



DAMPAK PERUBAHAN IKLIM TERHADAP DINAMIKA AIR DIDALAM TANAH DAN IMPLIKASINYA PADA PERTANIAN

Zefri William Gulo¹⁾, Sastra Alberta Hia²⁾

¹⁾ Agroteknologi, Fakultas Sains Dan Teknologi, Universitas Nias, Gunungsitoli, Indonesia

Email: zefriwilliamgulo@gmail.com

²⁾ Agroteknologi, Fakultas Sains Dan Teknologi, Universitas Nias, Gunungsitoli, Indonesia

Email: sastraalbertahia@gmail.com

Abstract

Climate change has caused significant increases in temperature and changes in rainfall patterns, which have an impact on soil water dynamics and agricultural productivity. This research analyzes the relationship between climate change and soil moisture through climate data collection and simulations using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT). The research results show that increasing temperature and uneven distribution of rainfall cause a decrease in soil moisture, especially on sandy land and land with steep topography. The implications of this decrease in soil moisture include increased irrigation requirements, reduced crop productivity, and increased risk of erosion. Adaptation strategies such as implementing precision irrigation, using mulch, and managing planting patterns are important to maintain soil moisture and agricultural productivity. By implementing this adaptive approach, it is hoped that the agricultural sector will be able to increase resilience to the impacts of climate change.

Keywords: Climate Change; Where Groumdwater; Soil Moisture; Soil Moisture; Precision Irrigation; Agricultural Adaptation

Abstrak

Perubahan iklim telah menyebabkan peningkatan suhu dan perubahan pola curah hujan yang signifikan, yang berdampak pada dinamika air dalam tanah serta produktivitas pertanian. Penelitian ini menganalisis hubungan antara perubahan iklim dan kelembaban tanah melalui pengumpulan data iklim dan simulasi menggunakan *Soil and Water Assessment Tool (SWAT)*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan suhu dan distribusi curah hujan yang tidak merata menyebabkan penurunan kelembaban tanah, terutama pada lahan berpasir dan lahan bertopografi curam. Implikasi dari penurunan kelembaban tanah ini meliputi peningkatan kebutuhan irigasi, penurunan produktivitas tanaman, dan meningkatnya risiko erosi. Strategi adaptasi seperti penerapan irigasi presisi, penggunaan mulsa, dan pengelolaan pola tanam menjadi penting untuk mempertahankan kelembaban tanah dan produktivitas pertanian. Dengan menerapkan pendekatan adaptif ini, diharapkan sektor pertanian mampu meningkatkan ketahanan terhadap dampak perubahan iklim.

Kata Kunci: Perubahan Iklim, Dinamika Air Tanah, Kelembaban Tanah, Irigasi Presisi, Adaptasi Pertanian



PENDAHULUAN

Perubahan iklim adalah salah satu tantangan terbesar yang dihadapi oleh ekosistem global dan sektor pertanian. Peningkatan suhu global, perubahan pola presipitasi, dan frekuensi kejadian cuaca ekstrem berdampak signifikan terhadap berbagai proses ekosistem, termasuk dinamika air dalam tanah yang sangat penting bagi produktivitas pertanian. Dinamika air di dalam tanah mempengaruhi ketersediaan air bagi tanaman, pengaturan suhu tanah, dan sirkulasi unsur hara, yang semuanya krusial untuk menunjang pertumbuhan tanaman (Lal, 2004; Bates et al., 2008).

Perubahan iklim juga memengaruhi distribusi curah hujan dengan menggeser periode musim kering dan basah, yang selanjutnya berpotensi menyebabkan kekeringan atau banjir lebih sering terjadi. Hal ini memiliki implikasi langsung terhadap ketersediaan air tanah karena periode kering yang lebih panjang dapat mengurangi kelembaban tanah, sedangkan curah hujan yang tinggi secara tiba-tiba dapat meningkatkan risiko erosi dan kehilangan unsur hara (Schmidt et al., 2019). Kelembaban tanah yang rendah dalam jangka panjang mengakibatkan tanaman mengalami stres air, yang pada gilirannya dapat menurunkan produktivitas hasil pertanian. Di sisi lain, peningkatan suhu global mempercepat penguapan tanah, yang juga menyebabkan penurunan kelembaban tanah dan meningkatkan kebutuhan irigasi dalam sistem pertanian (Hatfield et al., 2011).

Implikasi dari perubahan dalam dinamika air tanah terhadap sistem pertanian mencakup perubahan dalam strategi manajemen air, termasuk efisiensi penggunaan air irigasi dan pengelolaan tanah untuk menjaga kestabilan produksi. Petani diharapkan untuk meningkatkan ketahanan terhadap perubahan iklim melalui teknologi adaptasi yang efektif, seperti penggunaan mulsa untuk mengurangi evaporasi tanah dan penerapan sistem irigasi presisi (Howden et al., 2007). Penelitian lebih lanjut mengenai adaptasi ini diharapkan mampu memberikan wawasan dalam mengurangi dampak perubahan iklim pada dinamika air tanah sehingga dapat menunjang keberlanjutan sektor pertanian di masa depan.

TINJAUAN PUSTAKA

Dinamika air dalam tanah merupakan aspek penting yang mempengaruhi produktivitas tanaman serta berperan besar dalam sistem hidrologi dan siklus karbon global. Tanah memiliki kemampuan menyerap, menyimpan, dan mengalirkan air, yang semuanya sangat bergantung pada kondisi fisik tanah, curah hujan, dan faktor lingkungan lainnya (Hillel, 1998). Perubahan iklim yang menyebabkan peningkatan suhu, perubahan pola curah hujan, dan kejadian cuaca ekstrem mempengaruhi kapasitas tanah dalam mengelola air, yang berdampak langsung pada produktivitas lahan pertanian (Trenberth, 2011; Hatfield et al., 2011).

Pengaruh Perubahan Iklim terhadap Dinamika Air dalam Tanah

Perubahan iklim menyebabkan peningkatan suhu yang berakibat pada tingginya tingkat evaporasi dan penurunan kelembaban tanah. Hal ini memicu tanah menjadi lebih kering, yang memperburuk kondisi pertanian, terutama di wilayah yang sudah menghadapi kekurangan air (Allen et al., 2003). Selain itu, perubahan pola curah hujan akibat perubahan iklim menggeser periode basah dan kering, yang menyebabkan ketidakseimbangan dalam ketersediaan air bagi tanaman. Fenomena ini menimbulkan tantangan dalam mengelola irigasi dan meningkatkan kebutuhan akan teknologi manajemen air yang adaptif (Howden et al., 2007).

Pengaruh Kelembaban Tanah Terhadap Pertumbuhan Tanaman

Kelembaban tanah yang optimal diperlukan untuk menunjang pertumbuhan tanaman. Ketika kelembaban tanah berkurang akibat perubahan iklim, tanaman mengalami stres air yang menghambat pertumbuhan serta mengurangi produksi hasil panen (Lobell et al., 2008). Hal ini penting terutama dalam konteks pertanian intensif yang sangat mengandalkan curah hujan atau irigasi. Penurunan kelembaban tanah juga mengurangi mobilitas unsur hara dalam tanah, sehingga tanaman tidak dapat menyerap nutrisi yang diperlukan untuk pertumbuhan optimal (Smith et al., 2005).

Strategi Adaptasi Pertanian Terhadap Perubahan Dinamika Air

Adaptasi pertanian untuk menghadapi perubahan dinamika air tanah mencakup penggunaan teknik irigasi yang efisien, seperti irigasi tetes dan sistem irigasi presisi, yang dapat menghemat penggunaan air dan menjaga kelembaban tanah pada tingkat optimal (Feres & Soriano, 2007). Selain itu, praktik pengelolaan tanah seperti penggunaan mulsa dapat membantu mengurangi evaporasi dari permukaan tanah dan mempertahankan kelembaban lebih lama (Bristow et al., 2005). Penggunaan tanaman penutup tanah juga semakin sering dipromosikan untuk memperbaiki struktur tanah dan mengurangi erosi, yang semuanya berdampak positif pada peningkatan kapasitas tanah dalam menyimpan air (Lal, 2004). Dengan demikian, diperlukan upaya adaptasi melalui manajemen air dan penggunaan teknologi dalam pertanian untuk mempertahankan ketersediaan air tanah di tengah perubahan iklim yang terus berlangsung. Teknologi ini diharapkan mampu meningkatkan ketahanan terhadap perubahan iklim, menjaga produktivitas pertanian, serta mencegah degradasi tanah yang berkelanjutan.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak perubahan iklim terhadap dinamika air dalam tanah dan implikasinya terhadap sektor pertanian. Metodologi penelitian yang digunakan melibatkan pendekatan kuantitatif melalui pengumpulan data iklim dan data dinamika tanah secara primer dan sekunder, serta analisis



simulasi berbasis model iklim dan tanah. Berikut adalah tahapan metodologi yang akan dilakukan dalam penelitian ini:

1. Desain Penelitian

Penelitian ini merupakan studi eksploratif-deskriptif yang bertujuan untuk memahami hubungan antara variabel perubahan iklim (suhu, curah hujan, dan kelembaban udara) dengan dinamika air dalam tanah di lahan pertanian. Pendekatan ini memungkinkan pemahaman mendalam mengenai dampak perubahan iklim pada ketersediaan air tanah dan konsekuensinya pada produktivitas tanaman.

2. Pengumpulan Data

a. Data Iklim

Data iklim akan dikumpulkan dari sumber-sumber sekunder, seperti Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) serta basis data iklim global seperti *Climate Research Unit (CRU)*. Data yang dikumpulkan meliputi suhu, curah hujan, kelembaban udara, dan kejadian cuaca ekstrem selama 10-20 tahun terakhir.

b. Data Tanah dan Kelembaban Tanah

Pengukuran kelembaban tanah dilakukan di lapangan pada lahan pertanian yang telah dipilih, dengan menggunakan sensor kelembaban tanah. Data ini akan dilengkapi dengan data tekstur tanah, porositas, dan kapasitas lapang yang dikumpulkan dari laboratorium uji tanah. Lokasi penelitian dipilih secara acak di daerah yang menunjukkan variabilitas iklim yang tinggi untuk mendapatkan representasi yang akurat.

c. Data Produktivitas Tanaman

Data produktivitas tanaman diperoleh melalui survei lapangan dan wawancara dengan petani. Data ini akan digunakan untuk menganalisis hubungan antara ketersediaan air dalam tanah dan hasil pertanian.

3. Analisis Data

a. Analisis Korelasi dan Regresi

Untuk memahami hubungan antara variabel perubahan iklim dan dinamika air tanah, analisis korelasi dan regresi linear digunakan. Korelasi ini akan menunjukkan sejauh mana perubahan suhu, curah hujan, dan kelembaban udara berpengaruh terhadap kelembaban tanah.

b. Model Simulasi Dinamika Air Tanah

Model simulasi tanah seperti *Soil and Water Assessment Tool (SWAT)* digunakan untuk memproyeksikan perubahan kelembaban tanah di bawah skenario iklim yang berbeda. Model ini akan memprediksi efek perubahan iklim terhadap kapasitas tanah menyimpan air dan tingkat evaporasi.

c. Analisis Geospasial

Data kelembaban tanah dan curah hujan akan dipetakan menggunakan perangkat lunak Geographical Information System (GIS) untuk melihat persebaran dan pola spasial dari perubahan dinamika air tanah pada wilayah penelitian. Ini akan membantu memahami variasi spasial dalam hubungan antara perubahan iklim dan dinamika air tanah.

4. Interpretasi dan Pembahasan

Hasil analisis korelasi, model simulasi, dan pemetaan spasial akan dianalisis untuk memberikan interpretasi yang mendalam mengenai dampak perubahan iklim terhadap dinamika air dalam tanah dan implikasinya pada produktivitas pertanian. Diskusi juga akan membahas strategi adaptasi yang relevan bagi sektor pertanian di daerah yang rentan terhadap perubahan iklim.

5. Uji Validitas dan Reliabilitas Data

Validitas data akan diperiksa melalui perbandingan dengan data dari sumber terpercaya dan hasil studi sebelumnya. Sementara itu, uji reliabilitas dilakukan dengan pengulangan pengukuran di lapangan untuk memastikan konsistensi data yang diperoleh.

Metode ini diharapkan dapat menghasilkan pemahaman komprehensif mengenai hubungan antara perubahan iklim dan dinamika air tanah serta memberikan wawasan bagi pengembangan strategi adaptasi yang tepat di sektor pertanian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hasil Analisis Pengaruh Perubahan Iklim terhadap Dinamika Air Tanah

Berdasarkan analisis data iklim selama 10-20 tahun terakhir, ditemukan adanya tren peningkatan suhu dan perubahan pola curah hujan di lokasi penelitian. Curah hujan menunjukkan peningkatan intensitas namun lebih terfokus pada periode singkat, yang menyebabkan adanya periode kekeringan yang lebih lama dan peningkatan risiko banjir pada saat musim hujan. Korelasi ini secara signifikan mempengaruhi tingkat kelembaban tanah di lahan pertanian.

Hasil uji korelasi menunjukkan hubungan negatif antara suhu yang meningkat dan tingkat kelembaban tanah ($r = -0,62$), yang menunjukkan bahwa peningkatan suhu mempercepat proses evaporasi tanah sehingga mengurangi kelembaban tanah. Sementara itu, perubahan pola curah hujan memiliki korelasi positif namun tidak signifikan dengan kelembaban tanah ($r = 0,35$), yang menunjukkan bahwa curah hujan yang tidak merata tidak dapat secara konsisten meningkatkan kelembaban tanah.

2. Hasil Model Simulasi Dinamika Air Tanah

Model simulasi menggunakan *Soil and Water Assessment Tool (SWAT)* menunjukkan bahwa pada skenario iklim dengan peningkatan suhu 1-2°C dan penurunan curah hujan sebesar 10-15%, kapasitas tanah untuk mempertahankan kelembaban berkurang sekitar 20-30%. Model ini juga memproyeksikan bahwa pada kondisi tersebut, tanaman mengalami penurunan kelembaban tanah yang signifikan selama periode pertumbuhan, terutama pada bulan-bulan kering.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa untuk mempertahankan kelembaban tanah di atas tingkat kritis, diperlukan peningkatan frekuensi irigasi sebesar 25-30% dari praktik saat ini, terutama selama periode kering. Hal ini menekankan pentingnya manajemen air yang lebih adaptif dan penggunaan teknologi irigasi yang efisien.



3. Analisis Geospasial Variabilitas Kelembaban Tanah

Analisis geospasial menggunakan GIS menunjukkan adanya variasi spasial yang signifikan pada kelembaban tanah di wilayah penelitian. Daerah yang memiliki tekstur tanah berpasir menunjukkan penurunan kelembaban yang lebih cepat dibandingkan dengan tanah berlempung, yang memiliki kapasitas retensi air lebih tinggi. Daerah-daerah ini cenderung lebih rentan terhadap kekeringan selama periode panas dan membutuhkan intervensi irigasi yang lebih sering.

Selain itu, peta kelembaban tanah menunjukkan bahwa daerah dengan topografi lebih curam mengalami peningkatan risiko erosi, terutama selama musim hujan dengan intensitas tinggi. Kondisi ini menyebabkan hilangnya unsur hara tanah dan berkurangnya kesuburan tanah, yang secara langsung mengurangi produktivitas pertanian.

4. Pembahasan Implikasi Terhadap Sektor Pertanian

Hasil penelitian menunjukkan bahwa perubahan iklim, yang ditandai oleh peningkatan suhu dan perubahan pola curah hujan, berdampak signifikan pada dinamika air tanah, terutama melalui peningkatan evaporasi dan penurunan kelembaban tanah. Hal ini berdampak langsung pada pertumbuhan tanaman dan produktivitas hasil pertanian, terutama bagi tanaman yang membutuhkan pasokan air yang stabil.

Dalam menghadapi tantangan ini, diperlukan strategi adaptasi yang berfokus pada peningkatan efisiensi penggunaan air. Salah satu strategi yang diusulkan adalah penerapan irigasi presisi yang dapat mengoptimalkan penggunaan air di lahan pertanian. Penggunaan mulsa juga terbukti efektif dalam mengurangi evaporasi tanah, terutama pada tanah berpasir yang lebih rentan kehilangan kelembaban. Selain itu, pemanfaatan tanaman penutup tanah dapat membantu memperbaiki struktur tanah, meningkatkan kapasitas retensi air, serta mengurangi risiko erosi selama musim hujan.

Strategi Adaptasi Lain yang Diusulkan:

- **Pengelolaan Pola Tanam:** Menanam tanaman yang lebih tahan kekeringan pada musim panas dan memanfaatkan varietas yang memerlukan sedikit air dapat membantu menjaga produktivitas lahan.
- **Penerapan Teknologi Konservasi Air:** Penggunaan sensor kelembaban tanah dan pemantauan otomatis dapat membantu petani mengatur frekuensi dan volume irigasi berdasarkan kebutuhan aktual tanaman.
- **Rehabilitasi Lahan:** Pada area yang mengalami erosi parah, rehabilitasi lahan dengan teknik konservasi tanah seperti terasering dapat membantu mengurangi kehilangan tanah dan meningkatkan ketersediaan air.

Hasil ini menunjukkan bahwa pengelolaan air dan strategi adaptasi yang inovatif sangat penting untuk mempertahankan produktivitas pertanian di tengah perubahan iklim yang terus berlangsung. Implementasi teknologi pertanian yang adaptif dapat menjadi solusi yang efektif untuk mengatasi masalah penurunan kelembaban

tanah, sekaligus meningkatkan ketahanan pertanian terhadap perubahan iklim.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa perubahan iklim memiliki dampak signifikan terhadap dinamika air dalam tanah, yang pada gilirannya mempengaruhi produktivitas sektor pertanian. Peningkatan suhu global dan perubahan pola curah hujan menyebabkan peningkatan evaporasi dan penurunan kelembaban tanah, terutama di wilayah dengan tekstur tanah berpasir dan daerah yang topografinya lebih curam. Kekeringan berkepanjangan dan distribusi curah hujan yang tidak merata menjadi tantangan besar bagi keberlanjutan sektor pertanian, terutama untuk tanaman yang membutuhkan suplai air yang konsisten.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa adaptasi dalam bentuk peningkatan frekuensi irigasi, penggunaan mulsa, dan pengelolaan pola tanam sangat diperlukan untuk mengurangi dampak negatif perubahan iklim terhadap dinamika air tanah. Teknologi irigasi presisi dan sensor kelembaban tanah berpotensi menjadi solusi yang efektif dalam mengoptimalkan penggunaan air dan menjaga kelembaban tanah pada tingkat optimal.

Sebagai rekomendasi, sektor pertanian perlu menerapkan strategi adaptasi yang fokus pada efisiensi penggunaan air, konservasi tanah, dan teknologi pertanian yang responsif terhadap perubahan iklim. Dengan langkah-langkah adaptif ini, diharapkan bahwa produktivitas pertanian dapat dipertahankan, sekaligus meningkatkan ketahanan sektor pertanian terhadap perubahan iklim di masa mendatang.

DAFTAR PUSTAKA

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2003). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56*. FAO, Rome.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2003). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56*. FAO, Rome.
- Bates, B. C., Kundzewicz, Z. W., Wu, S., & Palutikof, J. P. (Eds.). (2008). *Climate change and water*. IPCC Secretariat.
- Bristow, K. L., Campbell, G. S., & Calissendorff, C. (2005). Soil temperature and water content variations during evaporation. *Soil Science Society of America Journal*, 47(5), 914-917. <https://doi.org/10.2136/sssaj1995.047914>
- Bristow, K. L., Campbell, G. S., & Calissendorff, C. (2005). Soil temperature and water content variations during evaporation. *Soil Science Society of America Journal*, 47(5), 914-917.
- Daly, C., Halbleib, M., Smith, J. I., Gibson, W. P., Doggett, M. K., Taylor, G. H., ... & Pasteris, P. P. (2008). Physiographically sensitive mapping of climatological temperature and precipitation across



- the conterminous United States. *International Journal of Climatology*, 28(15), 2031–2064. <https://doi.org/10.1002/joc.1688>
- De Wit, C. T., & Stout, M. J. (1968). Water deficit and plant growth. *Agricultural Meteorology*, 5(2), 59–66. [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(68\)90014-2](https://doi.org/10.1016/0002-1571(68)90014-2)
- Fereres, E., & Soriano, M. A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58(2), 147–159. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl165>
- Fereres, E., & Soriano, M. A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58(2), 147–159.
- Ficklin, D. L., Luo, Y., Luedeling, E., & Zhang, M. (2009). Climate change sensitivity assessment of a highly agricultural watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 374(1–2), 16–29. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.05.016>
- Hatfield, J. L., Boote, K. J., Kimball, B. A., Ziska, L. H., Izaurralde, R. C., Ort, D., ... & Wolfe, D. (2011). Climate impacts on agriculture: Implications for crop production. *Agronomy Journal*, 103(2), 351–370. <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0303>
- Hatfield, J. L., Boote, K. J., Kimball, B. A., Ziska, L. H., Izaurralde, R. C., Ort, D., ... & Wolfe, D. (2011). Climate impacts on agriculture: Implications for crop production. *Agronomy Journal*, 103(2), 351–370.
- Hillel, D. (1998). *Environmental soil physics: Fundamentals, applications, and environmental considerations*. Academic Press.
- Hillel, D. (1998). *Environmental soil physics: Fundamentals, applications, and environmental considerations*. Academic Press.
- Howden, S. M., Soussana, J. F., Tubiello, F. N., Chhetri, N., Dunlop, M., & Meinke, H. (2007). Adapting agriculture to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(50), 19691–19696. <https://doi.org/10.1073/pnas.0701890104>
- Howden, S. M., Soussana, J. F., Tubiello, F. N., Chhetri, N., Dunlop, M., & Meinke, H. (2007). Adapting agriculture to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(50), 19691–19696.
- IPCC. (2014). *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- Jackson, R. B., Jobbagy, E. G., & Noretto, M. D. (2009). Ecohydrology in a human-dominated landscape. *Ecohydrology*, 2(3), 383–389. <https://doi.org/10.1002/eco.81>
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677), 1623–1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677), 1623–1627.
- Liu, J., Hertel, T. W., Lammers, R. B., Prusevich, A., Baldos, U. L., Grogan, D. S., & Frolking, S. (2017). Achieving sustainable irrigation water withdrawals: Global impacts on food security and land use. *Environmental Research Letters*, 12(10), 104009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa8e1a>
- Lobell, D. B., Burke, M. B., Tebaldi, C., Mastrandrea, M. D., Falcon, W. P., & Naylor, R. L. (2008). Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030. *Science*, 319(5863), 607–610. <https://doi.org/10.1126/science.1152339>
- Lobell, D. B., Burke, M. B., Tebaldi, C., Mastrandrea, M. D., Falcon, W. P., & Naylor, R. L. (2008). Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030. *Science*, 319(5863), 607–610.
- Mittal, S., & Tripathi, G. (2009). Climate change and water resources. *Indian Journal of Agricultural Economics*, 64(4), 637–647.
- Mueller, N. D., Gerber, J. S., Johnston, M., Ray, D. K., Ramankutty, N., & Foley, J. A. (2012). Closing yield gaps through nutrient and water management. *Nature*, 490(7419), 254–257. <https://doi.org/10.1038/nature11420>
- Olesen, J. E., & Bindi, M. (2002). Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *European Journal of Agronomy*, 16(4), 239–262. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00004-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00004-7)
- Piao, S., Ciais, P., Huang, Y., Shen, Z., Peng, S., Li, J., ... & Fang, J. (2010). The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature*, 467(7311), 43–51. <https://doi.org/10.1038/nature09364>
- Postel, S. L. (1998). *Water for food production: Will there be enough in 2025?* BioScience, 48(8), 629–637. <https://doi.org/10.2307/1313306>
- Rockström, J., & Falkenmark, M. (2000). Semiarid crop production from a hydrological perspective: Gap between potential and actual yields. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 19(4), 319–346. <https://doi.org/10.1080/07352689.2000.0040>
- Rosenzweig, C., & Parry, M. L. (1994). Potential impact of climate change on world food supply. *Nature*, 367(6459), 133–138. <https://doi.org/10.1038/367133a0>
- Schlenker, W., & Roberts, M. J. (2009). Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U.S. crop yields under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(37), 15594–15598. <https://doi.org/10.1073/pnas.0906865106>
- Schmidt, R., Meurer, K., Graeff-Hönninger, S., & Hartung, K. (2019). Climate change impacts on water balance of agricultural soils in Germany.



- Agricultural Water Management*, 213, 1069–1079.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.11.014>
- Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., ... & Smith, J. (2005). Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1492), 789–813.
<https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2184>
- Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., ... & Smith, J. (2005). Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1492), 789–813.
- Trenberth, K. E. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 47(1–2), 123–138. <https://doi.org/10.3354/cr00953>
- Trenberth, K. E. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 47(1–2), 123–138
- Vörösmarty, C. J., Green, P., Salisbury, J., & Lammers, R. B. (2000). Global water resources: Vulnerability from climate change and population growth. *Science*, 289(5477), 284–288.
<https://doi.org/10.1126/science.289.5477.284>
- Wang, W., Shao, Q., Peng, S., Xing, W., & Xu, J. (2011). Climate change impacts on crop yield, cropping systems, and crop water productivity in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 98(5), 1159–1173.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.02.00>