused with terms like interdisciplinary and multidisciplinary. This leads to inconsistent implementation of transdisciplinary approaches in practice across the science–policy–society interface. Additionally, gaps in transdisciplinarity-focused education, training and capacity building limit the understanding and effectiveness of this approach.

Practical implementation of a transdisciplinary approach is also challenging and time consuming. Collaboration and communication with various actors are essential in effectively integrating perspectives, co-creating knowledge and implementing solutions. In the science community, institutional barriers and academic structures around disciplines hinder collaboration and funding that span disciplinary boundaries. Additionally, cultural and social norms pose challenges to effective collaboration and communication across diverse actors, systems of knowledge and disciplines, requiring significant time and resources to build trust and challenge power dynamics among the various actors engaged.

Finally, ensuring the sustainability and legacy of transdisciplinary endeavours remains a persistent challenge, necessitating long-term engagement and comprehensive assessment frameworks to effectively evaluate societal impacts and outcomes (Pohl and Hirsch Hadorn, 2008; Pohl, 2011). Additionally, significant resources are needed to scale up successful initiatives in order to apply them in diverse contexts. Overcoming these multifaceted challenges is crucial for advancing transdisciplinary approaches to address complex societal and environmental issues now and in the future.

Looking ahead: a transdisciplinary path forward

Solving complex global challenges, such as climate change, disaster risk reduction and sustainable development, will require inclusive collaboration across diverse systems of knowledge to co-create sustainable solutions and help communities thrive (Matsumoto et al., 2022). Transdisciplinary approaches, particularly when applied across weather, climate, water and related environmental and social sciences, can enhance the coherence and impact of international agendas focused on disaster risk reduction, climate change and sustainable development (Bendito and Barrios, 2016). However, moving forward, governance, partnerships, education and training must be enhanced to improve the effectiveness of transdisciplinary approaches that embrace diverse ways of knowing and valuing the world.

Strong governance and institutions at all levels are crucial for creating enabling environments that foster transdisciplinarity. Support through funding and policy frameworks can strengthen transdisciplinary research and practice while also building a culture of trust and respect that will foster collaboration across actors and institutions. For example, research funding programmes implemented by the International Science Council, including [Transformations to Sustainability](#) and [Leading Integrated Research for Agenda 2030 in Africa](#), provide important insights and lessons learned on advancing transdisciplinary approaches and creating enabling environments (ISC, 2023; Paulavets et al., 2023; Moser, 2024; Mukute et al., 2024). Additionally, fostering formal partnerships and global networks between governments, universities and civil society organizations, among other interested actors, will drive innovation, foster knowledge exchange, facilitate access to resources and accelerate the dissemination of best practices (Bharwani et al., 2023). Finally, moving forward, it will be crucial to prepare the next generation to address the challenges of the future. Transdisciplinary education and training should be embraced and encouraged along with hands-on learning opportunities and mentorship programmes to provide practical skills to foster a community of transdisciplinary thinkers across the science–policy–society interface.



CHAPTER 6

A future where everyone is protected by life-saving early warning systems

Advancements in natural and social sciences, technological breakthroughs and transdisciplinary approaches, alongside robust partnerships, adequate resources and enhanced capacities, underpin effective multi-hazard early warning systems and support the Early Warnings for All initiative.

Photo: Ade Bayu Indra

Authors: Daniela Cuéllar Vargas (WMO), Salla Himberg (IFRC), Vanessa Gray (ITU), Rosie McDonald (ITU), Amélie Grangeat (ITU)

Key messages

- Countries with limited to moderate multi-hazard early warning system (MHEWS) coverage have a disaster-related mortality ratio nearly six times higher than those with substantial to comprehensive coverage.
- Innovation in science, technology and tools such as artificial intelligence (AI), multi-channel and digital communication platforms, and citizen science enable game-changing advancements to support the Early Warnings for All (EW4All) initiative.
- Leveraging innovation across the natural and social sciences, alongside robust partnerships, adequate resources and enhanced capacities can help achieve EW4All and safeguard sustainable development gains.

Introduction

Multi-hazard early warning systems (MHEWS) are critical for mitigating the adverse effects of hazardous weather events, which are becoming more frequent and severe, in part due to climate change. The Early Warnings for All (EW4All) initiative is a groundbreaking effort launched by the United Nations Secretary-General that aims to ensure everyone on Earth is protected from hazardous weather, water or climate events through life-saving early warning systems by the end of 2027. EW4All supports national efforts on adaptation, minimizing losses and damages, and building resilience. Additionally, as part of the United Nations Secretary-General's Climate Action Acceleration Agenda, the initiative contributes to delivering climate justice to those at the frontlines of climate change and aligns with global goals, including the Paris Agreement, the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction and the 2030 Agenda for Sustainable Development.

As highlighted throughout this report, natural and social sciences, technological advances and transdisciplinary approaches underpin effective MHEWS. Advancements in AI, space-based Earth observations and immersive technologies can contribute to this critical initiative by advancing weather forecasting, contextualizing and communicating complex information for decision-making and creating interactive, educational simulations to visualize different hazard scenarios and potential impacts to support anticipatory action. Additionally, transdisciplinary approaches that embrace diverse perspectives, knowledge and experiences, including participatory methods such as citizen science, can enhance the effectiveness of MHEWS through the co-development of knowledge and solutions that are relevant to local contexts.

Hence, EW4All exemplifies how integrating global efforts can transform a collection of disparate parts into a cohesive and comprehensive system while also fostering innovation to protect lives, livelihoods and the environment from the increasing threats posed by natural hazards

The urgent need for global multi-hazard early warning systems

Countries across the world are already feeling the impacts of climate change, underscoring the urgent need to close critical gaps in MHEWS to protect lives, livelihoods and the environment. Evidence shows that countries with limited to moderate MHEWS coverage have a disaster-related mortality ratio nearly six times higher than those with substantial to comprehensive coverage.

Progress has been made in enhancing country capacities and coverage of MHEWS, with more than half of the world's countries now reporting having MHEWS. According to the report on the *Global Status of Multi-Hazard Early Warning Systems* (WMO and UNDRR, 2023), 101 countries, or 52% of all countries globally, have reported the existence of MHEWS – an increase from the 2022 report and a doubling from the 2015 baseline (Figure 1). In particular, Arab States and countries in Asia and the Pacific, Europe and Central Asia have reported a significant increase in MHEWS coverage. However, while there has been progress across many regions, some still face significant gaps in coverage, including in Africa, the Americas and the Caribbean. Additionally, progress in least developed countries (LDCs) and small island developing States (SIDS) remains low, with less than 50% reporting MHEWS coverage.

Game changing science, technology and innovation for Early Warnings for All

End-to-end, people-centred MHEWS are built around four interconnected pillars that create a value cycle as shown in Figure 2. Science, technology and innovation underpin all pillars of an end-to-end MHEWS, from informing disaster risk knowledge to advancing observations, monitoring, analysis and forecasting, and enabling warning dissemination and anticipatory action. For example, satellite imagery and AI can aid in collating and standardizing data, while multi-channel and digital communication platforms provide effective dissemination of warnings. In particular, natural and social sciences and technological breakthroughs can provide game-changing advancements to support the EW4All initiative in several key areas, including strategic risk communication, impact-based forecasting and warning, Common Alerting Protocol (CAP) and anticipatory action, as highlighted in Figure 3.

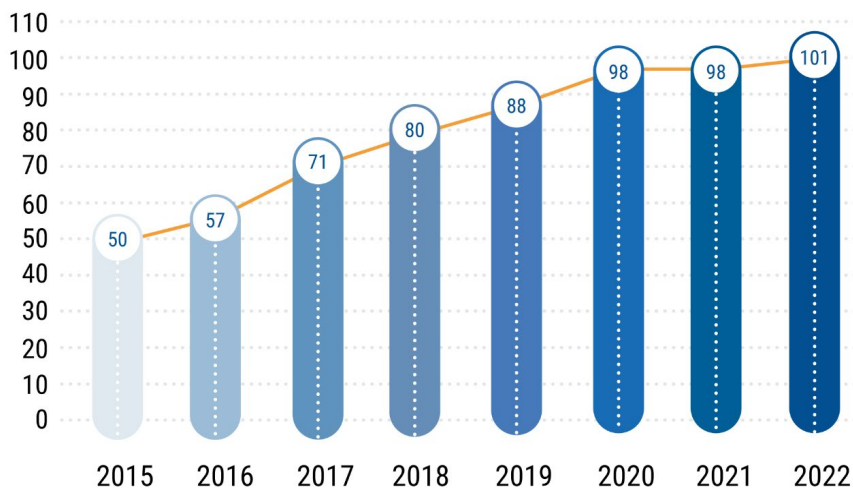


Figure 1. Cumulative number of countries reporting the existence of MHEWS.
Source: WMO and UNDRR, 2023

Strategic risk communication requires collecting, aggregating, processing and distilling information on vulnerability, hazards and exposure. This information must be timely, accurate, understandable and conducive to action. Technological tools such as data aggregation platforms (that is, geographic information systems (GIS)) enable the visualization of data. Additionally, immersive technologies such as virtual reality are enhancing disaster risk knowledge and strategic risk communication by helping actors understand flood risk concepts, which can be difficult to grasp for those who have not experienced a flood event firsthand. Rapid advances in AI and ML can be used to process large volumes of raw satellite imagery to create standardized baseline data on exposure, such as data on built-up areas and population. For example, ML-based mapping was used in Belize to provide updated estimates of the status of the country's major coastal and marine ecosystems. This not only provided key insights for improving risk knowledge, but also informed the National Adaptation Plan of Belize (GEO, 2023).

Impact-based forecasting and warning integrates traditional forecasting of physical hydrometeorological hazards and understanding of societal exposure and vulnerability to those hazards to inform decision-making and enable action to reduce impacts to society and ensure sustainable development (Golding, 2022). Scientific and technological advances, including AI and space-based Earth observations, have revolutionized weather models, improving their resolution, accuracy and relevance. For example, in Indonesia, the meteorological and disaster management agencies jointly developed a system called Signature with various models for weather prediction and analysis to produce and calibrate impact-based forecasts for different hydrometeorological hazards (BMKG, 2024). Additionally, surface-based weather and climate observations are crucial to continuously monitor weather conditions and provide historical and real-time data to inform impact-based forecasting. In Uganda, for example, ground observation data, as well as satellite-based data, were used to analyze historical drought-induced crop failures, which enabled the government to establish a predetermined hazard threshold value to trigger

disaster risk finance for anticipatory action (Nakalembe and Kotani, 2022).

CAP was developed to standardize alert communications across diverse platforms and systems to ensure critical information is disseminated in a timely, accurate and consistent format. Technological advances such as multi-channel alert distribution have improved warning dissemination and communication by using multiple channels, such as cell broadcast, location-based SMS, email, social media and sirens. Using multiple channels ensures that alerts reach diverse audiences and cater to their specific needs. Additionally, interoperable communication platforms can facilitate seamless communication between different systems and agencies, such as national hydrometeorological and emergency response agencies. Regardless of the technologies used, it is crucial for alerting systems to be unified and adhere to CAP for standardized communication.

Anticipatory action is defined as a set of actions taken to prevent or mitigate potential disaster impacts before a shock or before acute impacts are felt (IFRC, 2022). These actions are based on risk knowledge, forecast-based triggers and effective warning dissemination and communication in relation to the specific hazard at hand across institutions and individuals. Scenario analysis uses tools, such as GIS or virtual reality, to simulate and visualize different hazard scenarios and their potential impacts, aiding in planning and decision-making for anticipatory action. Another tool that can support anticipatory action is citizen science, which is a transdisciplinary participatory engagement method that involves diverse actors in the co-production of knowledge and implementation of anticipatory solutions in local contexts. An example is the use of mobile apps that allow citizens to report early signs of hazards (such as rising water levels or weather patterns), providing real-time data to authorities. Additionally, data platforms that allow community members to contribute local observations and knowledge can be leveraged to enrich official datasets, which underpin anticipatory action.

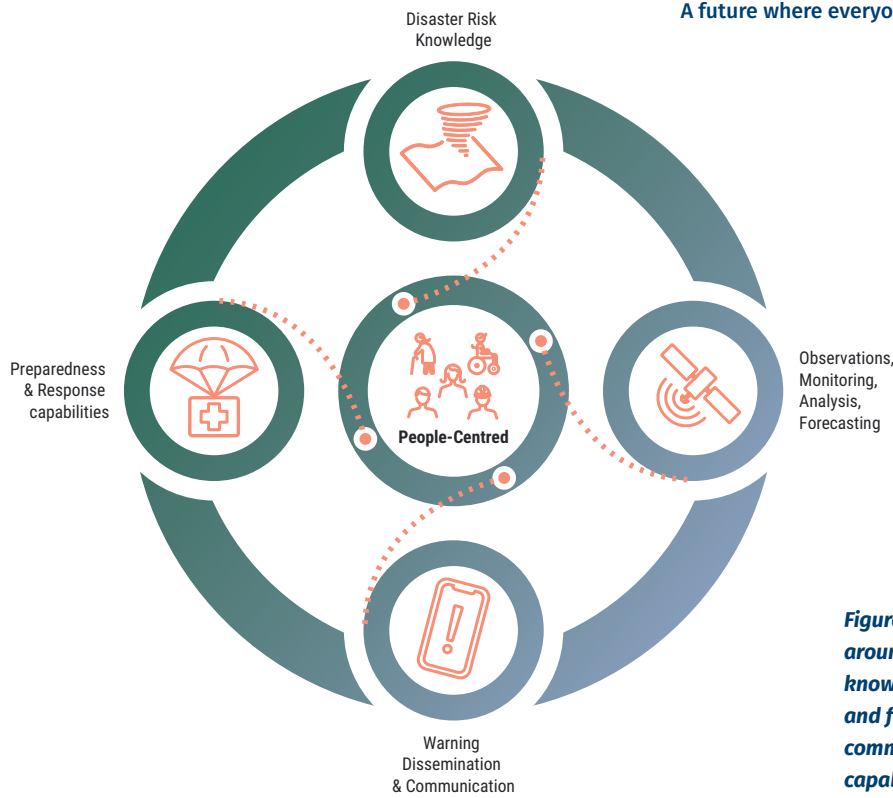


Figure 2. A people-centred, end-to-end MHEWS is built around four interconnected pillars: (1) disaster risk knowledge, (2) observations, monitoring, analysis and forecasting, (3) warning dissemination and communication, and (4) preparedness and response capabilities.

→ Strategic risk communication

Citizen reporting tools: Develop mobile apps that allow citizens to report early signs of hazards, such as rising water levels and unusual weather patterns, and provide real-time data to authorities.

AI and ML: Employ AI to process large datasets and distill them into actionable insights.

→ Impact-based forecasting and warning

Advanced weather modelling: Implement high-resolution weather models that incorporate hazard, vulnerability and exposure data.

AI predictive analytics: Use AI-driven predictive analytics to improve the accuracy and relevance of forecasts.

Remote sensing: Employ satellite imagery and remote sensing technology to monitor and predict environmental changes and hazards.

Automated weather stations: Deploy automated stations in remote areas to continuously monitor weather conditions and provide data for anticipatory actions.

→ Common Alerting Protocol

Unified alerting systems: Develop systems that adhere to the Common Alerting Protocol (CAP) for standardized communication.

Multi-channel alert distribution: Use multiple channels (cell-broadcast, SMS, email, social media, sirens) to ensure alerts reach diverse actors.

Interoperable communication platforms: Implement platforms that facilitate seamless communication between different agencies and systems.

→ Anticipatory action

Citizen reporting tools: Use mobile apps that allow citizens to report early signs of hazards (for example, rising water levels, unusual weather patterns), providing real-time data to authorities.

Community-based data collection: Leverage platforms where community members can contribute local observations and experiences to enrich official datasets.

Scenario analysis: Use GIS tools to simulate and visualize different hazard scenarios and their potential impacts, aiding in planning and decision-making.

Figure 3. Key areas where natural and social sciences and technological breakthroughs can provide game-changing advancements to support the EW4All initiative.

Box 1. Leveraging artificial intelligence for disaster connectivity mapping

The International Telecommunication Union (ITU) is spearheading the development of an AI-powered advanced visualization tool that will improve the assessment of subnational connectivity levels during and after disasters, facilitating more effective communication in high-risk areas. Launched in 2020 with the United Nations Emergency Telecommunications Cluster and the GSM Association (GSMA), the Disaster Connectivity Map has been activated over 50 times in more than 30 countries, aiding first responders, United Nations agencies and governments by providing near real-time information on communication network status (ITU, 2024a). The tool utilizes AI to rapidly analyze satellite imagery and generate high-resolution, time-enabled population density maps. It also processes and visualizes connectivity data, offering both historical baselines and real-time performance maps. The tool plays a key role supporting EW4All by identifying gaps in telecommunication coverage and assessing which messaging channels (fixed broadband, 2G SMS, 3G+, etc.) are available for disseminating early warning notifications. By quantifying the offline population – those unable to receive emergency alerts due to lack of network coverage – the tool helps determine the reach and effectiveness of early warning systems before and after disasters. Initial piloting is underway in Fiji, Tonga and Vanuatu, with plans to expand to additional countries involved in EW4All to enhance disaster response and connectivity resilience globally (ITU, 2024b).

Gaps and challenges

Despite advances in science and technology and the incredible potential of MHEWS to save lives, minimize losses and damages and safeguard sustainable development gains, gaps and challenges hinder the full achievement of comprehensive MHEWS. For example, a significant barrier is insufficient disaster risk information, including information on historical losses and damages and on trends in hazardous events, and predictive capacity for hazards. There is an urgent need to improve risk knowledge across the world, especially in the Arab States and in LDCs to improve the effectiveness of MHEWS. Additionally, significant data gaps remain, resulting in inadequate observation, monitoring and forecasting. Surface and upper air meteorological observation data are an essential input to computer models predicting the future state of the atmosphere, which NMHSs rely on to forecast the location, intensity and likelihood of high-impact weather events. Significant gaps in these essential data persist, however, across much of the African continent and parts of the Pacific (WMO and UNDRR, 2023).

Despite advances in science and technology, especially connectivity technology, some communities and populations remain difficult to reach and support. Limited communication channels can present barriers in effectively reaching remote communities as well as vulnerable populations such as women, children, older persons and persons living with disabilities. Additionally, gaps in technical resources, human capacities and sustainable funding present challenges across all levels – from developing forecasting products to enabling anticipatory action and providing ad hoc funding to ensure community leaders have sufficient credit or data on their mobile phones to receive warnings by SMS or Internet (WMO and UNDRR, 2023).

Looking ahead: leveraging innovation for Early Warnings for All

Addressing the gaps and challenges in MHEWS requires a multifaceted approach that leverages innovation across the natural and social sciences, alongside robust partnerships, adequate resources and enhanced capacities. Enhanced data collection and monitoring through advanced sensor networks, space-based Earth observations and the Internet of Things (IoT) can improve weather forecasting of extreme and hazardous events.

Additionally, risk knowledge is also improved through technology, with increasing opportunities for local actors to collect information from remote locations using drones and smartphone applications and quickly share it over mobile Internet. There are significant opportunities to leverage advances in science, technology and innovation for warning communication and dissemination, especially in terms of mobile networks and Internet connectivity, to reach remote and vulnerable communities. Additionally, fostering public understanding through educational campaigns, strengthening technical resources via capacity-building initiatives and employing cutting-edge technologies such as AI will create a more resilient and responsive system (WMO and UNDRR, 2023).

Achieving these advancements necessitates strong public-private partnerships that bring together diverse actors, including governments, non-governmental organizations, private-sector entities, scientists and local communities. Adequate funding and investment are essential to support the development and maintenance of these systems, while capacity-building efforts are needed to ensure that all regions, particularly those most vulnerable, have the technical skills and infrastructure to implement and sustain MHEWS. The EW4All initiative exemplifies how integrating global efforts can transform disparate parts into a cohesive and comprehensive system and foster innovation to protect lives, livelihoods and the environment from the increasing threats posed by natural hazards.

Appendix

Data sets

Global temperature data sets

Berkeley Earth: Rohde, R. A.; Hausfather, Z. The Berkeley Earth Land/Ocean Temperature Record. *Earth System Science Data* **2020**, *12*, 3469–3479. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3469-2020>.

ERA5: Hersbach, H.; Bell, B.; Berrisford, P. et al. ERA5 Monthly Averaged Data on Single Levels from 1940 to Present; Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), **2023**. <https://doi.org/10.24381/cds.f17050d7>.

GISTEMP: GISTEMP Team, 2022: GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP), version 4. NASA Goddard Institute for Space Studies, <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>. Lenssen, N.; Schmidt, G.; Hansen, J. et al. Improvements in the GISTEMP Uncertainty Model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **2019**, *124*, 6307–6326. <https://doi.org/10.1029/2018JD029522>.

HadCRUT5: Morice, C. P.; Kennedy, J. J.; Rayner, N. A. et al. An Updated Assessment of Near-surface Temperature Change From 1850: The HadCRUT5 Data Set. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **2021**, *126*, e2019JD032361. <https://doi.org/10.1029/2019JD032361>. HadCRUT5.0.1.0 data were obtained from <http://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadcrut5> on 1 March 2023 and are © British Crown Copyright, Met Office 2024, provided under an Open Government Licence, <http://www.nationalarchives.gov.uk/doc/open-government-licence/version/3/>.

JRA-3Q: Kosaka, Y.; Kobayashi, S.; Harada, Y. et al. The JRA-3Q Reanalysis. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II* **2024**, *102* (1), 49–109. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2024-004>.

NOAAGlobalTemp v6.0: Huang, B.; Yin, X.; Menne, M. J. et al. Improvements to the Land Surface Air Temperature Reconstruction in NOAAGlobalTemp: An Artificial Neural Network Approach. *Artificial Intelligence for the Earth Systems* **2022**, *1*, e220032. <https://doi.org/10.1175/AIES-D-22-0032.1>. Huang, B.; Yin, X.; Menne, M. J. et al. NOAA Global Surface Temperature Dataset (NOAAGlobalTemp), Version 6.0.0 [Global Mean]. NOAA National Centers for Environmental Information. <https://doi.org/10.25921/rzxp-g717>.

Ocean heat content data sets

Cheng, L.; Trenberth, K. E.; Fasullo, J. et al. Improved Estimates of Ocean Heat Content from 1960 to 2015. *Science Advances* **2017**, *3*, e1601545. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601545>.

Church, J. A.; White, N. J.; Konikow, L. F. et al. Revisiting the Earth's Sea-level and Energy Budgets from 1961 to 2008. *Geophysical Research Letters* **2011**, *38*. <https://doi.org/10.1029/2011GL048794>.

Desbruyères, D. G.; Purkey, S. G.; McDonagh, E. L. et al. Deep and Abyssal Ocean Warming from 35 Years of Repeat Hydrography. *Geophysical Research Letters* **2016**, *43*, 310–356. <https://doi.org/10.1002/2016GL070413>.

Desbruyères, D.; McDonagh, E. L.; King, B. A. et al. Global and Full-Depth Ocean Temperature Trends during the Early Twenty-First Century from Argo and Repeat Hydrography. *Journal of Climate* **2017**, *30*, 1985–1997. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0396.1>.

Domingues, C. M.; Church, J. A.; White, N. J. et al. Improved Estimates of Upper-ocean Warming and Multi-decadal Sea-level Rise. *Nature* **2008**, *453*, 1090–1093. <https://doi.org/10.1038/nature07080>.

Gaillard, F.; Reynaud, T.; Thierry, V. et al. In Situ-based Reanalysis of the Global Ocean Temperature and Salinity with ISAS: Variability of the Heat Content and Steric Height. *Journal of Climate* **2016**, *29*, 1305–1323. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0028.1>.

Good, S. A.; Martin, M. J.; Rayner, N. A. EN4: Quality Controlled Ocean Temperature and Salinity Profiles and Monthly Objective Analyses with Uncertainty Estimates. *Journal of Geophysical Research: Oceans* **2013**, *118*, 6704–6716. <https://doi.org/10.1002/2013JC009067>.

Hosoda, S.; Ohira, T.; Nakamura, T. A Monthly Mean Dataset of Global Oceanic Temperature and Salinity Derived from Argo Float Observations. *JAMSTEC Report of Research and Development* **2008**, *8*, 47–59. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jamstecr/8/0/8_0_47/_article.

Ishii, M.; Fukuda, Y.; Hirahara, S. et al. Accuracy of Global Upper Ocean Heat Content Estimation Expected from Present Observational Data Sets. *SOLA* **2017**, *13*, 163–167. <https://doi.org/10.2151/sola.2017-030>.

Kuusela M.; Stein, M. L. Locally Stationary Spatio-temporal Interpolation of Argo Profiling Float Data. *Proceedings of the Royal Society A* **2018**, *474*, 20180400. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2018.0400>.

Kuusela, M.; Giglio, D. Global Ocean Heat Content Anomalies based on Argo Data (2.0.0). *Zenodo* **2023**. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7562281>.

Levitus, S.; Antonov, J. I.; Boyer, T. P. et al. World Ocean Heat Content and Thermosteric Sea Level Change (0–2 000 m) 1955–2010. *Geophysical Research Letters* **2012**, *39*, L10603. <https://doi.org/10.1029/2012GL051106>.

Li, H.; Xu, F.; Zhou, W. et al. Development of a Global Gridded Argo Data Set with Barnes Successive Corrections. *Journal of Geophysical Research: Oceans* **2017**, *122*, 866–889. <https://doi.org/10.1002/2016JC012285>.

Li, Y.; Church, J. A.; McDougall, T. J. et al. Sensitivity of Observationally Based Estimates of Ocean Heat Content and Thermal Expansion to Vertical Interpolation Schemes. *Geophysical Research Letters* **2022**, *49*, e2022G. <https://doi.org/10.1029/2022GL101079>.

APPENDIX

DATA SETS

Lyman, J. M.; Johnson, G. C. Estimating Global Ocean Heat Content Changes in the Upper 1800 m since 1950 and the Influence of Climatology Choice. *Journal of Climate* **2014**, *27*, 1945–1957. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00752.1>.

Minière, A.; von Schuckmann, K.; Sallée, J.-B. et al. Robust Acceleration of Earth System Heating Observed over the Past Six Decades. *Sci Rep* **2023**, *13* (1), 22975. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49353-1>.

Roemmich, D.; Gilson, J. The 2004–2008 Mean and Annual Cycle of Temperature, Salinity, and Steric Height in the Global Ocean from the Argo Program. *Progress in Oceanography* **2009**, *82*, 81–100. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.03.004>.

Roemmich, D.; Church, J.; Gilson, J. et al. Unabated Planetary Warming and its Ocean Structure Since 2006. *Nature Climate Change* **2015**, *5*, 240. <https://doi.org/10.1038/nclimate2513>.

von Schuckmann, K.; Le Traon, P.-Y. How Well Can We Derive Global Ocean Indicators from Argo Data? *Ocean Science* **2011**, *7*, 783–791. <https://doi.org/10.5194/os-7-783-2011>. Data available at: <https://marine.copernicus.eu/access-data/ocean-monitoring-indicators>.

Wijffels, S.; Roemmich, D.; Monselesan, D., et al. Ocean Temperatures Chronicle the Ongoing Warming of Earth. *Nature Climate Change* **2016**, *6*, 116–118. <https://doi.org/10.1038/nclimate2924>.

Sea ice data sets

EUMETSAT Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility, Sea-ice Index 1979-Onwards (v2.1, 2020), OSI-420, Data Extracted from OSI SAF FTP Server: 1979–2020, Northern and Southern Hemisphere.

Fetterer, F.; Knowles, K.; Meier, W. N. et al., 2017, updated daily. Sea Ice Index, Version 3. Boulder, Colorado, USA. National Snow and Ice Data Center (NSIDC), <https://nsidc.org/data/G02135/versions/3>.

Lavergne, T. Sørensen, A. M.; Kern, S. et al. Version 2 of the EUMETSAT OSI SAF and ESA CCI Sea Ice Concentration Climate Data Records. *The Cryosphere* **2019**, *13* (1), 49–78. <https://doi.org/10.5194/tc-13-49-2019>.

REFERENCES

State of climate science: the need for urgent and ambitious climate action

- Canadell, J. G.; Poulter, B.; Bastos, A. et al. Chapter 1 – Balancing Greenhouse Gas Sources and Sinks: Inventories, Budgets, and Climate Policy. In *Balancing Greenhouse Gas Budgets*; Poulter, B., Canadell, J. G., Hayes, D. J., Thompson, R. L., Eds.; Elsevier, 2022; 3–28. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814952-2.00024-1>.
- Cheng, L.; Trenberth, K. E.; Fasullo, J. et al. Improved Estimates of Ocean Heat Content from 1960 to 2015. *Science Advances* **2017**, 3 (3), e1601545. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601545>.
- Clarke, B.; Barnes, C.; Rodrigues, R. et al. *Climate Change, El Niño and Infrastructure Failures behind Massive Floods in Southern Brazil*; 2024. <https://doi.org/10.25561/111882>.
- Ernst, Y.; Archibald, S.; Balzter, H. et al. The African Regional Greenhouse Gases Budget (2010–2019). *Global Biogeochemical Cycles* **2024**, 38 (4), e2023GB008016. <https://doi.org/10.1029/2023GB008016>.
- Friedlingstein, P.; O’Sullivan, M.; Jones, M. W. et al. Global Carbon Budget 2023. *Earth System Science Data* **2023**, 15 (12), 5301–5369. <https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Summary for Policymakers. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*; Pörtner, H.-O.; Roberts, D. C.; Masson-Delmotte, V. et al., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York, USA, 2019. <https://www.ipcc.ch/srocc/>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Pirani, A. et al., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York, USA, 2021. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Core Writing Team; Lee, H.; Romero, J., Eds.; IPCC, Geneva, 2023. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>.
- Kimutai, J.; Zachariah, M.; Nhantumbo, B. et al. El Niño Key Driver of Drought in Highly Vulnerable Southern African Countries; Imperial College London, 2024. <https://doi.org/10.25561/110770>.
- Purich, A.; Doddridge, E. W. Record Low Antarctic Sea Ice Coverage Indicates a New Sea Ice State. *Communications Earth and Environment* **2023**, 4 (1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00961-9>.
- Saunois, M.; Martinez, A.; Poulter, B. et al. Global Methane Budget 2000–2020. *Earth System Science Data Discussions* **2024**, 1–147. <https://doi.org/10.5194/essd-2024-115>.
- Thiem, H. *Category 5 Hurricane Beryl Makes Explosive Start to 2024 Atlantic Season*; National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Climate.gov, 2024. <https://www.climate.gov/news-features/event-tracker/category-5-hurricane-beryl-makes-explosive-start-2024-atlantic-season>.
- Tian, H.; Pan, N.; Thompson, R. L. et al. Global Nitrous Oxide Budget 1980–2020. *Earth System Science Data* **2024**, 16 (6), 2543–2604. <https://doi.org/10.5194/essd-16-2543-2024>.
- Trewin, B.; Cazenave, A.; Howell, S. et al. Headline Indicators for Global Climate Monitoring. *Bulletin of the American Meteorological Society* **2021**, 101 (1), E20–E37. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0196.1>.
- United Nations Environment Programme (UNEP). *Emissions Gap Report 2023: Broken Record – Temperatures Hit New Highs, Yet World Fails to Cut Emissions (Again)*; UNEP: Nairobi, 2023a. <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2023>.
- United Nations Environment Programme (UNEP). *Adaptation Gap Report 2023: Underfinanced. Underprepared. Inadequate Investment and Planning on Climate Adaptation Leaves World Exposed*; UNEP: Nairobi, 2023b. <https://www.unep.org/resources/adaptation-gap-report-2023>.
- United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (OCHA). *Brazil: Floods in Rio Grande do Sul – United Nations Situation Report, as of 12 July 2024*; Reliefweb, 2024. <https://reliefweb.int/report/brazil/brazil-floods-rio-grande-do-sul-united-nations-situation-report-12-july-2024>.
- Villalobos, Y.; Canadell, J. G.; Keller, E. D. et al. A Comprehensive Assessment of Anthropogenic and Natural Sources and Sinks of Australasia’s Carbon Budget. *Global Biogeochemical Cycles* **2023**, 37 (12), e2023GB007845. <https://doi.org/10.1029/2023GB007845>.
- World Glacier Monitoring Service (WGMS). *Global Glacier Change Bulletin No. 5 (2020–2021)*; Zemp, M.; Gärtner-Roer, I.; Nussbaumer, S. U. et al., Eds. (based on database version: doi:10.5904/wgms-fog-2023-09); WGMS: Zurich, Switzerland, 2023. https://wgms.ch/downloads/WGMS_GGCB_05.pdf.
- World Meteorological Organization (WMO). *WMO Greenhouse Gas Bulletin (GHG Bulletin), No. 19: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2022*; WMO: Geneva, 2023.
- World Meteorological Organization (WMO). *Global Temperature Record Streak Continues, as Climate Change Makes Heatwaves More Extreme*; WMO: Geneva, 2024a. <https://wmo.int/media/news/global-temperature-record-streak-continues-climate-change-makes-heatwaves-more-extreme>.
- World Meteorological Organization (WMO). *WMO Confirms that 2023 Smashes Global Temperature Record*; WMO: Geneva, 2024b. <https://wmo.int/media/news/wmo-confirms-2023-smashes-global-temperature-record>.
- World Meteorological Organization (WMO). *WMO Global Annual to Decadal Climate Update – Target Years: 2024 and 2024–2028*; WMO: Geneva, 2024c.

Artificial intelligence and machine learning: revolutionizing weather forecasting

- Bi, K.; Xie, L.; Zhang, H. et al. Accurate Medium-Range Global Weather Forecasting with 3D Neural Networks. *Nature* **2023**, 619 (7970), 533–538. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06185-3>.
- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). *Charts*; ECMWF, 2024. <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/charts>.
- Ghaffarian, S.; Taghikhah, F. R.; Maier, H. R. Explainable Artificial Intelligence in Disaster Risk Management: Achievements and Prospective Futures. *International Journal of Disaster Risk Reduction* **2023**, 98, 104123. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.104123>.
- Hakim, G. J.; Masanam, S. Dynamical Tests of a Deep Learning Weather Prediction Model. *Artificial Intelligence for the Earth Systems* **2024**, 3 (3). <https://doi.org/10.1175/AIES-D-23-00901>.
- Ham, Y.-G.; Kim, J.-H.; Kim, E.-S. et al. Unified Deep Learning Model for El Niño/Southern Oscillation Forecasts by Incorporating Seasonality in Climate Data. *Science Bulletin* **2021**, 66 (13), 1358–1366. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2021.03.009>.
- Harder, P.; Watson-Parris, D.; Stier, P. et al. Physics-Informed Learning of Aerosol Microphysics. *Environmental Data Science* **2022**, 1, e20. <https://doi.org/10.1017/eds.2022.22>.
- Harris, L.; McRae, A. T. T.; Chantry, M. et al. A Generative Deep Learning Approach to Stochastic Downscaling of Precipitation Forecasts. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* **2022**, 14 (10), e2022MS003120. <https://doi.org/10.1029/2022MS003120>.
- Hersbach, H.; Bell, B.; Berrisford, P. et al. The ERA5 Global Reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **2020**, 146 (730), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.
- Keisler, R. Forecasting Global Weather with Graph Neural Networks. *arXiv* **2022** [preprint]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.07575>.
- Koldunov, N.; Jung, T. Local Climate Services for All, Courtesy of Large Language Models. *Communications Earth and Environment* **2024**, 5 (1), 1–4. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01199-1>.
- Lam, R.; Sanchez-Gonzalez, A.; Willson, M. et al. Learning Skillful Medium-Range Global Weather Forecasting. *Science* **2023**, 382 (6677), 1416–1421. <https://doi.org/10.1126/science.adi2336>.
- Lang, S.; Alexe, M.; Chantry, M. et al. AIFS – ECMWF’s Data-Driven Forecasting System. *arXiv* **2024**. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.01465>.
- Mardani, M.; Brenowitz, N.; Cohen, Y. et al. Residual Diffusion Modeling for Km-scale Atmospheric Downscaling. *Nature Portfolio* **2024** [preprint]. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3673869/v1>.
- McGovern, A.; Ebert-Uphoff, I.; Gagne, D. J. et al. Why We Need to Focus on Developing Ethical, Responsible, and Trustworthy Artificial Intelligence Approaches for Environmental Science. *Environmental Data Science* **2022**, 1 (6). <https://doi.org/10.1017/eds.2022.5>.
- Nippen, T.; Chantry, M. *Data Driven Regional Modelling* (European Center for Medium-Range Weather Forecasts AIFS Blog); European Center for Medium-Range Weather Forecasts, *Artificial Intelligence for the Earth Systems* **2024**. <https://www.ecmwf.int/en/about/media-centre/aifs-blog/2024/data-driven-regional-modelling>.
- Pathak, J.; Subramanian, S.; Harrington, P. et al. Fourcastnet: A Global Data-driven High-resolution Weather Model Using Adaptive Fourier Neural Operators. *arXiv* **2022** [preprint]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.11214>.
- Patil, K. R.; Doi, T.; Jayanthi, V. R. et al. Deep Learning for Skillful Long-Lead ENSO Forecasts. *Frontiers in Climate* **2023**, 4. <https://doi.org/10.3389/fclim.2022.1058677>.
- Sha, Y.; Gagne II, D. J.; West, G. et al. Deep-Learning-Based Precipitation Observation Quality Control. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **2021**, 38 (5), 1075–1091. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-20-00811>.
- Wang, C.; Pritchard, M.; Brenowitz, N. et al. Coupled Ocean-Atmosphere Dynamics in a Machine Learning Earth System Model. *arxiv* **2024**. <https://arxiv.org/html/2406.08632v1>.
- Watt-Meyer, O.; Dresdner, G.; McGibbon, J. et al. ACE: A Fast, Skillful Learned Global Atmospheric Model for Climate Prediction. *arXiv* **2023** [preprint]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.02074>.
- Woolnough, S. J.; Vitart, F.; Balmaseda, M. A. The Role of the Ocean in the Madden-Julian Oscillation: Implications for MJO Prediction. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **2007**, 133 (622), 117–128. <https://doi.org/10.1002/qj.4>.
- United Nations Advisory Body on Artificial Intelligence. *Interim Report: Governing AI for Humanity*. United Nations, **2023**. https://www.un.org/sites/un2.un.org/files/un_ai_advisory_body_governing_ai_for_humanity_interim_report.pdf.
- Vellinga, M.; Copsey, D.; Graham, T. et al. Evaluating Benefits of Two-Way Ocean-Atmosphere Coupling for Global NWP Forecasts. *Weather and Forecasting* **2020**, 35 (5), 2127–2144. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-20-0035.1>.

Space-based Earth observations: enhancing weather, climate, water and related environmental applications

- Andries, A.; Morse, S.; Murphy, R. et al. Translation of Earth Observation Data into Sustainable Development Indicators: An Analytical Framework. *Sustainable Development* **2019**, 27 (3), 366–376. <https://doi.org/10.1002/sd.1908>.
- Du, J.; Kimball, J. S.; Sheffield, J. et al. Satellite Flood Inundation Assessment and Forecast Using SMAP and Landsat. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* **2021**, 14, 6707–6715. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3092340>.
- Dube, T.; Shekede, M. D.; Massari, C. Remote Sensing for Water Resources and Environmental Management. *Remote Sensing* **2023**, 15 (1), 18. <https://doi.org/10.3390/rs15010018>.
- Emery, W.; Camps, A. The History of Satellite Remote Sensing. In *Introduction to Satellite Remote Sensing*; Emery, W., Camps, A., Eds.; Elsevier, 2017; 1–42. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809254-5.00001-4>.

- European Space Agency (ESA). *Full Steam Ahead for Carbon Dioxide Monitoring Mission*. ESA, 2022. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Full_steam_ahead_for_carbon_dioxide_monitoring_mission.
- Guo, H.-D.; Zhang, L.; Zhu, L.-W. Earth Observation Big Data for Climate Change Research. *Advances in Climate Change Research* **2015**, *6* (2), 108–117. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2015.09.007>.
- Hall, D. K. Assessment of Polar Climate Change Using Satellite Technology. *Reviews of Geophysics* **1988**, *26* (1), 26–39. <https://doi.org/10.1029/RG026i001p00026>.
- Harris, R.; Baumann, I. Satellite Earth Observation and National Data Regulation. *Space Policy* **2021**, *56*, 101422. <https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2021.101422>.
- Heggin, M. I.; Bastos, A.; Bovensmann, H. et al. Space-Based Earth Observation in Support of the UNFCCC Paris Agreement. *Frontiers in Environmental Science* **2022**, *10*. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.941490>.
- Lemmens, M. Earth Observation from Space. In *Geo-information: Technologies, Applications and the Environment*; Lemmens, M., Ed.; Springer Netherlands: Dordrecht, 2011; 171–196. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1667-4_9.
- Leyva-Mayorga, I.; Martinez-Gost, M.; Moretti, M. et al. Satellite Edge Computing for Real-Time and Very-High Resolution Earth Observation. *IEEE Transactions on Communications* **2023**, *71* (10), 6180–6194. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2023.3296584>.
- MacPhail, D. Increasing the Use of Earth Observations in Developing Countries. *Space Policy* **2009**, *25* (1), 6–8. <https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2008.12.007>.
- Marbel, R.; Ben-Moshe, B.; Grinshpoun, T. Pico-Sat to Ground Control: Optimizing Download Link via Laser Communication. *Remote Sensing* **2022**, *14* (15), 3514. <https://doi.org/10.3390/rs14153514>.
- Militino, A. F.; Ugarte, M. D.; Pérez-Goya, U. Improving the Quality of Satellite Imagery Based on Ground-Truth Data from Rain Gauge Stations. *Remote Sensing* **2018**, *10* (3), 398. <https://doi.org/10.3390/rs10030398>.
- Neigh, C. S. R.; Carroll, M. L.; Montesano, P. M. et al. An API for Spaceborne Sub-Meter Resolution Products for Earth Science. In *IGARSS 2019–2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Yokohama, Japan, 28 July–2 August 2019; Institute of Electrical and Electronics Engineers: 2019; 5397–5400. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2019.8898358>.
- Salcedo-Sanz, S.; Ghamisi, P.; Piles, M. et al. Machine Learning Information Fusion in Earth Observation: A Comprehensive Review of Methods, Applications and Data Sources. *Information Fusion* **2020**, *63*, 256–272. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2020.07.004>.
- Symonds, D. Protection for All: WISER-EWSA Aims to Transform Nowcasting and Early Warning Systems in Southern Africa, Particularly for the Most Vulnerable Communities. *Meteorological Technology International*, April 2023, 10–11. <https://www.ukimediaevents.com/publication/8cf6eceb/12>.
- Schollaert Uz, S.; Ruane, A. C.; Duncan, B. N. et al. Earth Observations and Integrative Models in Support of Food and Water Security. *Remote Sensing in Earth Systems Sciences* **2019**, *2* (1), 18–38. <https://doi.org/10.1007/s41976-019-0008-6>.
- Trewin, B.; Cazenave, A.; Howell, S. et al. Headline Indicators for Global Climate Monitoring. *Bulletin of the American Meteorological Society* **2021**, *101* (1), E20–E37. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0196.1>.
- United Nations Office for Outer Space Affairs (UNOOSA) and European Space Agency. *Updated UNOOSA and ESA Space Debris Infographics and Podcasts*. UNOOSA and ESA, 2023. <https://www.unoosa.org/oosa/en/informationfor/media/unoosa-and-esa-release-infographics-and-podcasts-about-space-debris.html>.
- World Meteorological Organization (WMO). *Vision for WIGOS in 2040* (WMO-No. 1243). Geneva, 2019.
- World Meteorological Organization (WMO): *20th Century*. WMO: Geneva, 2023. <https://wmo.int/20th-century>.
- World Meteorological Organization (WMO). *United in Science 2023: Sustainable Development Edition*; WMO: Geneva, 2023.
- World Meteorological Organization (WMO). *2023 State of Climate Services: Health* (WMO-No. 1335). Geneva, 2023.
- Xing, J.; Yu, B.; Yang, D. et al. A Real-Time GNSS-R System for Monitoring Sea Surface Wind Speed and Significant Wave Height. *Sensors* **2022**, *22* (10), 3795. <https://doi.org/10.3390/s22103795>.
- Yamamoto, H.; Kamei, A.; Nakamura, R. et al. Field Sensor Virtual Organization Integrated with Satellite Data on a Geo Grid. *Data Science Journal* **2010**, *8* (0). https://doi.org/10.2481/dsj.SS_IGY-015.

Bridging virtual and physical realms: leveraging digital twins and immersive technologies for land and water management

- Alizadeh, B.; Sakib, M.; Behzadan, A. Immersive Virtual Reality to Measure Flood Risk Perception in Urban Environments. In *Proceedings of the 30th International Conference on Intelligent Computing in Engineering (EG-ICE)*, London, 4–7 July 2023; University College London: 2023, 103–112. https://www.ucl.ac.uk/bartlett/construction/sites/bartlett_construction/files/9014.pdf.
- Allen, B. D. Digital Twins and Living Models at NASA. Paper presented at Digital Twin Summit, Online, 3–4 November 2021; National Aeronautics and Space Administration, 2021. https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20210023699/downloads/ASME%20Digital%20Twin%20Summit%20Keynote_final.pdf.
- Amarnath, G. Mitigating the Global Water Crisis: Digital Twin Earths Offer a Promising Solution. *Frontiers Policy Labs* **2024**. <https://doi.org/10.25453/plabs.25981804.v1>.
- Botai, J. O.; Ghosh, S.; Matheswaran, K. et al. *Options for Digital Twin Application in Developing Country River Basin Management: A Review*; CGIAR Initiative on Digital Innovation. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute (IWMI), 2023. <https://cgspage.cgiar.org/items/f4977d8e-5c31-4e93-9f6b-1e6d45a39fb3>.

REFERENCES

- DGB Group. *The Decline of the Maya Civilisation: How Environmental Factors Played a Role in their Collapse*. DGB Group, 2023. <https://www.green.earth/blog/the-decline-of-the-maya-civilisation-how-environmental-factors-played-a-role-in-their-collapse>.
- Fujs, T.; Kashiwase, H. *Strains on Freshwater Resources: The Impact of Food Production on Water Consumption*; World Bank Data Blog, World Bank: Washington, DC, 2023. <https://blogs.worldbank.org/en/opendata/strains-freshwater-resources-impact-food-production-water-consumption>.
- Hsu, H. M.; Gourbesville, P. Introduction of Integrated Decision Support System for Flood Disaster Management. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* **2023**, 1136, 012019. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1136/1/012019>.
- Huth, N. I.; Adam, S.; Abbott, B. et al. *Putting Land Management Knowledge into Practice – Final Project Report*; Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), 2023. <https://gisera.csiro.au/wp-content/uploads/2023/10/CSIRO-GISERA-final-report-L10-NT-Putting-land-management-knowledge-into-practice.pdf>.
- International Telecommunication Union (ITU). *UN Executive Briefing on Unlocking the Potential of Virtual Worlds and the Metaverse for the Sustainable Development Goals*. ITU: Geneva, 2024. <https://www.itu.int/net/epub/TSB/2024-UN-Executive-Briefing-on-unlocking-potential/index.html#p=2>.
- International Telecommunication Union (ITU). *ITU Technical Specification: Definition of Metaverse*; Version 1.0. ITU: Geneva, 2023. <https://www.itu.int/en/ITU-T/focusgroups/mv/Documents/List%20of%20FG-MV%20deliverables/FGMV-20.pdf>.
- International Telecommunication Union (ITU). *New UN Initiative to Reduce Disaster Risk with AI* [Press release]. 20 August 2024. <https://www.itu.int/hub/2024/08/new-un-initiative-to-reduce-disaster-risk-with-ai/>.
- Jinendradasa, S. S. *Implications of Land and Water Degradation on Food Security; Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*. CGIAR: Colombo, Sri Lanka, 2002. <https://cgspace.cgiar.org/items/d49b242e-03da-4fa8-9dc9-a900673b0445>.
- Pacific Institute. *Water Conflict Chronology*. Pacific Institute: Oakland, USA, 2023. <https://www.worldwater.org/water-conflict/>.
- Rantanen T. Tampere Metaverse: How New Technologies Can Help in Disasters. In *Episode #33: Disaster Risk Reduction in the Digital Transformation Age: Leveraging Emerging Technologies*; ITU Digital Transformation Webinar Series. International Telecommunication Union (ITU): Geneva, 2023. <https://www.itu.int/cities/wp-content/uploads/2023/10/5-Teppo-Rantanen.pdf>.
- Roberts, B.; Atkins, P.; Simmons, I. People, *Land and Time: An Historical Introduction to the Relations Between Landscape, Culture and Environment*, 1st ed.; Routledge: Abingdon, UK, 1998. <https://doi.org/10.4324/9780203765777>.
- Sa don, N. F.; Sa don, H. S.; Alias, R. A. et al. Flood Preparedness Module for Malaysian Higher Education Students via Metaverse Environment. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* **2023**, 1144 (1), 012011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1144/1/012011>.

Towards pathways to sustainable futures: the role of transdisciplinary approaches to weather, climate, water and related environmental and social sciences

- Barth, M.; Jiménez-Aceituno, A.; Lam, D. P. et al. Transdisciplinary Learning as a Key Leverage for Sustainability Transformations. *Current Opinion in Environmental Sustainability* **2023**, 64, 101361. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2023.101361>.
- Bendito, A.; Barrios, E. Convergent Agency: Encouraging Transdisciplinary Approaches for Effective Climate Change Adaptation and Disaster Risk Reduction. *International Journal of Disaster Risk Science* **2016**, 7 (4), 430–435. <https://doi.org/10.1007/s13753-016-0102-9>.
- Bergmann, M.; Hirsch Hadorn, G.; Metag, J., Eds. *Conceptualising Transdisciplinarity – Origins, Approaches and Challenges*. Springer Nature, 2021.
- Bharwani, S.; Daron, J.; Siame, G. et al. *Supporting Climate-resilient Urban Planning: 10 Lessons from Cities in Southern Africa*. Future Resilience for African Cities and Lands (FRACTAL) project, 2023. <https://www.fractal.org.za/wp-content/uploads/2023/09/supporting-climate-resilient-urban-planning.pdf>.
- Brandt, P.; Ernst, A.; Gralla, F. et al. A Review of Transdisciplinary Research in Sustainability Science. *Ecological Economics* **2013**, 92, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2013.04.008>.
- Bréthaut, C.; Gallagher, L.; Dalton, J. et al. Power Dynamics and Integration in the Water-Energy-Food Nexus: Learning Lessons for Transdisciplinary Research in Cambodia. *Environmental Science & Policy* **2019**, 94, 153–162. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.01.010>.
- Hoffmann, S.; Thompson Klein, J.; Pohl, C. Linking Transdisciplinary Research Projects with Science and Practice at Large: Introducing Insights from Knowledge Utilization. *Environmental Science & Policy* **2019**, 102, 36–42. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.08.011>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Core Writing Team; Lee, H.; Romero, J., Eds.; IPCC, Geneva, 2023. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf.
- International Science Council. *LIRA 2030 Africa: Learning from Practising Transdisciplinary Research for Sustainable Development in African Cities*; International Science Council: Paris, 2023. <https://council.science/wp-content/uploads/2020/06/LIRA-Learning-Study-Report-230321-WEB.pdf%22>.
- Ismail-Zadeh, A. T.; Cutter, S. L.; Takeuchi, K. et al. Forging a Paradigm Shift in Disaster Science. *Natural Hazards* **2017**, 86 (2), 969–988. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2726-x>.
- Jack, C. D.; Marsham, J.; Rowell, D. P. et al. Climate Information: Towards Transparent Distillation. In *Climate Risk in Africa: Adaptation and Resilience*; Conway, D., Vincent, K., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2021; 17–35. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61160-6_2.
- Kaiser, M.; Gluckman, P. *Looking at the Future of Transdisciplinary Research*; International Science Council (ISC): Paris, 2023. <https://council.science/wp-content/uploads/2024/06/2023-04-26Futureoftransdisciplinaryresearch.pdf>.

- Klein, J. T. The Discourse of Transdisciplinarity: An Expanding Global Field. In *Transdisciplinarity: Joint Problem Solving among Science, Technology, and Society: An Effective Way for Managing Complexity*; Klein, J. T., Häberli, R., Scholz, R. W., Grossenbacher-Mansuy, W., Bill, A., Welti, M., Eds.; Birkhäuser: Basel, Switzerland, 2001; 35–44. https://doi.org/10.1007/978-3-0348-8419-8_4.
- Koele, B.; Daniels, E.; Kavonic, J. et al. FRACTAL City Learning Lab Approach, IMPACT STORY, 1 October 2019, Cross-City **2019**
- Lang, D. J.; Wiek, A.; Bergmann, M. et al. Transdisciplinary Research in Sustainability Science: Practice, Principles, and Challenges. *Sustainability Science* **2012**, 7 (1), 25–43. <https://doi.org/10.1007/s11625-011-0149-x>.
- Matsumoto, Y.; Kasamatsu, H.; Sakakibara, M. Challenges in Forming Transdisciplinary Communities of Practice for Solving Environmental Problems in Developing Countries. *World Futures* **2022**, 78 (8), 546–565. <https://doi.org/10.1080/02604027.2021.2012878>.
- Matsuura, S.; Razak, K. A. Exploring Transdisciplinary Approaches to Facilitate Disaster Risk Reduction at National and Local Levels through Education, Training and Field Practice. In *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction (GAR 2019)*; United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR): Geneva, 2019. <https://www.undrr.org/publication/exploring-transdisciplinary-approaches-facilitate-disaster-risk-reduction-national-and>.
- McClure, A.; Patel, Z.; Ziervogel, G. et al. Exploring the Role of Transdisciplinary Learning for Navigating Climate Risks in African Cities: The Case of Lusaka, Zambia. *Environmental Science & Policy* **2023**, 149, 103571. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2023.103571>.
- Moser, S. *Social Transformations to Sustainability through a Critical Lens*; Belmont Forum, International Science Council, NORFACE, 2024. <https://council.science/wp-content/uploads/2024/07/ISC-T2SReports-Synthesis.pdf>.
- Mukute, M.; Colvin, J.; Burt, J. *Programme Design for Transformations to Sustainability Research*; Belmont Forum, International Science Council, NORFACE, 2024. <https://council.science/wp-content/uploads/2024/07/ISC-T2SReports-ProgrammeDesign.pdf>.
- Norström, A. V.; Cvitanovic, C.; Löf, M. F. et al. Principles for Knowledge Co-Production in Sustainability Research. *Nature Sustainability* **2020**, 3 (3), 182–190. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0448-2>.
- Paton, D.; Buergelt, P. Risk, Transformation and Adaptation: Ideas for Reframing Approaches to Disaster Risk Reduction. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **2019**, 16 (14), 2594. <https://doi.org/10.3390/ijerph16142594>.
- Paulavets, K.; Moore, S.; Denis, M. Advancing Transdisciplinary Research in the Global South. In *Handbook of Transdisciplinarity: Global Perspectives*; Lawrence, R., Ed.; Edward Elgar, 2023. <https://www.elgaronline.com/edcollchap-oa/book/9781802207835/book-part-9781802207835-27.xml>.
- Pohl, C. What Is Progress in Transdisciplinary Research? *Futures* **2011**, 43 (6), 618–626. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2011.03.001>.
- Pohl, C.; Hadorn, G. H. Methodological Challenges of Transdisciplinary Research. *Natures Sciences Sociétés* **2008**, 16 (2), 111–121. <https://doi.org/10.1051/nss:2008035>.
- Taylor, A.; Siame, G.; Mwalukanga, B. Integrating Climate Risks into Strategic Urban Planning in Lusaka, Zambia. In *Climate Risk in Africa: Adaptation and Resilience*; Conway, D., Vincent, K., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2021; 115–129. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61160-6_7.
- Tschanz, L.; Arlot, M. P.; Philippe, F. et al. A Transdisciplinary Method, Knowledge Model and Management Framework for Climate Change Adaptation in Mountain Areas Applied in the Vercors, France. *Regional Environmental Change* **2022**, 22 (1), 15. <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01862-3>.
- Vincent, K.; Steynor, A.; McClure, A. et al. Co-Production: Learning from Contexts. In *Climate Risk in Africa: Adaptation and Resilience*; Conway, D., Vincent, K., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2021; 37–56. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61160-6_3.
- Walter, A. I.; Helgenberger, S.; Wiek, A. et al. Measuring Societal Effects of Transdisciplinary Research Projects: Design and Application of an Evaluation Method. *Evaluation and Program Planning* **2007**, 30 (4), 325–338. <https://doi.org/10.1016/j.evalprogplan.2007.08.002>.
- World Meteorological Organization (WMO). *United in Science 2023: Sustainable Development Edition*; WMO: Geneva, 2023.

A future where everyone is protected by life-saving early warning systems

- Golding, B., Ed. *Towards the “Perfect” Weather Warning: Bridging Disciplinary Gaps through Partnership and Communication*; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, **2022**. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-98989-7>.
- Group on Earth Observations (GEO). *GEO Highlights 2023*. GEO: Geneva, 2023. <https://earthobservations.org/storage/app/media/documents/Events/GEO-Week-2023/GEO%202023%20Highlights%20Report.pdf>.
- Indonesia Meteorological, Climatological and Geophysical Agency (BMKG). *Signature – System for Multi Generation Weather Model Analysis and Impact Forecast*; BMKG, 2024. <https://signature.bmkg.go.id/>.
- International Telecommunications Union (ITU). *Disaster Connectivity Map*. ITU: Geneva, 2024a. <https://www.itu.int/en/ITU-D/Emergency-Telecommunications/Pages/Disaster-Connectivity-Map.aspx>.
- International Telecommunications Union (ITU). *AI Sub-Group of Early Warnings for All Initiative*. ITU: Geneva, 2024b. <https://www.itu.int/en/ITU-D/Emergency-Telecommunications/Pages/AI-Sub-Group-EW4All.aspx>.
- International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies (IFRC). *Operational Framework for Anticipatory Action 2021–2025*. IFRC: Geneva, **2022**. <https://www.ifrc.org/document/operational-framework-anticipatory-action-2021-2025>.
- Nakalembe, C. L.; Kotani, R. *Ugandan Crop Monitoring System Enables Early Drought Response*. Earth Observations Risk Toolkit, **2022**. <https://earth-observation-risk-toolkit-undrr.hub.arcgis.com/pages/drought-early-warning-in-uganda#fn1>.
- World Meteorological Organization (WMO) and United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). *Global Status of Multi-Hazard Early Warning Systems 2023*. Geneva, 2023. <https://www.undrr.org/reports/global-status-MHEWS-2023#download>.



For more information please visit:
public.wmo.int/en/resources/united_in_science

