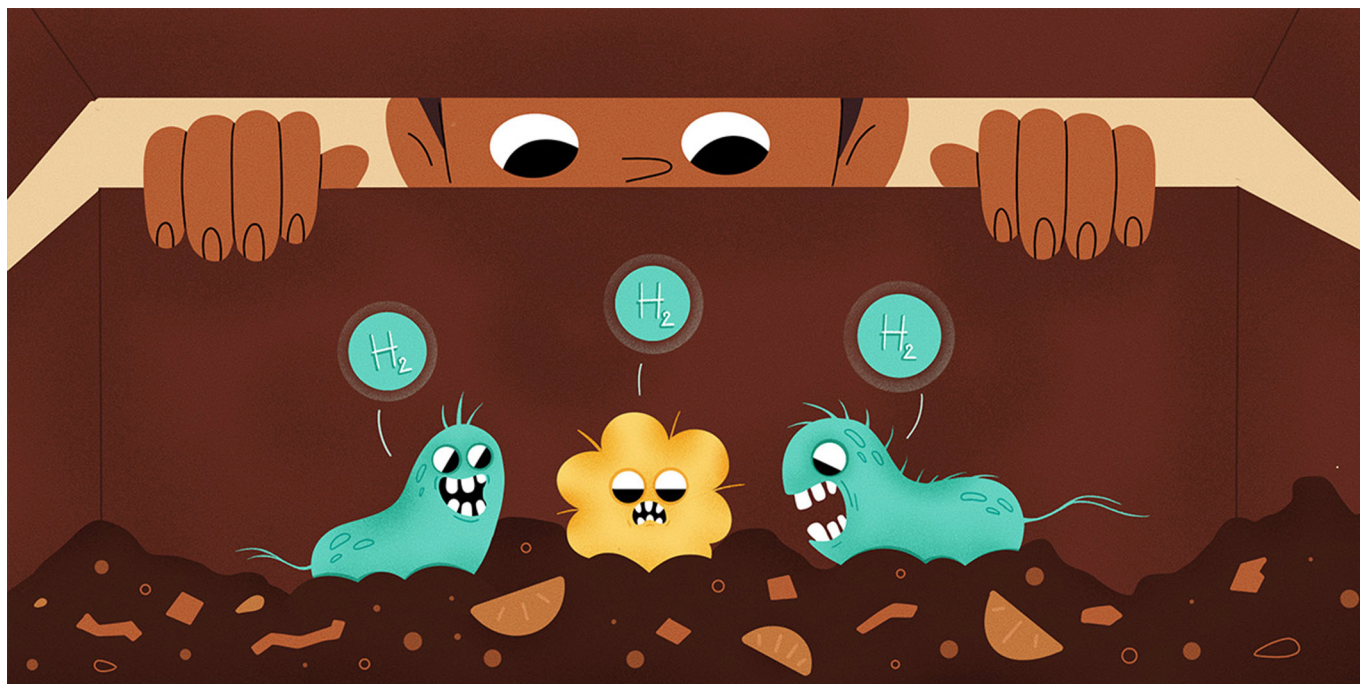




כיצד משתמשים במיקרואורגניזמים לייצור מימן מֶזְבֵּל?

José de Jesús Montoya-Rosales* | Elías Razo-Flores

המחלקה למדעי הסביבה, מכון פוטוסינו למחקר מדעי וטכנולוגי A.C., סן לואיס פוטוסי, מקסיקו

סוקרים צעירים

DAVID

גיל: 11



ELILL

גיל: 15



YUHENDRA

גיל: 12



כיצד הייתם מגיבים לו היו אומרים לכם כי ישנם מיקרואורגניזמים 'טובים' שיכולים לאכול זבל? אומנם קיימים מאמרים ודוחות המְתארים מיקרואורגניזמים כגורמים 'רעים' שעלולים לחולל מחלות. אך ישנם גם מיקרואורגניזמים 'טובים' שביכולתם לאכול זבל אורגני (כמו קליפות בננה וירקות ישנים), המושלך לאשפה בבתי ובמסעדות. מיקרואורגניזמים אלה משתמשים בזבל לייצור אנרגיה בצורת מימן, שבו ניתן להשמש כדלק למכוניות שלנו. התהליך של הפיכת פסולת אורגנית לאנרגיה מכונה 'עיכול אֶנְאִירוֹבִי' (Dark fermentation). בתהליך זה מיוצרות גם תרכובות מועילות נוספות, אשר יכולות לשמש לייצור מזון, תרופות, משקאות ודברים שימושיים אחרים. במאמר זה נדון בתהליך העיכול האנאירובי ובתוצרים המתקבלים לאורך הדרך.

מיקרואורגניזמים שאוכלים זבל

מיקרואורגניזמים הם בין הדברים החיים הקטנים ביותר. למרות שאיננו יכולים לראותם אלא באמצעות מיקרוסקופ, מיקרואורגניזמים קיימים בכל מקום: על הידיים; בקיבה; על משטחי עצצועים וחפצים אחרים; וכמובן, על פני כל כדור הארץ – באוויר; בקרקע ובמים. על אף

הִרְקָבוּת (Decomposition)

פירוק (על ידי מיקרואורגניזמים) של תרכובת העשויה שרשראות של יחידות חומר אורגני.

פסולת אורגנית (Organic Garbage)

חומרים המגיעים מִצֶּמַח או מִחַיָּה, שאותם מיקרואורגניזמים יכולים לִפְרֹק.

איור 1

תהליכי טיפול אפשריים בפסולת אורגנית. הפסולת האורגנית המיוצרת בבתי בדרך כלל מגיעה למטמנות, שם היא מצטברת ונעלמת באטיות רבה לאורך זמן. החלופה היא לִפְרֹק את הפסולת הזו בִּבְיוֹרָאקְטוֹרִים (ראו להלן במילון המונחים), המייצרים תוצרים בעלי עֵרֶךְ שיכולים לשמש לייצור תרופות, מזון, מוצרי קוסמטיקה וכן מימן. בגז המימן ניתן להשתמש לייצור אנרגיה.

Bioreactor = ביוראקטור;
Hydrogen = מימן;
Liquid substances = חומרים נוזליים.

מימן

(Hydrogen)

הגז הקל ביותר בעל הערך האנרגטי הגבוה ביותר. זהו גם היסוד שמצוי בכמויות הגדולות ביותר ביקום.

עיכול אֲנָאֵירוֹבִי

(Dark Fermentation)

תהליך טבעי שבמהלכו מיקרואורגניזמים מסוימים צורכים פחמימות כדי לגדול, להתרבות ולייצר תרכובות כמו חומצות אורגניות וגז מימן.

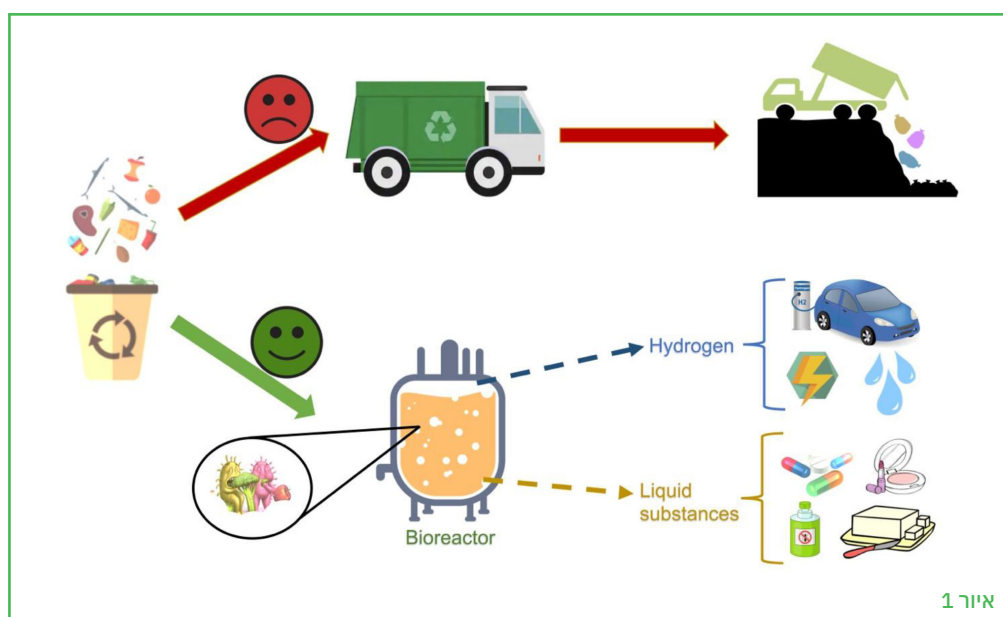
פְּחָמִימוֹת

(Carbohydrates)

מורכבות מאבני בנין העשויות סוכרים. זהו מקור האנרגיה העיקרי של כל הדברים החיים.

גודלם הזעיר, מיקרואורגניזמים הם יצורים מגוונים, ומצויים בכמויות עצומות. הם ממלאים תפקידים חשובים בתהליכים רבים המתרחשים בטבע. לדוגמה, ביכולתם לסייע בִּהִרְקָבוּת של פסולת אורגנית, ובמחזוריה.

פסולת אורגנית נוצרת על ידי אורגניזמים חיים, בכלל זה כל הפירות והירקות. האם אי פעם תהיתם מה קורה לפסולת הפירות והירקות שאתם זורקים לפח הזבל בבית או שמושלכת במסעדות? בדרך כלל, משאית זבל אוספת את האשפה ולוקחת אותה למִטְמָנָה (איור 1). במטמנות, הפסולת האורגנית מצטברת ונעלמת באטיות רבה על פני תקופת זמן ארוכה. כשהיא מתפרקת, פסולת זו מייצרת תרכובות מסוכנות שעלולות לזהם את האוויר, את הקרקע ואת המים. לדוגמה, במהלך פירוק של פסולת אורגנית נוצר נוזל שחור המכונה 'תַּשְׁטִיף פסולת'. אם הנוזל הזה משתחרר אל הטבע, הוא מזהם את המים המשמשים לשתייה, ומשפיע על איכות הקרקע המשמשת לגידול חקלאי.



מה ביכולתנו לעשות כדי למנוע הגעת פסולת אורגנית לטבע? ובכן, ישנה דרך נוספת להתמודדות עם הזבל, שהיא נקייה וידידותית לכדור הארץ שלנו! אנו יכולים לשלֵב את הפסולת האורגנית עם מיקרואורגניזמים מסוימים שהופכים אותה לתוצרים בעלי עֵרֶךְ. בתוצרים הללו ניתן להשתמש לייצור מזון, משקאות ותרופות. יתרה מזו, כשהם מִפְרָקִים את הפסולת האורגנית, מיקרואורגניזמים אלה מייצרים גז מימן. זהו גז מדהים שניתן להשתמש בו לייצור אנרגיה לתדלוק מכוניות. תהליך זה נקרא עיכול אֲנָאֵירוֹבִי [1].

מפסולת אורגנית לאנרגיה ולתרכובות בעלות עֵרֶךְ

כל הפסולת האורגנית עשויה אבני בנין זעירות בשם פְּחָמִימוֹת. בתהליך העיכול האנאירובי משתתפים כמה מיקרואורגניזמים נהדרים שיכולים להפריד את אבני הבנין הללו, ולאכול אותן. הפחמימות מאפשרות למיקרואורגניזמים לגדול, לייצר מיקרואורגניזמים נוספים, ולייצר תרכובות המכונות חומצות אורגניות, וכן גז מימן.

חומצות אורגניות (Organic Acids)

חומרים העשויים פחמן, מימן וחמצן. החומצות האורגניות קיימות באופן טבעי בחלק מהפירות ומהירקות.

בִּיורֶאקטור (Bioreactor)

כלי שבו המיקרואורגניזמים יכולים לחיות, לגדול ולבצע את פעילויותיהם, כמו הירקבות.

כדי לתאר עיכול אנאירובי, נדמיין איך מכינים עוגה. מה דרוש לנו כדי להכין עוגה? ובכן, אנו זקוקים למצרכים (חלב, קמח, סוכר וכדומה); למישהו שיכין אותה; ולתנור. עבור העיכול האנאירובי נדרשים דברים דומים: במקום מצרכים אנו זקוקים לפסולת אורגנית, ולמיקרואורגניזמים בתור הטבחים. את ה'מצרכים' אנו מניחים בתוך תנור מיוחד שנקרא **בִּיורֶאקטור** (איור 1). בבִּיורֶאקטור, המיקרואורגניזמים אחראים להתרחשות תהליך העיכול האנאירובי, ומייצרים 'עוגה' בעלת 'פרוסות' בטעמים שונים. כל פרוסה מתאימה לתוצר שונה – לדוגמה, מימן; חומצה אצטית; חומצה בּוּטִירִית וחומצות אחרות. תהליך זה מכונה 'עיכול אנאירובי' (בלעז Dark fermentation, ובתרגום מילולי: תסיסה חשוכה) משום שכדי לייצר את התוצרים בבִּיורֶאקטור המיקרואורגניזמים אינם זקוקים לאור או לחמצן.

עבור מה משמשים התוצרים של עיכול אנאירובי?

אם כן, מה ניתן לעשות עם התרכובות שנוצרות על ידי עיכול אנאירובי? כפי שהזכרנו קודם, מימן הוא גז שאפשר להשתמש בו כדי לייצר אנרגיה להנעת הֶרְכָּבִים שלנו [2]. רוב המכונות צורכות בנזין כחומר דלק. אולם כשבנזין נשרף במנועי המכונות, נוצרים מזהמי אוויר. באופן מדהים, גז מימן אינו מייצר מזהמים, ובהשוואה לדלק שמקורו בבנזין, אנו זקוקים להרבה פחות גז מימן כדי לנסוע למרחקים ארוכים.

מה בנוגע לחומצות? חומצה אצטית משמשת בתהליך ייצור של תרופות וצבעים. חומצה בּוּטִירִית יכולה לשמש להכנת מאכלים ומשקאות מסוימים, כמו חמאה ומשקאות תוססים [2]. חומצות אחרות עוזרות לשמור על טריות המזון לִפְרֶק זמן ממושך. בדרך כלל, החומצות הללו מיוצרות במפעלים שמשחררים מזהמים רבים, אשר עלולים לפגוע בכדור הארץ. בעיכול אנאירובי, החומצות הללו מיוצרות בדרך 'נקייה', תוך שימוש בזבל שמקורו בבתים שלנו, בלי לייצר זיהום.

הסוף למטמנות?

אם זה נשמע כה נהדר, מדוע אנו ממשיכים לשלוח את הזבל שלנו למטמנות? מסתבר כי הטכנולוגיה הדרושה כדי להפוך את העיכול האנאירובי יעיל בקנה מידה גדול, עדיין נמצאת בשלבי פיתוח. כדי להבין למה, נחזור לדוגמת העוגה. **באיור 2** ניתן לראות את פרוסות העוגה בטעמים השונים, שמתקבלות מ'אפייה' של פסולת אורגנית בבִּיורֶאקטור. תוכלו לראות שהפרוסה הגדולה ביותר תואמת למיקרואורגניזמים (שמתרבים בבִּיורֶאקטור), ולגז בשם פחמן דו-חמצני (CO_2). הפרוסות הבאות בגודלן הן החומצה האצטית והחומצה הבוטירית. לבסוף, פיסת המימן היא הקטנה ביותר [2]. יש צורך במחקר נוסף בנושא עיכול אנאירובי, כדי להגדיל את כמויות המימן במידה שתהיה מועילה, ולהקטין את פרוסות המיקרואורגניזמים והפחמן הדו-חמצני. התפקיד שממלא הפחמן הדו-חמצני בהתחממות העולמית ידוע לכול. כיוון שהעיכול האנאירובי הוא חלופה ידידותית לכדור הארץ, עָלֵינו להימנע משחרור לאוויר של הפחמן הדו-חמצני שנוצר ב'תנור האפייה' לאורך התהליך. את הפחמן הדו-חמצני שנוצר בתהליך ניתן לאחסן, ולהשתמש בו עבור אפשרויות רבות שאינן מזיקות לכדור הארץ, לדוגמה, לגידול אצות מסוימות.

איור 2

תהליך העיכול האנאירובי
המתרחש בביראקטור.

בתהליך זה נוצרות 'פרוסות'
של תרכובות שונות. הפרוסה
הגדולה ביותר היא של
מיקרואורגניזמים ושל פחמן
דו-חמצני

(Microbes & CO₂), אחריה
פרוסות של כמה חומצות
(Acids), ולבסוף, פרוסת
המימן (Hydrogen).

= Acetic acid

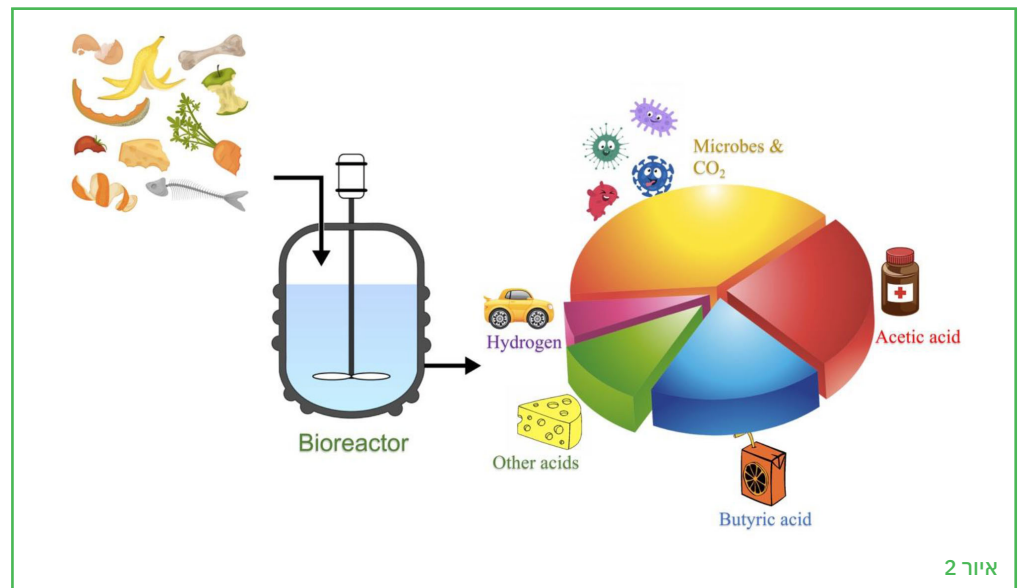
חומצה אצטית;

= Butyric acid

חומצה בוטירית;

= Other acids

חומצות אחרות.



איור 2

כיצד ביכולתנו להגביר את יעילות המיקרואורגניזמים הללו ולשפר את העיכול האנאירובי? התשובה היא להמריץ אותם לעבודה קשה יותר. כדי לגרום למיקרואורגניזמים לעבוד קשה יותר, צריך שהמזון בביראקטור והתנאים האחרים המתקיימים שם יהיו מושלמים. קבוצת המחקר שלנו חוקרת דרכים שונות לשיפור העיכול האנאירובי. לדוגמה, אנו ממריצים את המיקרואורגניזמים בביראקטור על ידי הוספה של מיקרואורגניזמים נוספים, במטרה להפוך את התהליך מהיר יותר ויעיל יותר. באופן זה, באפשרותנו להכפיל את גודל 'פרוסת' המימן [3].

סיכום

מאמר זה מסביר כי ישנם מיקרואורגניזמים שיכולים לאכול את הפסולת האורגנית מהבתים שלנו ומהמסעדות שלנו, ולפְרֶקֶה באמצעות תהליך בשם 'עיכול אנאירובי'. מיקרואורגניזמים אלה מייצרים תרכובות בעלות ערך, בכלל זה חומצה אצטית וחומצה בוטירית, שיכולות לשמש לייצור תרופות, מזון ומוצרים נוספים שאנו משתמשים בהם ביומיום. כמו כן המיקרואורגניזמים הללו מייצרים גם מימן, שיכול לשמש אנרגיה להנעת המכוניות שלנו. לעיכול האנאירובי יש פחות השפעות שליליות על כדור הארץ בהשוואה להשלכת פסולת אורגנית למטמנה, אך עדיין צריך לשפר את התהליך לפני שניתן יהיה להשתמש בו בקנה מידה נרחב. ברחבי העולם, מדענים רבים חוקרים דרכים להפוך את הפסולת האורגנית לחומרים שימושיים על ידי שיפור תהליך העיכול האנאירובי.

מימון

מחקר זה נתמך כלכלית על ידי פרויקט CONACYT, A1-S-37174.

תודות

JM-R מודה על המלגה לתארים מתקדמים מטעם CONACYT.

הצגת כלל בינה מלאכותית

טקסט חלופי הנלווה לאיורים במאמר זה נוצר על ידי פרונטירז בסיוע כלל בינה מלאכותית, ונעשו מאמצים על מנת להבטיח את דיוקו, כולל בדיקה על ידי כותבי המאמר כאשר הדבר התאפשר. אם ברצונכם לדווח על בעיה, אנו צרו איתנו קשר.

מקורות

1. Dahiya, S., Chatterjee, S., Sarkar, O., and Mohan, S. V. 2021. Renewable hydrogen production by dark-fermentation: current status, challenges and perspectives. *Bioresour. Technol.* 321:124354. doi: 10.1016/j.biortech.2020.124354
2. Jarunglumlert, T., Prommuak, C., Putmai, N., and Pavasant, P. 2018. Scaling-up bio-hydrogen production from food waste: feasibilities and challenges. *Int. J. Hydrogen Energy* 43:634–48. doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.10.013
3. Montoya-Rosales, J. de J., Palomo-Briones, R., Celis, L. B., Etchebehere, C., and Razo-Flores, E. 2020. Discontinuous biomass recycling as a successful strategy to enhance continuous hydrogen production at high organic loading rates. *Int. J. Hydrogen Energy* 45:17260–9. doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.04.265

פורסם אונליין: 14 בנובמבר 2025

נערך על ידי: Dominik K. Großkinsky

מנחים מדעיים: Melissa Hamner Mageroy | Ramesh T Subramaniam

ציטוט: Montoya-Rosales JdJ | Razo-Flores E (2025) כיצד משתמשים במיקרואורגניזמים לייצור מימן מן המזבל? Front. Young Minds. doi: 10.3389/frym.2022.793814-he

תורגם והותאם מ: Montoya-Rosales JdJ and Razo-Flores E (2022) Using Microbes to Produce Hydrogen From Garbage. Front. Young Minds 10:793814. doi: 10.3389/frym.2022.793814

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

זכויות יוצרים © 2025 Montoya-Rosales I Razo-Flores. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון [Creative Commons Attribution License \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). 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.

סוקרים צעירים

DAVID, גיל: 11

אני נהנה לדוג ולבלות בטבע. המנה האהובה עליי היא שפמנון מטוגן ברוטב טרטר. הצבע המועדף עליי הוא ירוק כהה בגוון מָטָלִי. הסרט האהוב עליי הוא 'הארי פוטר והאסיר מאזקבאן'.



ELILL, גיל: 15

היי! שמי Elill ואני בן 15. נהנה לקרוא ספרי עיון, ללמוד, לבלות עם משפחתי ולצפות בסרטי 'מלחמת הכוכבים'. המקצועות האהובים עליי בבית הספר הם מדעים, היסטוריה ומתמטיקה.



YUHENDRA, גיל: 12

היי! נהדר להיות סוקר צעיר. אני בן 12, אוהב מדעים ומתמטיקה. אלו גם המקצועות המועדפים עליי בבית הספר. בזמני הפנוי אני מרכיב לגו, מבלה עם משפחתי ונהנה לשחק במשחקי וידאו.



הכותבים

JOSÉ DE JESÚS MONTOKA-ROSALRS

אני מהנדס סביבתי מהמכון הפוליטכני הלאומי – קמפוס סקטקס, מקסיקו. בימים אלו קיבלתי את הדוקטורט שלי בתחום מדעי הסביבה ממכון פוטוסינו למחקר מדעי וטכנולוגי A.C., מקסיקו. תחומי העניין המחקריים שלי כוללים ביוטכנולוגיה סביבתית, ואת תפקיד המיקרואורגניזמים בתהליכים הללו.

*jose.montoya@ipicyt.edu.mx



ELÍAS RAZO-FLORES

Elías הוא מהנדס כימיה בעל תואר שני בביוטכנולוגיה ודוקטורט בטכנולוגיה סביבתית. הוא עוסק בכמה נושאים הקשורים לביוטכנולוגיה סביבתית, ובפרט בייצור ביו-אנרגיה (גזי מימן ומתאן); התכלות והתמרה ביולוגיות של תרכובות רעילות, וטיפול בבזבז מים.



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



הוצאת פרונטירס מדע לצעירים ישראל
Hebrew version provided by



THE SAGOL NETWORK



קרן משפחת
שעשוע Shashua
Family Foundation