

תפקידם של מיקרואורגניזמים במחזור המתאן

Santiago Cadena¹, Francisco J. Cervantes², Luisa I. Falcón³, José Q. García-Maldonado^{4*}

¹המעבדה לפתולוגיה ימית, המחלקה למשאבי הים, המרכז לחקר ולימודים מתקדמים של המכון הפוליטכני הלאומי, יחידת מרידה, מרידה, מקסיקו
²המעבדה לחקר תהליכים מתקדמים בטיפול במים, המכון להנדסה, קמפוס ג'וריקוויולה, האוניברסיטה הלאומית האוטונומית של מקסיקו (UNAM), קוורטרו, מקסיקו
³המעבדה לאקולוגיה של חיידקים, המכון לאקולוגיה, האוניברסיטה הלאומית האוטונומית של מקסיקו, פארק המדע והטכנולוגיה של יוקטאן, מרידה, מקסיקו
⁴CONACYT - המרכז לחקר ולימודים מתקדמים של המכון הפוליטכני הלאומי, יחידת מרידה, מרידה, מקסיקו

סוקר צעיר

ADAM

גיל: 13



האם אי פעם שמעתם על גז מתאן? אולי המילה מתאן אינה מוכרת לכם, אולם הגז הזה נמצא בשימוש נרחב בחיי היומיום שלנו, באטמוספירה שלנו ובמערכת השמש. מתאן הוא גז שמיוצר באופן טבעי בסביבות שונות, והוא מגיע מפירוק של חומר אורגני (לשעבר חי). גז מתאן יעיל בכליאת חום, והוא גם נשרף בקלות רבה. לכן, מתאן הוא אחד מהדלקים החשובים ביותר לבני אדם. נוסף על כך המתאן באטמוספירה מסייע לווסת את האקלים על כדור הארץ. אולם כמות המתאן באטמוספירה עלתה באופן מתמשך ב-200 השנים האחרונות, מה שמדאיג את הקהילה המדעית. באופן מפתיע, מחקרים אחרונים הצביעו על כך שרמות המתאן מווסתות על-ידי מיקרובים זעירים. במאמר זה אנו מעודדים אתכם ללמוד על מחזור המתאן, על המיקרובים שמייצרים מתאן ואוכלים אותו, ועל הסיבות לכך שנדרש מחקר נוסף על הגז הזה.

מהו מתאן ומדוע הוא חשוב לבני אדם?

מתאן הוא תרכובת פשוטה שנוצרת על-ידי אטום אחד של פחמן וארבעה אטומים של מימן (CH_4). מתאן קיים כגז בסביבה, והוא אחד מדלקי המאובנים החשובים ביותר לחברה האנושית.

כשמולקולות מתאן מתפרקות, הוא מייצר חום. בשל התכונה הזו, מתאן משמש כדלק בחלק מהבתים שלנו עבור בישול, חימום המים ותדלוק הכבשנים והאחים שלנו. מתאן יכול גם להיאסף ולהיות מותמר לחשמל, בעודו משרת כמקור אנרגיה טבעי. מתאן נמצא בגיהוקים ובנפוחות (כן, קראתם נכון, נפוחות!) של חיות. מתאן הוא אחד הגזים השכיחים ביותר שמויצרים במערכת העיכול כשאוכל מפורק. לסיכום, מתאן הוא גז שכיח באטמוספירה. באופן מדהים, ייצור מתאן ופירוקו על כדור הארץ הם תהליכים שמונעים בעיקר על-ידי מיקרואורגניזמים.

מיקרובים/

מיקרואורגניזמים

(Microbes/ Microorganisms)

צורות חיים קטנות מאוד שכוללות חיידקים, פטריות וחלק מהאצות הזעירות.

חומר אורגני

(Organic Matter)

כל התאים והחומרים שמרכיבים יצורים חיים, כולל חיות וצמחים חיים ומתים.

מיקרואורגניזמים (מיקרובים) הם צורות החיים הקטנות ביותר שידועות, ואינן נראות לעין בלתי מזוינת. הם נמצאים בכל סביבות המחיה והמערכות האקולוגיות בכדור הארץ, בסביבה היומיומית שלנו כמו גם בסביבות המחיה העיונות והקיפונות ביותר. אף על פי שהם קטנים להפליא, המגוון והעושר של מיקרואורגניזמים הם עצומים ומדהימים. הערכות אחרונות צופות כי 99-90% ממיני המיקרובים על פני כדור הארץ עדיין לא התגלו [1]. מיקרובים הם השחקן העיקרי במחזור של **חומר אורגני**, וחשובים עבור חומרי מזון על כדור הארץ. הם גם מווסתים את הייצור והפירוק של חלק מהגזים באטמוספירה כולל פחמן דו-חמצני, החמצן שאנו נושמים, וכמובן מתאן.

מתאן משך את תשומת ליבה של הקהילה המדעית מאחר שהריכוז שלו באטמוספירה כמעט שולש, מאז תחילת המהפכה התעשייתית במאה השמונה עשרה. חשוב לציין שחלק מהמחקרים מצביעים על כך שהעלייה הזו במתאן באטמוספירה מתרחשת מהר יותר יחסית למדדי זמן גיאולוגיים, מה שמרמז על ההשפעה של פעילות אנושית שקשורה בפליטות מתאן. הבעיה עם עלייה בכמות המתאן באטמוספירה היא שמתאן הוא גז שיכול לכלוא אנרגיית חום מהשמש ולמנוע מהחום הזה לחזור לחלל, מה שגורם למה שמוכר בשם "אפקט החממה". יכולת אגירת החום הזו חשובה מאוד מאחר שהיא מסייעת לכדור הארץ להישאר מספיק חם כדי לקיים חיים ביולוגיים [2]. אולם הצטברות של יותר מדי מתאן משפיעה על האקלים ותורמת להתחממות הגלובלית. כיום, מחזור המתאן הוא נושא מחקר עיקרי, מאחר שאנו זקוקים להבנה עמוקה יותר של המקורות שמהם מתאן מגיע בכדור הארץ, וכיצד הוא מותמר.

ייצור מתאן במערכות אקולוגיות

ישנן שתי צורות ידועות של ייצור מתאן בכדור הארץ, שנקראות מקורות ביולוגיים ולא ביולוגיים של מתאן. ייצור לא ביולוגי של מתאן מתרחש ללא השתתפות של אורגניזמים חיים. מתאן לא ביולוגי יכול להשתחרר על-ידי הרי געש, או להיווצר מתחת לאדמה בתנאים של לחץ וטמפרטורה גבוהים. התהליכים הגיאולוגיים האלה מערבים בדרך כלל את ההתמרה של סלעים שמומסים עם חום ומים (איור 1). ייצור מתאן ביולוגי מתבצע רק על ידי מיקרואורגניזמים. ההערכות העדכניות מציעות כי 95-90% מהמתאן שמשחרר לאטמוספירה מגיע ממקור ביולוגי ומיוצר באופן בלעדי כתוצאה מפעילות מיקרובית!

התהליך של ייצור מתאן ביולוגי נקרא *מתאנוגנזה*. המיקרואורגניזמים מייצרי המתאן הנחקרים ביותר נקראים ארכיאות מתאנוגניות או בקיצור *מתאנוגנים*. למתאנוגנים יש **חילוף חומרים** מורכב שמאפשר להם ליצור מתאן כשהם מייצרים את האנרגיה שהם צריכים כדי לשרוד. באופן מעניין, חמצן אטמוספרי שאנו צריכים לנשימה וליצירת אנרגיה, רעיל לחלק מהמתאנוגנים, כך שהמיקרואורגניזמים האלה באופן כללי נמצאים באזורים שבהם חמצן מוגבל או חסר, כמו

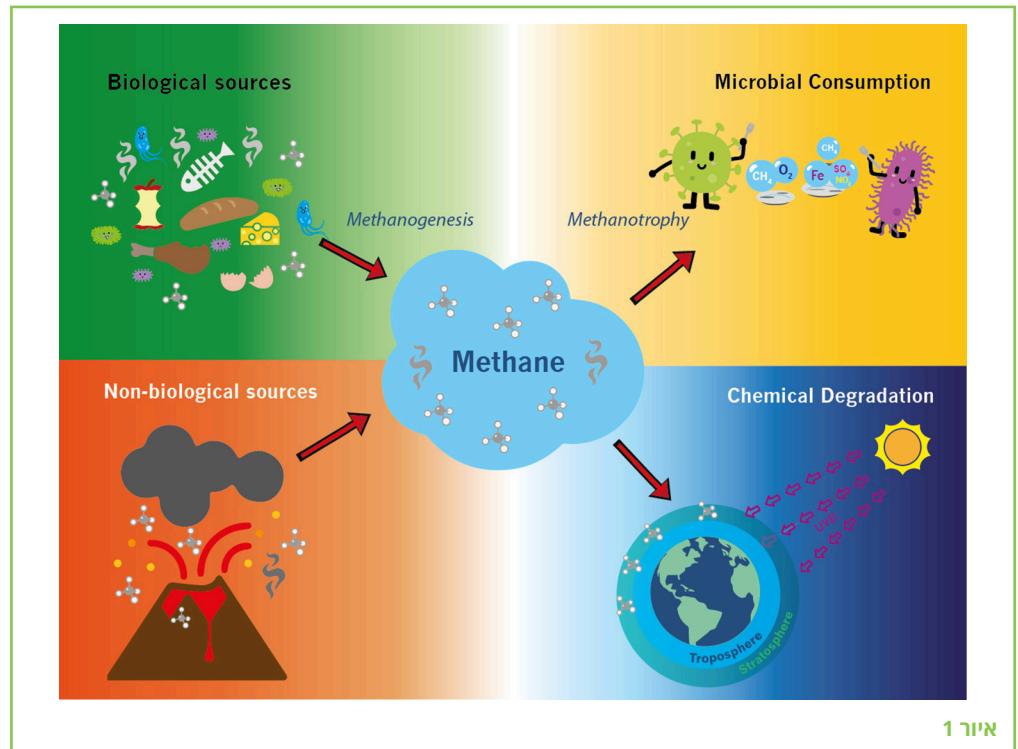
חילוף חומרים

(Metabolism)

כל התגובות הכימיות שנדרשות כדי לשמור על תא או אורגניזם בחיים. חילוף חומרים מתייחס לאופן שבו דברים חיים מייצרים חומרי מזון ומפריקים אותם.

איור 1

דיאגרמה של מחזור המתאן שמראה מקורות של ייצור מתאן ופירוק מתאן בכדור הארץ.



איור 1

למשל מתחת לאדמה, במשקעים בקרקעיות של אגמים ולגונות, באדמות לחות ובאוקיינוסים, ואפילו בתוך המעיים של כל סוגי החיות כולל תולעים, טרמיטים, פרות ובני אדם.

מתאנוגנזה הוא הצעד הסופי בשרשרת המזון שמתרחשת ללא נוכחות של חמצן אטמוספרי. הגז הזה מיוצר כתוצאה מההתפרקות הסופית של חומר אורגני, שבה מולקולות מורכבות מתפרקות למרכיבים הבסיסיים ביותר שלהן ואז מומרות למתאן על-ידי מתאנוגנזה. משמעות הדבר היא שבכל סוגי הסביבה, שאריות של אורגניזמים מתים כמו למשל צמחים וחיות, מתפרקות לאט על-ידי מיקרובים (איור 1). זה מאפשר את חזרתם של חומרי מזון לשרשרת המזון, כצעד סופי שמערב ייצור מתאן [3].

כשמתאן מיוצר, כיצד הוא מוסר מהסביבה?

הסרת מתאן מהסביבה מתרחשת גם היא בשיטות ביולוגיות ולא ביולוגיות. הדרך העיקרית שמתאן אטמוספרי מוסר מתרחשת באופן לא ביולוגי, שמתרחש באזורים באטמוספירה שידועים בשם טרופוספירה וסטרטוספירה. אלה הן השכבות הנמוכות ביותר באטמוספירה של כדור הארץ, מ-0 עד 10 קילומטרים, ומ-10 עד 50 קילומטרים מעל לגובה פני הים, בהתאמה. באזורים האלה, מתאן מפורק על-ידי תגובות כימיות שמונעות על-ידי אור אולטרה-סגול מהשמש. לפי החישובים, יותר מ-90% מהמתאן באטמוספירה מפורק בתהליך הזה (איור 1).

הסרת מתאן ביולוגית על פני כדור הארץ, עד כמה מדהים שזה נשמע, מתבצעת באופן בלעדי על-ידי מיקרובים!

ישנם מיקרואורגניזמים ש"אוכלים" מתאן כדי לקבל אנרגיה. התהליך הזה נקרא מתאנו-טרופיה, ומיקרובים שמבצעים אותו נקראים מתאנוטרופים. "טרופים" משמעותו "מי שניזון ממנו". מתאנוטרופים מאכלסים מערכות אקולוגיות שבהן מתאן מיוצר, בעיקר מתחת לפני השטח של אדמה או משקעים. בגלל שהמתאנוטרופים האלה חיים מתחת לאדמה, מתאן אטמוספרי לא בא במגע עם האורגניזמים האלה. מאחר שמתאנוטרופים לא יכולים לפרק מתאן באטמוספירה, הוא מצטבר. אולם תופעה מעניינת מאוד מתרחשת כאן. איכשהו, מתאן שמיוצר באדמה נכלא בין חלקיקי האדמה ונמצא למעשה איפה שמתאנוטרופים צורכים את הגז. זה מונע ממתאן להשתחרר מהאדמה לאטמוספירה, מה שמפיע באופן משמעותי על תקציב המתאן האטמוספרי. לדוגמה, לפי ההערכות בין 40-60% מהמתאן מיוצר בסביבות מחיה של אדמות לחות, ונצרך על-ידי מיקרובים לפני שהוא יכול לברוח לאטמוספירה. משמעות הדבר היא שמתאנוטרופים חשובים מאוד באדמות, כדי למנוע את שחרורו של גז החממה הזה לאטמוספירה, שם הוא יכול לתרום להתחממות הגלובלית.

מתאנוטרופים יכולים לאכול מתאן גם בנוכחות חמצן אטמוספרי וגם בהיעדרו. מתאנוטרופים שיכולים לסבול חמצן משתמשים בו בתהליך של פירוק מתאן. באופן רגיל, המיקרובים האלה נמצאים באדמות שבהן חמצן מתחיל להיות חסר, מאחר שהוא לא יכול לחדור את חלקיקי האדמה הדחוסים. האזורים האלה בעלי מינימום חמצן מכילים את כמות המתאנוטרופים הגדולה ביותר, והם נמצאים בהרבה מערכות אקולוגיות על פני כדור הארץ.

מתאנוטרופים שלא משתמשים בחמצן כדי לפרק מתאן מעדיפים להשתמש במקורות אנרגיה אקזוטיים אחרים, שמלווים את המתאן עם חלק מסוים של חומר אורגני, או עם גופרית, חנקן ואפילו מתכות מסוימות כמו ברזל או מנגן. כאן, מתאן הוא הארוחה הראשית ויסודות אחרים הם תוספות. באופן מעניין, התהליך הזה שוער לראשונה על בסיס ראיות גיאוכימיות, אולם נשאר בלתי מופענח עד לשנות ה-2000 המוקדמות, מאחר שקשה מאוד לגדל את המיקרובים האלה במעבדה כדי לחקור אותם.

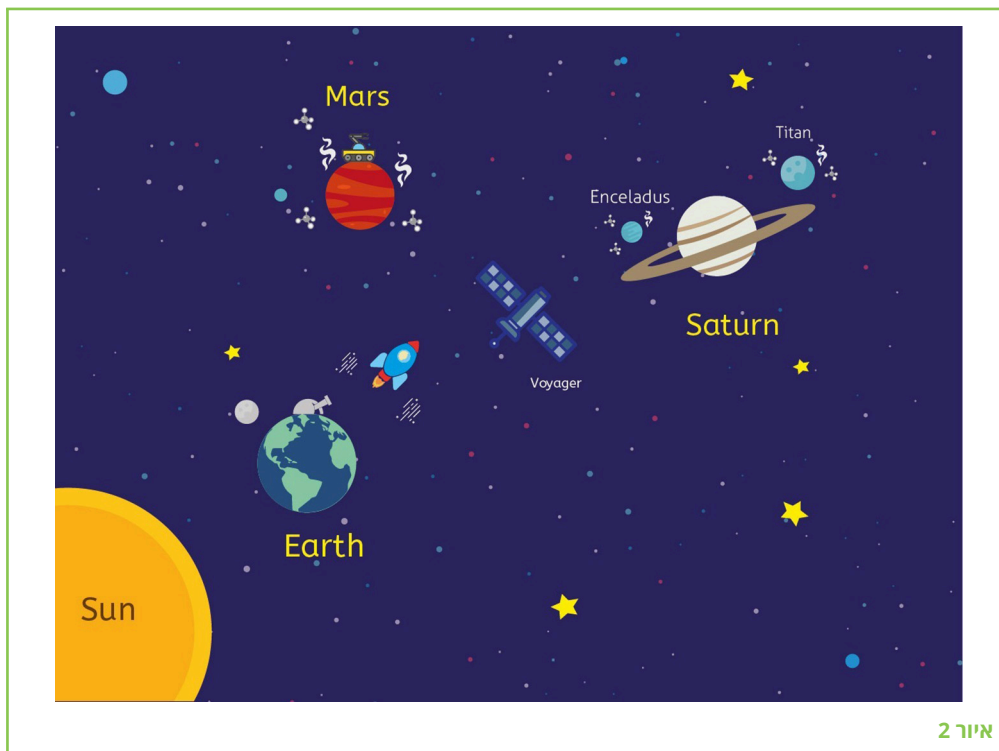
מתאן מעבר לכדור הארץ

כאן על כדור הארץ, מיקרואורגניזמים ממלאים תפקיד חשוב במחזור של מתאן. לכן, אנו יכולים לומר שמתאן קשור בנוכחות של חיים על פני הפלנטה שלנו. באופן מפתיע, ראיות אחרונות שהתקבלו מטלסקופים וציוד מרוחק אחר, זיהו מתאן במקומות אחרים במערכת השמש שלנו, כולל מאדים והירחים הקרחיים של שבתאי שנקראים טיטאן ואנצילדוס [4]. זה מרגש מאוד, וגורם לנו לתהות אם ישנם סוגים מסוימים של מיקרובים במקומות האלה שמייצרים מתאן או צורכים אותו!

מתאן על מאדים התגלה לראשונה בשנות ה-2000 המוקדמות באמצעות טלסקופים שנמצאים בכדור הארץ, ונוכחותו הוכחה כחלק מתוכנית מרס אקספלורישן רובר על-ידי הרוברים ספירט ואופורטוניטי שחקרו את הכוכב (איור 2). הקהילה המדעית תהתה אם המתאן הזה מגיע מתהליכים ביולוגיים, אולם כל הראיות המדעיות שנאספו עד כה מצביעות על כך שהמתאן מגיע ממקורות לא ביולוגיים. כיום, אין עדויות לפעילות ביולוגית על פני השטח של מאדים, אולם המחקר ממשיך מאחר שאנו יודעים שמתאן הוא גם מקור אנרגיה לחלק מהחיים המיקרוביים.

איור 2

אם ישנו מתאן באזורים אחרים במערכת השמש שלנו, האם מיקרובים יכולים גם להיות שם?



איור 2

שתי משימות של חלליות, וויאג'ר וקאסיני-הויגנס, חקרו את שבתאי. שתי החלליות מצאו ראיות למולקולות אורגניות, כולל מתאן, על הירחים של שבתאי, טיטאן ואנצילדוס (איור 2). לירחים האלה יש הרבה מים וקרח בפני השטח שלהם, ככל הנראה באופן דומה לקרחוני הקוטב של כדור הארץ. עד כמה שזה נראה מוזר, נתונים מציעים שגם לטיטאן וגם לאנצילדוס יש אוקיינוסים שמלאים מתאן נוזלי, אֶתָאן וחנקן שנוצרים מאגמים ומנהרות שמכוסים עם סלעים של מי-קרח.

איור 2 ממחיש את גז המתאן שאותר על גופים אחרים במערכת השמש שלנו.

החיפוש אחר סביבות קיצוניות על פני כדור הארץ, כמו למשל מדפי הקרח באנטרקטיקה, יכול לסייע לנו להבין את מקור האבולוציה של מתאן מחוץ לכדור הארץ. כיום, מדענים חוקרים כיצד מיקרובים יכולים לשרוד במערכות אקולוגיות שמכוסות בקרח באופן קבוע, מאחר שאם נוכל להבין טוב יותר את מעגל המתאן בסביבות קיצוניות על פני כדור הארץ, זה יסייע לנו גם להבין כיצד מתאנוגנזה ומתאנטרופיה יכולות להתקיים באופן פוטנציאלי בסביבות הקיצוניות של כוכבי לכת אחרים. אך טבעי לצפות שמתאנוגנים ומתאנטרופים יוכלו להיות בין היצורים שמאכלסים גופים של כוכבי לכת אחרים... ושאנו לא לבד ביקום אלא חולקים אותו עם מגוון רחב של מיקרובים!

מקורות

1. Kopf, A., Schnetzer, J., and Glöckner, F. O. 2016. Marine microbes, the driving engines of the ocean. *Front. Young Minds* 4:1. doi: 10.3389/frym.2016.00001

2. Kasting, J. F. 2004. When methane made climate. *Sci. Am.* 1:80–5. doi: 10.1038/scientificamerican0704-78
3. Conrad, R. 2009. The global methane cycle: recent advances in understanding the microbial processes involved. *Environ. Microbiol. Rep.* 1:285–92. doi: 10.1111/j.1758-2229.2009.00038.x
4. Taubner, R., Schleper, C., Firneis, M. G., and Rittmann, S. K. R. 2015. Assessing the ecophysiology of methanogens in the context of recent astrobiological and planetological studies. *Life (Basel)* 5:1652–86. doi: 10.3390/life5041652

פורסם אונליין: 30 בדצמבר 2021

נערך על ידי: Angelica Cibrian-Jaramillo

ציטוט: Cadena S, Cervantes FJ, Falcón LI and García-Maldonado JQ (2021) תפקידם של מיקרואורגניזמים במחזור המתאן. *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2019.00133-he

Cadena S, Cervantes FJ, Falcón LI and García-Maldonado JQ (2019) **תורגם והותאם:** The Role of Microorganisms in the Methane Cycle. *Front. Young Minds* 7:133. doi: 10.3389/frym.2019.00133

הצהרת ניגוד אינטרסים: המחברים מצהירים כי המחקר נערך בהעדר כל קשר מסחרי או פיננסי שיכול להתפרש כניגוד אינטרסים פוטנציאלי.

© 2019 © **COPYRIGHT** Cadena, Cervantes, Falcón and García-Maldonado 2021. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון **Creative Commons Attribution License (CC BY)**. השימוש, ההפצה או ההעתקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחברים (המקוריים ולבעל זכויות היוצרים, ושהפרסום המקורי בעיתון זה מצוטט בהתאם למקובל באקדמיה). השימוש, ההפצה או ההעתקה אינם מותרים אם הם אינם עומדים בתנאים אלה.

סוקר צעיר

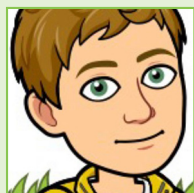
ADAM, גיל: 13

היי, קוראים לי אדם. אני גר עם ההורים שלי, אחי הגדול, כלב, חתול ושתי ציפורים. אני חובב גדול של מדע והיסטוריה. אני אוהב לצייר, לכתוב ולקרוא. הספורט האהוב עליי הוא כדורגל. אני נהנה לשחות בים ולשחק במשחקי וידאו.

הכותבים

SANTIAGO CADENA

אני ביולוג ימי שמתמקד במחקר של אורגניזמים ימיים ואורגניזמים שחיים במים מלוחים. אני מתעניין מאוד בגיאומיקרוביולוגיה, אסטרוביולוגיה וביוטכנולוגיה. יש לי ניסיון בחקר מחזורי מתאן וגופרית במערכות אקולוגיות ימיות. כיום, אני מעורב במחקר על מיקרואורגניזמים חדשניים לפירוק שמן. כמו כן, אנו חוקרים מיקרובים שחיים ביערות מנגרובים. בקיצור, אני מתעניין בחקר תפקידם של מיקרואורגניזמים

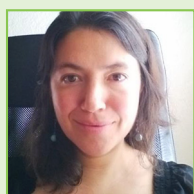


בטבע, ובפוטנציאל השימוש בהם ליישומים בביוטכנולוגיה. https://www.researchgate.net/profile/Santiago_Cadena



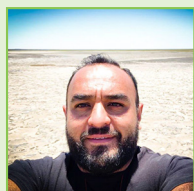
FRANCISCO J. CERVANTES

אני מהנדס ביוטכנולוגיה מהמכון הטכנולוגי של סונורה (ITSON). קיבלתי את התואר השני שלי בביוטכנולוגיה מהאוניברסיטה האוטונומית מטרופוליטנה (UAM) בקמפוס איזטפלה בשנת 1998, ודוקטורט במדעי הסביבה מאוניברסיטת ווגנינגן (הולנד) בשנת 2002. אני פרופסור במכון להנדסה (קמפוס ג'וריקוויילה) של האוניברסיטה הלאומית האוטונומית של מקסיקו (UNAM). תחומי המחקר שלי כוללים כמה נושאים שקשורים לביוטכנולוגיה סביבתית ולמיקרוביולוגיה. <http://www.iingen.unam.mx/es-mx/SitiosWeb/Laboratorios/LIPATA/Personal/Paginas/default.aspx>



LUISA I. FALCÓN

אני אקולוגית של מיקרובים באוניברסיטה הלאומית האוטונומית של מקסיקו, שמרתקת ממגוון החיידקים והארכאונים בסביבה. אני אוהבת איך שמיקרובים מתקשרים זה עם זה כדי להשלים את יכולותיהם המטאבוליות, מה שמאפשר לחברות ולמערכות אקולוגיות להתקיים. <https://sites.google.com/a/ciencias.unam.mx/laboratorio-de-ecologia-bacteriana-instituto-de-ecologia-unam/>



JOSÉ Q. GARCÍA-MALDONADO

אני ביולוג ימי מהאוניברסיטה האוטונומית של באג'ה קליפורניה סור (UABCS). קיבלתי את התארים השני והשלישי שלי בשימוש, ניהול ושימור של משאבי טבע מהמרכז לחקר הביולוגיה (CIBNOR). מאז ספטמבר 2014 אני מכהן כחוקר ויועץ לאומי למדע וטכנולוגיה (CONACYT) עבור המחלקה למשאבים ימיים במרכז למחקר ולימודים מתקדמים במרכז הלאומי הפוליטכני למחקר של המכון הפוליטכני הלאומי (CINVESTAV) במרידה, מקסיקו. המחקר שלי קשור לאקולוגיה וביוטכנולוגיה של חברות מיקרוביות מורכבות בסביבות ימיות וקיצוניות. <https://www.mda.cinvestav.mx/Investigaci%C3%B3n/DepartamentodeRecursosdelMar/PersonalAcad%C3%A9mico/Investigadores/JGarcia.jose.garcia@cinvestav.mx>

מוזיאון המדע ע"ש בלומפילד ירושלים (ע"ר)
متحف العلوم على اسم بلومفيلد القدس
Bloomfield Science Museum Jerusalem



הוצאת גרסה עברית
Hebrew version provided by



THE SAGOL NETWORK